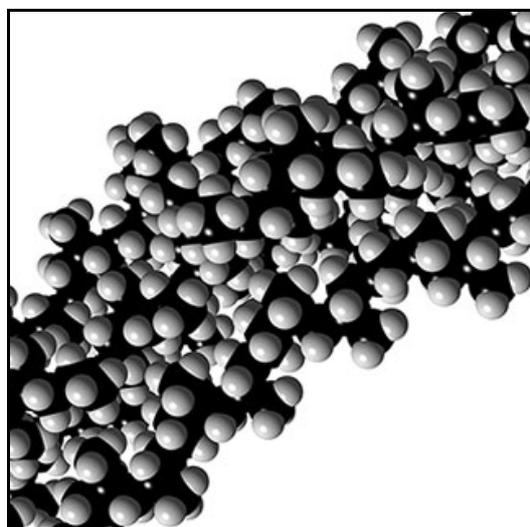


В.В. Евстифеев, М.С. Корытов

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ,
ПЛАСТМАССЫ, РЕЗИНЫ, КОМПОЗИТЫ**



Федеральное агентство по образованию
ГОУ ВПО Сибирская государственная автомобильно-дорожная
академия (СибАДИ)

В.В. Евстифеев, М.С. Корытов

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ,
ПЛАСТМАССЫ, РЕЗИНЫ, КОМПОЗИТЫ**

Учебное пособие

Омск
СибАДИ
2009

УДК 621.315.5
ББК 31.23

Рецензент:

д-р. техн. наук, проф. С.А. Корнилович (СибГАУ)

Евстифеев, В.В. и др.

Электротехнические материалы, пластмассы, резины, композиты: Учебное пособие / В.В. Евстифеев, М.С. Корытов. – Омск: Изд-во СибАДИ, 2009. – 36 с.

Приводится классификация электротехнических, неметаллических и композиционных материалов и описываются их электрические, физико-химические и механические свойства. Рассматривается технология производства материалов. Табл. 10. Ил. 4. Библиогр.: 10 назв.

© В.В. Евстифеев, М.С. Корытов, 2009

1. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

1.1. Проводниковые материалы

В зависимости от удельного электрического сопротивления материалы подразделяют на следующие группы: 1) металлы и сплавы высокой проводимости; 2) припой; 3) сверхпроводники; 4) контактные материалы; 5) сплавы с повышенным электрическим сопротивлением

Наибольшей проводимостью (меньшим сопротивлением) обладают чистые металлы (табл. 1), исключая ртуть; меньшей – сплавы (табл. 2).

Т а б л и ц а 1

Удельное электрическое сопротивление чистых металлов при 20 °С

Металл	Алюминий	Висмут	Вольфрам	Железо	Золото	Иридий	Медь	Молибден	Никель	Платина	Свинец	Серебро	Титан	Цинк
$\rho, 10^{-6}$ Ом·м	0,0271	1,2	0,055	0,098	0,024	0,0474	0,0172	0,054	0,087	0,107	0,205	0,016	0,5562 - 0,7837	0,059

Из чистых металлов (медь, алюминий) изготавливают обмоточные, монтажные, установочные провода и кабели.

1.2. Сплавы с повышенным электрическим сопротивлением

Отдельные области электротехники (электротермия) нуждаются в **сплавах высокого электрического сопротивления**, которые могли бы длительно работать при 800-1200 °С. Такие сплавы называются **жаростойкими сплавами** и представляют собой твердые растворы металлов с неупорядоченной структурой на основе меди и никеля, никеля и хрома и других металлов. Изготавливаемые из жаростойких сплавов проволока и ленты применяются в электронагревательных приборах, печах сопротивления и термостатах. К жаростойким проводниковым сплавам относятся: **нихром, хромаль (табл. 3), фехраль, константан, манганин, никелин (табл. 2)**. Характеристики последних следующие:

Нихром – сплав, состоящий из 55-78 % никеля, 15-23 % хрома, 1,5 % марганца, остальное – железо;

Хромаль – сплав состава: *Cr* (23-27%); *Al* (4,5-6,5%); остальное – железо. Сплав идет на изготовление нагревательных элементов электриче-

ских печей, электробытовых нагревателей с рабочей температурой до 900 °С;

Константан также относится к медно-никелевым сплавам: медь 60-65 % и никель 40-35 %.

Характерной особенностью константана является то, что электрическое сопротивление не изменяется с изменением температуры, что является достоинством сплава.

Константан в паре с медью создает большую ТЭДС, равную 39 мкВ/град, что не дает возможности применять константан в точных сопротивлениях и электроизмерительных приборах. Голая константановая проволока может использоваться при температурах, не превышающих 500 °С.

Константановая проволока применяется для изготовления реостатов и термопар;

Манганин – сплав МНМц 3-12 на основе меди с добавкой марганца (11,5-13,5 %) и никеля (2,5-3,5 %), характеризующийся чрезвычайно малым изменением электрического сопротивления в области комнатных температур. Манганин – основной материал для электроизмерительных приборов и образцовых сопротивлений – эталонов, мостовых схем, шунтов, термодатчиков, дополнительных сопротивлений приборов высокого класса точности. Максимальная рабочая температура – 100 °С. Существенное преимущество манганина перед константаном заключается в том, что манганин обладает очень малой термоэлектродвижущей силой (ТЭДС) в паре с медью (не более 1 мкВ/1°С), поэтому в приборах высокого класса точности применяют только манганин.

Никелин – сплав меди с никелем (25-35% Ni) с примесями марганца, железа и цинка. Характеризуется большим электрическим сопротивлением. Применяется в реостатах.

Т а б л и ц а 2

Удельное электрическое сопротивление электротехнических сплавов при 20 °С

Сплав	Нихром	Хромаль	Манганин	Константан	Никелин
$\rho, 10^{-6}$ Ом·м	1,05...1,4	1,3...1,5	0,43...0,51	0,5	0,4

В ряде случаев от проводниковых материалов требуется высокое удельное сопротивление, малый температурный коэффициент сопротивления и стойкость к окислению при повышенных температурах. Наиболее востребованы проводниковые сплавы с большим удельным сопротивлением ($\rho=0,42-2,0$ Ом·мм²/м) для изготовления прецизионных элементов сопротивления (обмоток потенциометров, шунтов, катушек сопротивления, резисторов, термопар, тензометрических датчиков) и нагревательных элементов электрических приборов и печей.

Сплавы (табл. 2), рабочая температура которых менее 1200 °С, используют также для элементов сопротивления и нагревательных элементов. Это сплавы на основе железа и никеля. Легирование хромом обеспечивает им высокое электрическое сопротивление и жаростойкость.

Т а б л и ц а 3

Свойства сплавов для нагревательных элементов

Сплав	Массовая доля элементов, %				Электрические свойства		
	<i>Cr</i>	<i>Al</i>	<i>Fe</i>	<i>Ni</i>	ρ , мкОм·м	$\alpha_p \cdot 10^5$, 1/°С	$t_{раб}$, °С
X23Ю5 (хромаль)	21,5-24,5	4,6-5,3	Остальное	Не более 0,6	1,37	1,4	1200
X20Н80 (нихром)	20-23		Не более 1,5	Остальное	1,11	9,0	1100

Для электронагревательных приборов нужны жаростойкие проводниковые сплавы высокого сопротивления, т. е. стойкие к окислению при высоких температурах. Кроме того, эти сплавы должны обладать малой величиной температурного коэффициента сопротивления α . Перечисленным требованиям удовлетворяют сплавы двух типов: **двойные сплавы на основе никеля (*Ni*) и хрома (*Cr*), называемые нихромами, и тройные сплавы на основе никеля, хрома и железа, называемые ферронихромами.**

Кроме того, находят применение тройные **сплавы железа, хрома и алюминия, называемые фехралями и хромалиями.** Эти сплавы отличаются различным содержанием составляющих их компонентов и соответственно разной жаростойкостью и электрическими характеристиками.

Сплавы на основе железа недефицитны и используются для реостатов и нагревательных элементов в мощных электронагревательных установках и промышленных печах. Присутствие в сплавах никеля, алюминия и особенно хрома обеспечивает жаростойкость сплавов (900-1200 °С).

При температурах выше 1200 °С (в вакуумных печах) используют сплавы на основе тугоплавких металлов *W, Mo, Ta*.

Для получения механически прочного металла спеченные стержни подвергают многократной ковке и волочению с перемежающимися периодами отжига. В результате такой обработки вольфрам приобретает волокнистое строение, обеспечивающее ему высокую механическую прочность и пластичность. Из вольфрама изготавливают проволоку диаметром до 0,1 мм. Окисление вольфрама на воздухе начинается при температуре от 400 °С и выше.

Из **вольфрама и молибдена** изготавливают спирали накала, поддерживающие крючки, петли, катоды прямого накала и подогреватели катодов с косвенным накалом в электровакуумных приборах.

Для изготовления нагревателей электрических печей (до 1500 °С) применяют также керамические материалы, например, **силикатные стержни, которые спекают из карбида кремния**. Силикат является полупроводниковым материалом и имеет высокое электрическое сопротивление. Распространены также и нагреватели из **дисилицида молибдена ($MoSi_2$)**.

1.3. Припой

Сплавы, используемые при пайке металлов высокой проводимости, **должны иметь небольшое переходное сопротивление** (сопротивление контакта).

Различают припои двух типов: **для низкотемпературной пайки** (температура плавления до 400 °С) и для **высокотемпературной пайки**.

Для хорошего соединения припой должен иметь температуру плавления ниже, чем у металла, подвергающегося пайке; в расплавленном состоянии припой должен хорошо смачивать поверхности. Температурные коэффициенты линейного расширения металла и припоя должны быть близки.

В приборостроении для **низкотемпературной пайки** применяют оловянно-свинцовые и оловянно-цинковые припои. Сплав эвтектического типа (состав 61 % *Sn* и 39 % *Pb*) имеет низкую температуру плавления (183 °С) и хорошую жидкотекучесть, что обеспечивает качественное формирование шва и высокие механические свойства. Такой сплав обозначают ПОС-61. Применяют также сплавы доэвтектического ПОС-18, ПОС-30, ПОС-40, ПОС-50 и заэвтектического ПОС-90 составов. Цифра в марке указывает на содержание олова.

Наилучшим припоем является сплав ПОЦ-90, отвечающий эвтектическому составу: 90% *Sn* и 10% *Zn*. Имеет самую низкую температуру плавления (199 °С) из всех сплавов этой системы. Сплавы ПОЦ-70, ПОЦ-60, ПОЦ-40, также как и ПОЦ-90, используют для пайки алюминия и его сплавов. В тех случаях, когда требуется очень низкая температура (<100 °С) нагрева, для пайки используют сплавы висмута со свинцом, оловом, кадмием.

Припои для **высокотемпературной пайки** обеспечивают более прочные соединения, так как вследствие высокой температуры нагрева происходит взаимная диффузия элементов основного металла и припоя. В качестве высокотемпературных припоев **используют медь, медно-цинковые и медно-фосфористые припои, а также припои, содержащие**

серебро. Медно-цинковые припои ПМЦ-36, ПМЦ-48, ПМЦ-54 (цифра указывает содержание меди) имеют переходное электрическое сопротивление в пределах 0,03-0,04 мкОм·м, температура плавления их при увеличении содержания меди возрастает от 825 до 880 °С. Применение медно-фосфористых припоев ПМФ7 (цифра указывает процентное содержание фосфора) позволяет вести пайку меди без флюса, что практически удобнее и проще.

Припои, содержащие серебро, обеспечивают хорошую смачиваемость, а поэтому пригодны для пайки любых металлов и сплавов. Кроме серебра, содержание которого указывает цифра в марке, припой содержит медь или медь с цинком (ПСр-72, ПСр-61, ПСр-45, ПСр-10).

1.4. Сверхпроводники

Особую группу материалов высокой электрической проводимости представляют сверхпроводники. Обычно с понижением температуры электрическое сопротивление всех металлов монотонно падает. Однако есть металлы и сплавы, у которых электрическое сопротивление при критической температуре резко падает до нуля – материал становится сверхпроводником.

Сверхпроводимость обнаружена у 30 металлов и примерно у 1000 сплавов. **Сверхпроводящие свойства обнаруживают многие сплавы со структурой упорядоченных твердых растворов и промежуточных фаз (σ -фаза, фаза Лавеса и др.).** При обычных же температурах эти вещества не обладают высокой проводимостью.

Переход металла в **сверхпроводимое состояние связывают с фазовым превращением.** Новое фазовое состояние характеризуется тем, что свободные электроны перестают взаимодействовать с ионами кристаллической решетки, они вступают во взаимодействие между собой. В результате этого электроны с противоположно направленными нейтронами спариваются. Результирующий спиновый момент становится равным нулю, и сверхпроводник превращается в диамагнетик. Все электронные орбитали располагаются на низких энергетических уровнях, где они перестают испытывать тепловые рассеяния, так как энергия, которую пара может получить от взаимодействия с ионами решетки, слишком мала, чтобы вызвать это рассеяние. Из всех элементов, способных переходить в сверхпроводящее состояние, ниобий имеет самую высокую критическую температуру перехода ($-263,83$ °С). **Практическое использование нашли сверхпроводящие сплавы с высоким содержанием ниобия, такие как 35БТ, 65БТ, 50БТ, 70ТМ, 60ТБЛ и др.**

Сплав 35БТ (60 - 65 % Ti ; 33,5-36,5 % Nb , 1,7-4,4 Zn) имеет критическую температуру перехода 9,7 К ($-263,3$ °С). Критические значения плот-

ности тока составляют $2,8 \cdot 10^6$ А/м², напряженность магнитного поля – $(6 - 7,2) \cdot 10^6$ А/м. Сплав 35БТ применяют при изготовлении обмоток мощных генераторов, магнитов большой мощности (например, у поездов на магнитной подушке), туннельных диодов. Способность сверхпроводников, являющихся диамагнетиками, выталкивать магнитное поле, используют в магнитных насосах, позволяющих генерировать магнитные поля колоссальной напряженности, а также в криогенных гироскопах. Якорь гироскопа, изготовленный из сверхпроводника, «плавает» в магнитном поле. Отсутствие опор и подшипников устраняет трение и повышает долговечность гироскопа.

Сверхпроводящее состояние разрушается в результате нагрева, а также в сильных магнитных полях, при пропускании электрического тока большой силы (критические значения поля и тока).

1.5. Контактные материалы

Электрические контакты подразделяют на **разрывные, скользящие и неподвижные**. Основное требование для всех контактов – малое *переходное электрическое сопротивление*.

Разрывные контакты. Эти контакты предназначены для периодического замыкания и размыкания цепи и работают в трудных условиях, так как возникает искра или электрическая дуга, что вызывает коррозию и электроэрозионный износ. Это повышает переходное электрическое сопротивление, вызывает разогрев и сваривание (или прилипание) контакта. В зависимости от электрической мощности разрывные контакты подразделяют на слабонагруженные и высоконагруженные. **Слабонагруженные контакты изготавливают из благородных металлов: золота, серебра, платины, палладия и их сплавов**, которые обладают низким переходным электрическим сопротивлением и повышенной стойкостью против окисления.

Из чистой платины (температура плавления 1773° С), а главным образом из ее сплавов с иридием, родием и осмием, изготавливают контакты для выключающих аппаратов малой мощности (реле и др.).

Платиновая проволока применяется для изготовления электронагревательных элементов лабораторных печей. Для измерения высоких температур (до 1500° С) применяют термопары из платиновой и платинородиевой проволок.

Высоконагруженные контакты изготавливают из вольфрама, молибдена, их сплавов и порошковых композиций. Вольфрам благодаря своей тугоплавкости хорошо сопротивляется электроэрозионному изнашиванию. Такие контакты не свариваются при эксплуатации, их применяют при большой частоте переключения.

Такое же назначение имеют сплавы вольфрама с молибденом. Сплавы обладают пониженным сопротивлением газовой коррозии, так как молибден и вольфрам образуют легко испаряющиеся оксидные пленки. Такие сплавы можно использовать для мощных контактов, но в среде инертных газов или в вакууме. Сплавы вольфрама с 45% *Мо* используют также для нитей накаливания электрических ламп и катодов, как сплавы повышенного электрического сопротивления.

В наиболее мощных контактах используют спеченные композиции вольфрама с серебром или медью, либо используют пористый вольфрам, который в вакууме пропитывают жидкой медью или серебром.

Скользящие контакты. Основное требование к ним – высокое сопротивление свариванию. Кроме окисленного серебряно-медного сплава для скользящих контактов применяют ***композиции из порошков меди или серебра с небольшой добавкой графита,*** препятствующего свариванию (МГЗ, МГ5, СГЗ, СГ5). Цифра в марках указывает на содержание графита в процентах.

Неподвижные контакты. Эти контакты должны иметь низкое значение переходного электрического сопротивления. Поэтому для зажимных контактов выбирают коррозионно-стойкие материалы (***медь, латунь, цинк***).

2. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Полупроводники при комнатной температуре занимают по удельному сопротивлению, имеющему значения 10^{-6} - 10^9 Ом·м, промежуточное положение между металлами и диэлектриками. К полупроводникам относят вещества, ширина запрещенной зоны которых лежит в диапазоне 0,1-3,0 эВ.

Полупроводники могут быть жидкими или твердыми, кристаллическими или аморфными.

Удельная проводимость полупроводников в сильной степени зависит от вида и количества содержащихся в них примесей и дефектов. Для них характерна чувствительность к свету, электрическому и магнитному полю, радиационному воздействию, давлению и др.

В полупроводниках часто наблюдается смешанный тип химических связей: ковалентно-металлический, ионно-металлический и др.

К полупроводникам ним относятся многие химические элементы и химические соединения:

- - простые вещества: германий, кремний; селен, теллур, бор, углерод, фосфор, сера, сурьма, мышьяк и др.;
- - окислы и сульфиды многих металлов: NiO , Cu_2O , CuO , CdO , PbS и др.;
- - тройные соединения: $CuSbSr$, $CuFeSe_2$, $PbBiSe_3$ и др.;
- - твердые растворы $GeSi$, $GaAs_{1-x}P_x$ и др.;
- - органические красители и другие материалы: антрацен, фталоцианин, нафталин и другие.

2.1. Простые полупроводники

Германий применяется для изготовления диодов и триодов различных типов, транзисторов, датчиков Холла, тензодатчиков, детекторов ядерных излучений и в ИК-оптике; из него изготавливаются мощные выпрямители на большие токи, различные датчики, применяемые для измерения напряженности магнитного поля, термометры сопротивления для низких температур и др. Рабочий диапазон германиевых приборов от -60 до $+70$ °С.

Кремний применяется для изготовления многочисленных полупроводниковых приборов. Из кремния изготавливают точечные и плоскостные диоды и триоды, фотоэлементы и др.

Селен используется для изготовления фотоэлементов – приборов, преобразующих световую энергию в электрическую, а также выпрямителей.

Каждый полупроводниковый материал обладает **электронной и дырочной электропроводностями**. Под действием приложенного электри-

ческого напряжения свободные электроны движутся от отрицательного к положительному полюсу источника тока, а дырки в направлении, противоположном движению электронов. Электрический ток в полупроводниках обусловлен движением сравнительно небольшого количества электронов, так как валентные электроны связаны со своими атомами и не могут двигаться.

В том месте, откуда ушел электрон, возникнет избыточный положительный заряд – образуется **положительная дырка**. Она ведет себя как заряд, равный по абсолютному значению заряду электрона, но положительный по знаку. Во внешнем электрическом поле электроны перемещаются в сторону, противоположную направлению напряженности электрического поля. Положительные дырки перемещаются в направлении напряженности электрического поля. Процесс перемещения электронов и дырок во внешнем поле происходит по всему кристаллу полупроводника. Электропроводность чистого полупроводника, обусловленная упорядоченным перемещением дырок, называется собственной дырочной проводимостью (проводимостью *p*-типа). Общая удельная электропроводность полупроводника складывается из проводимостей *n*- и *p*-типов.

Электрические свойства контакта полупроводников *p*- и *n*-типов.

Область монокристаллического полупроводника, в котором происходит смена проводимости с электронной на дырочную (или наоборот), называется **электронно-дырочным переходом** (*p-n*-переходом). Обычно *p-n*-переход образуется в кристалле полупроводника, где введением соответствующих примесей создаются области с различной (*p*- и *n*-) проводимостью.

При контактировании двух полупроводников с различными типами проводимости будет происходить взаимная диффузия носителей тока через границу соприкосновения (контакт) полупроводников. Электроны из *n*-полупроводника будут диффундировать в дырочный *p*-полупроводник. В результате из объема *n*-полупроводника, граничащего с контактом, уйдут электроны, этот объем будет обеднен электронами, и вблизи границы в нем образуется избыточный положительный заряд. Диффузия дырок из *p*-полупроводника по аналогичным причинам приведет к возникновению вблизи границы в *p*-полупроводнике избыточного отрицательного заряда. В результате на границе электронно-дырочного перехода образуется **запирающий электрический слой**. Электрическое поле запирающего слоя препятствует дальнейшему переходу электронов и дырок через границу раздела двух полупроводников. Запирающий слой имеет повышенное сопротивление по сравнению с остальными объемами полупроводников.

Внешнее электрическое поле влияет на сопротивление запирающего электрического поля. Если *n*-полупроводник подключен к отрицательному полюсу источника, а плюс источника соединен с *p*-полупроводником, то под действием электрического поля электроны в *n*-полупроводнике и дыр-

ки в p -полупроводнике будут двигаться навстречу друг другу к границе раздела полупроводников.

Электроны, переходя границу, «заполняют» дырки. При таком прямом (пропускном) направлении внешнего электрического поля толщина запирающего слоя и его сопротивление непрерывно уменьшаются (рис. 1). В этом направлении электрический ток проходит через границу двух полупроводников.

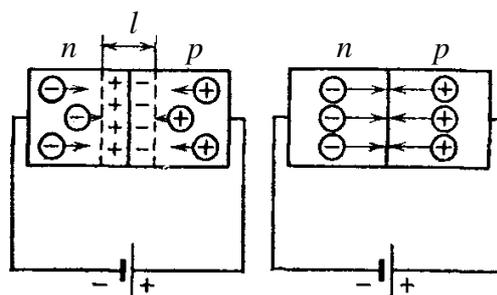


Рис. 1. Пограничный слой p - n -перехода

Если n -полупроводник соединен с положительным полюсом источника, а p -полупроводник – с отрицательным, то электроны в n -полупроводнике и дырки в p -полупроводнике под действием электрического поля будут перемещаться от границы раздела в противоположные стороны (рис. 2). Это приводит к утолщению запирающего слоя и увеличению его сопротивления. Направление внешнего электрического поля, расширяющее запирающий слой называется *запирающим* (обратным). При таком направлении внешнего поля электрический ток через контакт двух n - и p -полупроводников практически не проходит.

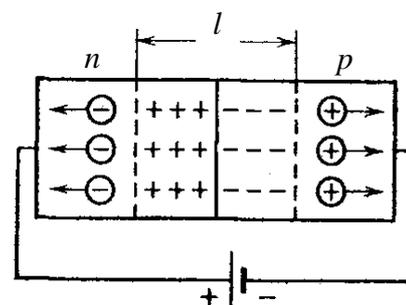


Рис. 2. Утолщение запирающего слоя

Электронно-дырочный переход обладает односторонней (униполярной) проводимостью. Поэтому полупроводник с одним p - n -переходом называется *полупроводниковым диодом*.

Поскольку полупроводниковые материалы весьма чувствительны к повышению температуры, то этим свойством отдельных полупроводников пользуются для создания термосопротивлений, которые можно применять для изменения температур или стабилизации температуры в различных установках. Эти явления усиливаются, когда два различных полупроводника, соответственно подобранные, находятся в контакте друг с другом. Если создать из таких различных полупроводников замкнутую цепь и пропускать через них электрический ток от внешнего источника, то участок спая полупроводников будет или нагреваться или охлаждаться, в зависимости от природы полупроводников и направления электрического тока. Это явление используется для изготовления полупроводниковых холодильников, термисторов и других технических устройств.

Некоторые полупроводники резко повышают свою проводимость под действием световых излучений. Это вызывается тем, что световые излучения передают электронам определенные количества энергии, достаточные для того, чтобы освободить их из атома. Это свойство полупроводников называется *фотопроводимостью*.

Электрическое сопротивление полупроводниковых материалов не является величиной постоянной, а зависит от величины прикладываемого к нему напряжения. Электрическое сопротивление полупроводников уменьшается с увеличением приложенного к ним напряжения, а ток усиливается.

2.2. Полупроводниковые материалы и изделия

Все полупроводниковые материалы бывают **монокристаллическими** (изготавливаются в виде больших одиночных кристаллов, из которых вырезают по определенным кристаллическим направлениям пластинки различных размеров для использования их в выпрямителях, усилителях, фотоэлементах) и **поликристаллическими** (представляют собой смесь множества малых кристалликов, беспорядочно спаянных друг с другом).

Электропроводность, возникающая под действием электрического поля за счет движения электронов и в противоположном направлении такого же количества дырок, называется собственной.

Для собственного полупроводника концентрация носителей определяется шириной запрещенной зоны и значением температуры.

3. МАГНИТНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

3.1. Классификация веществ по магнитным свойствам

Диамagnetики – вещества, в которых в «чистом» виде проявляется диамагнитный эффект, являющийся результатом воздействия внешнего магнитного поля на молекулярные токи. Магнитный момент, возникающий при этом эффекте, направлен навстречу внешнему полю.

Примеры диамagnetиков: все вещества с ковалентной химической связью, щелочно-галогидные кристаллы, неорганические стекла, полупроводниковые соединения A_3B_5 , A_2B_6 , кремний, германий, бор и другие. Ряд металлов: медь, серебро, золото, цинк, ртуть, галлий и другие, водород, азот, вода и другие.

Парамагнетики – вещества с нескомпенсированными магнитными моментами и отсутствием магнитного атомного порядка. Магнитный момент парамагнетика равен нулю. Под действием внешнего поля из-за преимущественной ориентации магнитных моментов в направлении поля появляется намагниченность.

Примеры парамагнетиков: щелочные и щелочно-земельные металлы, некоторые переходные металлы, соли железа, кобальта, никеля, редкоземельных металлов, кислород, окись азота, Al , Na , Mg , Ta , W , CaO , CoO и другие.

Ферромагнетики – вещества, в которых (ниже температуры Кюри) наблюдается магнитная упорядоченность, соответствующая параллельному расположению спинов в макроскопических областях (доменах) даже в отсутствие внешнего магнитного поля.

Примеры ферромагнетиков: железо, никель, кобальт, их соединения и сплавы, некоторые сплавы марганца, серебра, алюминия и др. При низких температурах некоторые редкоземельные элементы – гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий. Сплавы RCO_5 , где R редкоземельный элемент (Sm , Ce или Pr).

Антиферромагнетики – характеризуются антиферромагнитным атомным порядком, возникающим из-за антипараллельной ориентации одинаковых атомов или ионов кристаллической решетки. При нагревании магнитная упорядоченность исчезает при температуре, называемой точкой Нееля (антиферромагнитная точка Кюри).

Примеры антиферромагнетиков: хром, марганец, цезий, неодим, самарий и другие. Химические соединения на основе металлов переходной группы типа окислов, галогенидов, сульфидов, карбонатов и др. $MnSe$, $FeCl_2$, FeF_2 , $CuCl_2$, MnO , FeO , NiO .

Ферримагнетики – вещества с нескомпенсированным антиферромагнетизмом. Как и антиферромагнетизм существует при температуре не

выше точки Нееля. Выше этой температуры ферромагнетики переходят в парамагнитное состояние.

К ферромагнетикам относятся некоторые упорядоченные металлические и различные оксидные соединения, наибольший интерес среди которых представляют ферриты $MnO \cdot Fe_2O_3$, $BaO \cdot 6Fe_2O_3$, $(NiO \cdot ZnO)Fe_2O_3$, $Li_2O \cdot Fe_2O_3$ и другие.

Ферро- и ферромагнетики относятся к сильномагнитным материалам, остальные группы к слабомагнитным веществам.

Все магнитные материалы делятся на магнитомягкие, магнитотвердые и магнитные материалы специального назначения.

Магнитомягкие материалы способны намагничиваться до насыщения в слабых полях, обладают высокой магнитной проницаемостью и малыми потерями на перемагничивание. Применяются в основном в качестве магнитопроводов дросселей, трансформаторов, электромагнитов, электрических машин и т.д. Намагничивание магнитомягких материалов происходит в основном за счет смещения междоменных границ

Магнитотвердые материалы отличаются большой удельной энергией, которая тем больше, чем больше остаточная индукция и коэрцитивная сила материала. Используются главным образом для постоянных магнитов. Намагничивание в магнитотвердых, в основном, за счет вращения вектора намагниченности.

Магнитные материалы специального назначения – это материалы с прямоугольной петлей гистерезиса, магнитострикционные, термомагнитные, ферриты СВЧ и другие.

3.2. Природа ферромагнетизма

Возникновение магнитных свойств у ферромагнетиков связано с их доменным строением. Домены – это области самопроизвольной намагниченности, возникающие даже в отсутствие внешнего магнитного поля, в которых магнитные моменты атомов ориентированы параллельно.

Каждый реальный магнитный материал разделен по всему объему на **множество замкнутых областей – доменов**, в каждом из которых самопроизвольная намагниченность однородна и направлена по одной из осей легкой намагниченности. Такое состояние энергетически выгодно и кристалл в целом немагнитен, так как магнитные моменты доменов ориентированы в пространстве равновероятно. Объем доменов может колебаться в широких пределах (10^{-1} - 10^{-6} см³). Обычно домены имеют правильную форму.

В процессе намагничивания образца основную роль играют два процесса – смещение доменных границ и вращение векторов намагниченности доменов.

3.3. Магнитомягкие материалы

К магнитомягким материалам относятся *технически чистое железо, листовая электротехническая сталь, сплавы железа и никеля и сплавы железа, кремния и алюминия*. Все эти материалы обладают высокой магнитной проницаемостью, весьма малой коэрцитивной силой, большой магнитной индукцией и малыми потерями на гистерезис.

Технически чистое железо называется *армко-железо*. Оно содержит небольшое количество примесей: углерода 0,025 %, кремния 0,02 %, марганца 0,035 %, серы 0,01 %; кислород почти полностью отсутствует.

Другим видом технически чистого железа является *электролитическое железо*.

Широкое применение получило железо высокой химической чистоты (*карбонильное железо*). Оно представляет собой порошок, который выделяется из соединения $Fe(CO)_5$ (карбонил железа – жидкость) при температурах 200-250 °С и давлении 150 атм. Железо осаждается в виде мелкого порошка. Оно не содержит такие примеси, как кремний, фосфор и сера; кислород и углерод содержатся в количествах (табл. 4).

Карбонильное железо используется главным образом для изготовления магнитных сердечников, работающих на высоких частотах. Для этого порошок карбонильного железа предварительно смешивается с порошком какого-либо органического диэлектрика (полистирол, бакелит и др.). Из этой смеси получают горячим прессованием сердечники различной формы. Наличие в сердечниках изоляционных прослоек между зёрнами железа приводит к уменьшению потерь на вихревые токи, которые особенно велики на высоких частотах.

Т а б л и ц а 4

Магнитные характеристики технически чистого железа

Наименование	Примеси, %			Характеристики		
	углерод	кислород	μ_H	μ_M	H_C , а/см	B_S , тл
Армко-железо	0,025	-	250	650	0,64	0,78
Электролитическое железо	0,02	0,01	500	15000	0,28	1,05
Карбонильное железо	0,008	-	3000	21000	0,064	0,6
Железо, обработанное в водородной среде	0,005	0,003	6000	200000	0,024	-

Для изготовления сердечников статоров и роторов электрических машин, сердечников силовых трансформаторов, трансформаторов тока и магнитопроводов различных электрических аппаратов используется листовая электротехническая сталь. Эта сталь является сплавом железа с кремнием, содержание которого от 0,8 до 4,8 %.

Электротехническая листовая сталь обладает хорошими магнитными характеристиками – высокой индукцией, малой коэрцитивной силой и малыми потерями на гистерезис. Она различается по содержанию в ней кремния, по способу изготовления листов, а также по магнитным и электрическим свойствам.

Выпускается сталь следующих марок шести групп: 1) Э11, Э12, Э13; 2) Э21, Э22; 3) Э31, Э32; 4) Э41, Э42, Э43А, Э44, Э45, Э46, Э47, Э48; 5) Э310, Э320, Э330А, Э340, Э370, Э380; 6) Э1100, Э1200, Э1300, Э3100, Э3200.

Буква Э означает «электротехническая сталь», первая за буквой цифра (1, 2, 3 и 4) означает степень легирования (содержания кремния в стали в определенных количествах) стали кремнием, причем содержание кремния находится в следующих пределах: - для слаболегированной стали (Э1) от 0,8 до 1,8 %; - для среднелегированной стали (Э2) от 1,8 до 2,8 %; - для повышено-легированной стали (Э3) от 2,8 до 3,8%; - для высоколегированной стали (Э4) от 3,8 до 4,8 %. Вторые цифры после буквы Э характеризуют удельные потери при перемагничивании. Эти потери тем меньше, чем больше эта цифра, т. е. больше степень легирования. Нули означают, что сталь холоднокатаная текстурованная (0) и холоднокатаная мало-текстурованная (00). Буква А указывает на особо низкие удельные потери при перемагничивании стали.

Хорошими магнитными свойствами обладает тройной сплав на основе железа, содержащий алюминий 5,4 %, кремния 9,6 %, железа 85 %. Такой сплав называется **альсифером** (слово «альсифер» образовалось из соединения трех первых слогов наименований, входящих в сплав веществ – алюминия, силиция, феррума). Его магнитные свойства следующие: $\mu_H = 35\ 000$; $\mu_M = 115\ 000$; $H_C = 0,018$ а/см; $B_S = 0,335$ тл; $\rho = 0,81$ Ом·мм²/м.

Существенным недостатком таких сплавов является то, что они хрупки, тверды и не могут деформироваться. Поэтому детали из них изготовляют только литьем, а обрабатываются – шлифованием.

Широкое применение в электротехнике нашли различные сплавы железа и никеля, которые называют **пермаллоями**. Они обладают высокими магнитно-мягкими свойствами, а именно: большой начальной и максимальной магнитной проницаемостью, малой коэрцитивной силой и большой магнитной индукцией. Эти свойства присущи сплавам с содержанием никеля от 40 до 80 %. При содержании никеля 78,5 % сплав имеет наибольшие значения μ_H и μ_M и очень низкую коэрцитивную силу. Небольших

отклонений от этого содержания (в обе стороны), как величина μ_H и, особенно, μ_M резко уменьшается.

В табл. 5 приведены магнитные характеристики нелегированных пермаллоев, а в табл. 6 – легированных.

Т а б л и ц а 5

Магнитные характеристики нелегированных пермаллоев

Содержание никеля, %	μ_H	μ_M	H_C , а/см	ρ , Ом·мм ² /м
78,5	7000-14000	100000-200000	0,020	0,25
66,0	2500-3700	130000-270000	0,024	0,33
55,0	2000-3200	50000-60000	0,06	0,50

Т а б л и ц а 6

Магнитные характеристики легированных пермаллоев

Марка пермаллоев	μ_H	μ_M	H_C , а/см	ρ , Ом·мм ² /м
79НМ	20000	100000	0,024	0,55
80НХС	35000	120000	0,016	0,62
60НХС	30000	30000	0,012	0,85

Каждый пермаллой применяется в соответствии с его свойствами в различных электромагнитных устройствах. **Главные области применения пермаллоев следующие: измерительные приборы, сердечники трансформаторов тока, магнитные экраны, реле, магнитные усилители, катушки индуктивности в автоматике и т. п.**

При использовании пермаллоев не следует забывать, что они чувствительны к механическим воздействиям и обработке – штамповке, ударам, внешним механическим напряжениям. Все эти механические воздействия резко повышают коэрцитивную силу и уменьшают магнитную проницаемость.

За последние годы разработаны и приобрели широкое применение в электротехнике новые магнитные материалы, получившие название **ферритов**. Эти материалы неметаллические, их изготавливают из смеси окиси железа (Fe_2O_3) с окислами других металлов – цинка (ZnO), марганца (MnO), никеля (NiO) и др.

Характерной особенностью ферритов является то, что при наличии хороших магнитных свойств они обладают весьма большим удельным электрическим сопротивлением. Ферриты относятся к группе полупроводников и обладают сопротивлением $\rho=10^4$ - 10^9 Ом·см, тогда как ферромагнитные металлические материалы имеют $\rho=10^{-5}$ - 10^{-4} Ом·см. Сопротивления ферритов больше сопротивления металлических ферромагнетиков в 10^8 - 10^{14} раз, поэтому у ферритов потери на вихревые токи в переменных магнитных полях очень малы.

Это составляет одно из важнейших преимуществ ферритов.

3.4. Магнитно-твердые материалы

Магнитно-твердые материалы (МТМ), магнитно-жесткие (высококоэрцитивные) материалы, магнитные материалы, которые намагничиваются до насыщения и перемагничиваются в сравнительно сильных магнитных полях напряженностью в тысячи и десятки тысяч а/м.

После намагничивания МТМ остаются магнитами постоянными из-за высоких значений остаточной индукции B_r и коэрцитивной силы H_c .

Из МТМ наибольшее значение в технике приобрели: литые и порошковые (недеформируемые) магнитные материалы типа $Fe-Al-Ni-Co$; деформируемые сплавы типа $Fe-Co-Mo$, $Fe-Co-V$, $Pt-Co$; ферриты (гексаферриты и кобальтовый феррит). В качестве МТМ используются также соединения редкоземельных элементов (особенно легких) с кобальтом; магнитопласты и магнитоэласты из порошков ални, альнико, ферритов со связкой из пластмасс и резины, материалы из порошков Fe , $Fe-Co$, $Mn-Bi$, $SmCo_5$ (табл. 7).

Например, гибкий магнитный винил (другое название магнитная резина) изготавливается путем смешивания порошков феррита с синтезированной резиной или пластиком.

Т а б л и ц а 7

Основные характеристики магнитно-твердых материалов

Марка материала	Основной состав, % (по массе)	$B_r \cdot 10^{-3}$, Гс	H_c , э	$(BH)_{max}$, МГс·э
У13	1,3 C, ост. Fe	8	60	0,22
Е7В6	0,7C, 0,4Cr, 5,7W, 0,4Si, ост. Fe	10,4	68	0,36
ЕХ9К15М	1C, 9Cr, 15Co, 1,5Mo, ост. Fe	8,2	160	0,55
12КМВ12 (комол)	12Co, 6Mo, 12W, ост. Fe	10,5	250	1,1
ЮНД4 (ални)	25Ni, 12Al, 4Cu, ост. Fe	6,1	500	0,9
ЮНДК24 (магнито)	14Ni, 8Al, 24Co, 3Cu, ост. Fe	12,3	600	4
ЮНДК35Т5ВА (тиконал)	14Ni, 8Al, 35Co, 3Cu, 5Ti, Nb<1	10	1500	10
ПлК 76 (платинакс)	76Pt, ост. Co	7,9	4000	12
52КФ (викаллой)	52Co, 13V, ост. Fe	6	500	-
2ФК (Co феррит)	CoO·Fe ₂ O ₃	3	1800	2
1БИ (Ba феррит)	BaO·6Fe ₂ O ₃ (изотропный)	2	1700	1
3БА (Ba феррит)	BaO·6Fe ₂ O ₃ (анизотропный)	3,7	2000	3,2
3СА (Sr феррит)	SrO·6Fe ₂ O ₃ (анизотропный)	3,6	3200	3
Co ₅ Sm	Co ₅ Sm (анизотропный)	9,4	BH _c =8500	21

Магнитотвердые ферриты применяются для работы в условиях рассеянных магнитных полей и в СВЧ-диапазоне.

4. ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ

4.1. Газообразные диэлектрики

К газообразным диэлектрикам относятся все газы, в том числе воздух, представляющий собой смесь нескольких газов и паров воды. Многие газы (воздух, азот и др.) используют в качестве диэлектриков в газонаполненных конденсаторах, воздушных выключателях высокого напряжения и в других электрических устройствах (табл. 8).

Таблица 8

Газообразные диэлектрики

Наименование газа	Плотность, г/см ³	Диэлектрическая проницаемость	Электрическая прочность, кВ/мм	Коэффициент теплопроводности	Теплоемкость	Коэффициент теплопередачи от твердого тела к газу
Воздух	1,0	1,00057	3,0	1,0	1,0	1,0
Азот	0,97	1,00058	3,0	1,08	1,05	1,03
Водород	0,69	1,00026	1,8	6,69	14,35	1,51
Углекислый газ	1,529	1,00098	2,7	0,64	0,85	1,13
Элегаз	5,03	1,00191	7,2	1,25	0,60	-
Фреон	4,262	-	7,8	-	-	-

4.2. Жидкие диэлектрики

В электротехнических устройствах применяют **электроизоляционные минеральные масла и синтетические жидкие диэлектрики: совол и кремний-органические жидкости**. Наибольшее применение имеют минеральные нефтяные масла. По характеру использования в качестве жидких диэлектриков они подразделяются на три группы: - **масла для силовых трансформаторов** и высоковольтных выключателей; - **кабельные масла**, используемые для пропитки бумажной изоляции высоковольтных кабелей; - **конденсаторные масла**, применяемые для пропитки бумажной изоляции конденсаторов. Для этой же цели в бумажно-масляных конденсаторах используют **искусственную жидкость – совол**.

Основные характеристики электроизоляционных жидкостей

Характеристики	Минеральные масла		Совол	«Калория-2»	Октол
	трансформаторное	конденсаторное			
Плотность, г/см ³	0,84-0,89	0,85-0,92	1,50-1,56	0,98-0,99	0,85
Кислотное число, мг КОН/г масла	0,03-0,05	0,015-1,020	0,01-0,02	0,06-0,07	0,03
Температура застывания, °С (не выше)	-45	-45	-8	-60	-15
Температура вспышки паров, °С (не ниже)	135	135	200-230	145	165
Вязкость при 20 °С, сст	28-30	30-32	200	-	-
Вязкость при 50 °С, сст	9,0-9,6	8,5-9,0	9	-	410-460
Удельное объемное сопротивление при 20 °С, Ом·см	10 ¹⁴ -10 ¹⁵	10 ¹⁴ -10 ¹⁶	10 ¹⁴ -10 ¹⁵	10 ¹³ -10 ¹⁵	10 ¹³ -10 ¹⁴
Диэлектрическая проницаемость при 20 °С	2,1-2,4	2,1-2,3	5,0-5,2	2,6-2,8	2,2-2,4
Тангенс угла диэлектрических потерь при 20 °С	0,0006-0,001	0,0003-0,0006	0,002-0,004	0,0003-0,0005	0,005
Электрическая прочность при 20 °С	15-20	20-25	14-18	18-20	12-15

В табл. 9 приведены основные характеристики широко применяемых электроизоляционных жидкостей.

4.3. Полимерные диэлектрики

К полимеризационным диэлектрикам, широко применяемым в электротехнике, относятся *полистирол, полиэтилен, поливинилхлорид и др.* Они обладают высокими электроизоляционными свойствами и стойки к воде, кислотам и щелочам.

Чаще всего изделия из гранулированного **полистирола** изготавливают методом литья под давлением в разъемные металлические формы при температуре 120 °С. Из порошкообразного полистирола изделия изготавливают методом горячего прессования в стальных пресс-формах.

Полистирол – термопластичный диэлектрик, размягчающийся при 120 °С. При 300 °С полистирол деполимеризуется, т. е. снова переходит в исходное вещество – стирол.

Полистирол растворяется в неполярных растворителях: бензоле, толуоле, ксилоле, четыреххлористом углероде и в некоторых других растворителях.

Из полистирола изготавливают каркасы катушек, изоляционные панели, основания и изоляторы для электроизмерительных приборов. На основе полистирола изготавливают также электроизоляционные лаки.

Электроизоляционные свойства и стойкость к воде у **полиэтилена** находятся на таком же высоком уровне, как и у полистирола. В отличие от полистирола полиэтилен обладает гибкостью, что позволяет применять его в качестве основной изоляции высокочастотных кабелей, а также в качестве защитных шлангов.

Полиэтилен – термопластичный материал. Из него изделия получают методом литья под давлением, горячим прессованием и методом экструзии (горячее непрерывное выдавливание).

Поливинилхлорид (полихлорвинил, ПВХ) представляет собой порошок белого цвета, из которого получают горячим прессованием или горячим выдавливанием прочные изделия (листы, трубы и др.), стойкие к минеральным маслам, многим растворителям, щелочам и кислотам.

В отличие от полистирола и полиэтилена поливинилхлорид (полихлорвинил) является материалом негорючим.

Горячим выдавливанием из поливинилхлорида получают твердый материал – **винипласт** в виде листов, пластин, труб и стержней. Все винипластовые изделия имеют светло-коричневый цвет. Они отличаются химической стойкостью к минеральным маслам, щелочам, многим кислотам и растворителям. Винипластовые изделия обладают высокой механической прочностью, особенно при ударных нагрузках, и обладают хорошими электроизоляционными свойствами.

Винипласт – термопластичный материал. Он легко формируется в металлических формах при температуре 160 °С. Изделия из винипласта поддаются всем видам механической обработки (обточка, фрезерование и др.), а также легко свариваются. Из поливинилхлорида изготавливают баки для аккумуляторов и различные электроизоляционные детали (панели и проч.), стойкие к ударным нагрузкам.

Органическое стекло (полиметилметакрилат) представляет собой высокополимерный, термопластичный материал. Это прозрачная синтетическая смола, легко окрашиваемая во многие цвета. Он растворяется в ароматических углеводородах (бензоле, толуоле, ксилоле), в хлорированных углеводородах.

Органическое стекло поддается всем видам механической обработки. Детали из органического стекла легко склеиваются дихлорэтановым клеем. Этот клей получается растворением стружки органического стекла в дихлорэтаноле (5г стружки на 100 г дихлорэтанола).

4.4. Поликонденсационные органические диэлектрики

Из поликонденсационных органических диэлектриков в электротехнике получили наибольшее применение **резольные, новолачные, полиэфирные и эпоксидные смолы.**

Резольные смолы являются термореактивными веществами, которые в своей конечной стадии не размягчаются при нагревании. Из резольных смол наибольшее применение в электротехнике имеет **бакелитовая смола (бакелит)**.

Охлажденная (до комнатной температуры) бакелитовая смола представляет собой твердое хрупкое вещество коричневого цвета. Бакелитовую смолу используют еще для получения бакелитовых лаков. Спиртовыми бакелитовыми лаками и жидкими смолами пропитывают волокнистые основы (бумага, ткани), применяемые для производства **слоистых электроизоляционных материалов – гетинакса, текстолита и стеклотекстолита**.

Резольные смолы обладают стойкостью к минеральным маслам и к воде, но они нестойки к электрическим искрам. Поэтому изделия, выполненные на основе резольных смол, не рекомендуется применять там, где возможно образование электрически искр.

Эпоксидные смолы, применяемые в электротехнике, представляют собой сиропообразные жидкости желтой или коричневой окраски.

Жидкие эпоксидные смолы нашли широкое применение в электротехнике как основы электроизоляционных заливочных компаундов, а также клеящих и покровных лаков. Достоинством эпоксидных компаундов (заливочные составы для герметизации обмоток и других частей электрических аппаратов) является очень малая объемная усадка (0,5-1,0 %) при их отверждении. Кроме того, затвердевшие эпоксидные смолы обладают большой механической прочностью и стойкостью к воде и растворителям.

Применение **нагревостойких высокополимерных кремнийорганических диэлектриков** в изоляции электрических машин и аппаратов позволяет повысить их температуру нагрева и делает возможным увеличение мощности машин и аппаратов без изменения их веса и габаритов.

Отличительной особенностью кремнийорганических диэлектриков является их высокая нагревостойкость и морозостойкость. Кремнийорганические электроизоляционные материалы (пластмассы, резины, лаки и др.) могут длительно работать в интервале температур от -60 до $+180$ °С, а некоторые из них от -70 до $+200$ °С и выше. Кроме того, кремнийорганические диэлектрики отличаются высокой стойкостью к воде, минеральным маслам, а также к электрическим искровым разрядам.

Фторопласт-4. Это негорючий (**термопластичный**), жирный на ощупь материал белого цвета, из которого прессованием (в стальных пресс-формах) получают заготовки в виде брусков, пластин и других изделий. Чтобы образовался плотный, монолитный материал, отпрессованные заготовки подвергают спеканию в печах. При быстром охлаждении нагретых до 370 °С заготовок и изделий материал имеет аморфное строение, а при медленном охлаждении материал приобретает кристаллическое строение. Аморфная часть у этих изделий составляет 15-20 %. Быстро охлаж-

денные (закаленные) изделия из фторопласта-4 обладают повышенной механической прочностью и большей пластичностью. У изделий, имеющих кристаллическую структуру, наблюдается большая стабильность электроизоляционных свойств. Кроме того, кристаллическая структура фторопласта-4 обеспечивает ему повышенную твердость и меньшую пластичность.

Основной особенностью фторопласта-4 является его исключительно высокая нагревостойкость (250 °С) и морозостойкость (-269 °С). При нагреве фторопласта-4 до 327 °С (точка перехода) его кристаллическая структура переходит в аморфную и материал приобретает прозрачность. При нагреве до температур выше 327 °С материал не размягчается вплоть до температуры 400 °С, когда начинается термическое разложение материала с отщеплением свободного фтора, являющегося токсичным веществом.

Новолачные смолы (новолаки), как и резольные, получают в результате реакции поликонденсации между фенолом и формальдегидом, но при недостатке формальдегида. **Новолачные смолы являются термопластичными веществами.**

Новолачная смола светло-коричневого цвета представляет собой твердое хрупкое вещество, растворяющееся в этиловом спирте и ацетоне. Электроизоляционные свойства новолачных смол ниже, чем у резольных смол. Они сохраняют плавкость и растворимость при длительном хранении и даже при нагревании до 200 °С.

При введении в порошкообразную новолачную смолу 12-15 % уротропина (порошок белого цвета), а также с красителей и наполнителей (древесная мука и др.) получают смеси, из которых прессуют (при 150-180 °С) пластмассовые детали для электрических аппаратов низкого напряжения (основания и крышки выключателей, патронов), а также конструкционные детали (кнопки, рукоятки и др.).

4.5. Пленочные электроизоляционные материалы

Пленочные электроизоляционные материалы представляют собой гибкие пленки и ленты, получаемые из синтетических высокополимерных диэлектриков: полистирола, полиэтилена, фторопласта-4 и др.

Полистирольные пленки получают методом выдавливания размягченного (при 140-160 °С) полистирола через узкую щель – фильеру в металлической плашке.

Недостатком полистирольных пленок является сравнительно невысокая температура их размягчения и низкая механическая прочность при надрыве.

Полистирольные пленки и ленты применяют для изоляции жил высокочастотных кабелей, а также в производстве полистирольных конденсаторов низкого и высокого напряжения.

Полиэтиленовые пленки получают способом выдавливания размягченного полиэтилена.

Полиэтиленовые пленки применяют для изоляции жил высокочастотных кабелей, а также в качестве электроизоляционных прокладок.

Пленки из фторопласта-4 получают посредством обточки (на токарном станке) вращающейся фторопластовой болванки цилиндрической формы.

Лавсановые пленки представляют собой прозрачные пленки, получаемые из синтетического высокополимерного материала – лавсана микрористаллической структуры. Пленки получают методом выдавливания.

Пленки из лавсана применяют для пазовой и межвитковой изоляции электрических машин низкого напряжения, а также для звукозаписи. В последнем случае на пленку (с одной стороны) наносят тонкий слой магнитного порошка.

Триацетатцеллюлозные (триацетатные) пленки изготавливают из аморфного прозрачного вещества, получаемого в результате воздействия уксусного ангидрида на растительную клетчатку (целлюлоза).

Триацетатные пленки окрашены в синий цвет и имеют толщину от 0,025 до 0,07 мм. Их применяют в качестве пазовой изоляции в машинах низкого напряжения. Они могут быть длительно использованы при температурах до 120 °С включительно.

Триацетатные пленки, как правило, применяют в композиции с электрокартоном, на который они наклеиваются с помощью масляно-глифталевых или других лаков, придающих гибкость клееному материалу.

Электрокартон, оклеенный с одной или двух сторон триацетатной пленкой, называется пленкоэлектрокартоном. Из пленкоэлектрокартона изготавливается пазовая изоляция электрических машин на напряжения до 500 В.

4.6. Электроизоляционные лаки

Лаки представляют собой коллоидные растворы различных пленкообразующих веществ в специально подобранных органических растворителях.

Пленкообразующими называются такие вещества, которые в результате испарения растворителей и процессов отвердевания (полимеризации) способны образовать твердую пленку. К пленкообразующим веществам относятся смолы (природные и синтетические), растительные высыхающие масла, эфиры целлюлозы и др.

В качестве растворителей пленкообразующих веществ применяют легко испаряющиеся (летучие) жидкости: бензол, толуол, спирты, ацетон, скипидар и др.

В состав лака могут еще входить пластификаторы и сиккативы. Пластификаторы – вещества, придающие лаковой пленке эластичность; к ним относятся касторовое масло, жирные кислоты льняного масла и другие маслообразные жидкости.

Сиккативы представляют собой жидкие или твердые вещества, вводимые в некоторые лаки (масляные и др.), чтобы ускорить их высыхание.

При сушке слоя лака, нанесенного на какую-либо поверхность, содержащиеся в нем органические растворители улетучиваются (испаряются), а пленкообразующие вещества в результате процессов полимеризации образуют твердую лаковую пленку. Эта пленка может быть гибкой (эластичной) или негибкой и хрупкой в зависимости от свойств пленкообразующих веществ, составляющих лаковую основу.

По своему назначению электроизоляционные лаки делятся на *пропиточные, покровные и клеящие*.

Пропиточные лаки применяют для пропитки обмоток в электрических машинах и аппаратах с целью цементации (соединения) витков обмотки друг с другом, а также с целью устранения пористости в изоляции обмотки.

Покровные лаки применяют для создания на поверхности уже пропитанных обмоток влагостойких или маслостойких лаковых покрытий. К покровным также относятся лаки, применяемые для изоляции листов электротехнической стали в магнитопроводах.

Клеящие лаки применяют для склеивания различных электроизоляционных материалов: листочков слюды (в производстве слоистой слюдяной изоляции), керамики, пластмасс и др. Основное, требование, предъявляемое к клеящим лакам, состоит в том, чтобы эти лаки обладали хорошим прилипанием (адгезией) и образовывали бы прочный шов.

По лаковой основе лаки делятся на **смоляные, масляные, масляно-битумные и эфироцеллюлозные**.

Смоляные лаки представляют собой растворы природных или синтетических смол в органических растворителях. К смоляным лакам относятся глифталевые, бакелитовые, кремнийорганические и др. В зависимости от основы смоляные лаки могут быть **термопластичными** (полихлорвиниловые, масляно-битумные и др.) и **термореактивными** (глифталевые, бакелитовые, масляные и др.).

Масляные лаки представляют собой растворы растительных (высыхающих) масел (тунговое, льняное) в органических растворителях. Область применения масляных лаков в электротехнике весьма ограничена по сравнению со смоляными лаками.

Масляно-битумные лаки представляют собой растворы масляно-битумных смесей в органических растворителях (скипидар, толуол, ксилол и др.). Для этого применяют битумы нефтяные и природные (асфальты) и льняное масло. Они обладают хорошими электроизоляционными свойствами, отличаются эластичностью и водостойкостью. Пленки масляно-битумных лаков термопластичны и легко растворяются в минеральных маслах и в ряде растворителей, что является их недостатком.

Эфиоцеллюлозные лаки представляют собой растворы эфиров целлюлозы (нитроцеллюлоза, ацетил целлюлоза и др.) в смеси растворителей (амилацетат, ацетон, спирты и др.). Пленки обладают стойкостью к минеральным маслам, бензину и озону. Но область применения их в электротехнике относительно невелика.

4.7. Компаунды

Компаунды – это электроизоляционные составы, изготавливаемые из нескольких исходных веществ. В момент применения компаунды представляют собой жидкости, которые постепенно отвердевают.

В отличие от лаков и эмалей компаунды не содержат летучих растворителей. Это обеспечивает монолитность компаунда после его отвердевания. Согласно своему назначению компаунды разделяются на пропиточные, заливочные и обмазочные. Пропиточные компаунды применяют для пропитки обмоток электрических машин и аппаратов с целью цементации витков обмотки и защиты их от влаги. Заливочные компаунды применяются для заливки полостей (свободных пространств) в кабельных муфтах и воронках, а также в корпусах электрических аппаратов – трансформаторов тока, дросселей и т. п. Обмазочные компаунды применяются для обмазки лобовых частей обмоток электрических машин с целью защиты их от влаги, масла и др.

Компаунды могут быть терморезистивными материалами, не способными размягчаться после своего отвердевания, или термопластичными, могущими размягчаться при последующем нагреве. К термопластичным относятся компаунды на основе битумов, воскообразных диэлектриков (парафин, церезин и др.) и термопластичных полимеров (полистирол и др.). К терморезистивным относятся компаунды на основе эпоксидных, полиэфирных и других синтетических смол.

Широкое применение в электротехнике получили термопластичные компаунды на основе битумов, так как последние являются дешевыми материалами, стойкими к воде, и обладают хорошими электроизоляционными свойствами.

Одной из главных характеристик компаундов является их объемная усадка – сокращение объема компаунда после его отвердевания

Для пропитки обмоток электрических машин широко применяется битумный пропиточный компаунд № 225, который получают в результате сплавления битума, канифоли и обезвоженного льняного масла. В твердом состоянии компаунд № 225 представляет собой массу черного цвета с блестящей поверхностью.

Для пропитки обмоток компаунд нагревается до 160-170 °С. При этой температуре он переходит в жидкое состояние и тогда частицы его становятся способными проникать внутрь пропитываемой обмотки. Пропитка обмоток жидкими битумными компаундами производится в специальных пропиточных котлах, закрываемых герметически. Обмотки, помещенные в герметически закрытые котлы, вначале подвергаются длительной сушке под вакуумом и без вакуума при температуре 105-180 °С. Затем в пропиточный котел впускается разогретый жидкий компаунд, после этого давление в котле повышают до 6-8 атм. Под воздействием давления жидкий компаунд проникает в поры изоляции обмоток и одновременно опрессовывает их. Для различных обмоток разрабатываются разные режимы пропитки.

Битумы являются термопластичными материалами, поэтому их применяют только для пропитки неподвижных обмоток. Из вращающихся обмоток (при перегреве их) компаунд будет вытекать под действием центробежных сил. Компаундами также нельзя пропитывать обмотки, работающие в трансформаторном масле или подвергающиеся воздействию бензина, так как битумы растворяются в минеральных маслах и в углеводородах (бензин, бензол и др.).

Из заливочных компаундов наиболее широкое применение получили компаунды МБ-70, МБ-90, МБМ-1 и МБМ-2. Первые два компаунда изготавливают на основе нефтяных битумов БН-Ш, БН-IV и БН-V, взятых в разных соотношениях. В компаунды МБМ-1 и МБМ-2 для повышения морозостойкости вводится трансформаторное масло (пластификатор). Перечисленные компаунды применяют для заливки полостей в кабельных соединительных муфтах и концевых воронках напряжением до 10 кВ.

5. РЕЗИНОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Резины представляют собой продукт вулканизации каучука в смеси с добавками и наполнителями. Под вулканизацией понимают процесс сшивки макромолекул каучука в пространственно-сетчатую структуру с целью получения высокоэластичного материала. **Основой резины является каучук натуральный (НК) или синтетический (СК).** Подавляющее большинство резиновых материалов производится на основе синтетических каучуков (известно около 250 видов). Наиболее важное практическое применение имеют каучуки *бутадиеновые, бутадиенстирольные, бутадиеннитрильные, хлоропреновые, бутиловые, этиленпропиленовые, кремнийорганические, полиуретановые и др.*

Помимо каучуковой основы в состав вулканизируемой смеси входят следующие ингредиенты.

Вулканизирующие вещества (агенты). Для большинства каучуков вулканизирующим агентом номер один является сера, сшивающая макромолекулы каучука за счет образования поперечных связей между ними. При небольших добавках серы (массовая доля до 5 %) образуется **редкосетчатый полимер**, обладающий высокой пластичностью. По мере увеличения содержания серы твердость полимера возрастает и **при массовой доле серы свыше 30 %** образуется твердый материал – **эбонит**. Кроме серы в качестве вулканизирующих агентов могут использоваться селен, оксиды некоторых металлов и другие вещества.

Наполнители вводят для улучшения механических свойств (сажа, оксид цинка) и снижения стоимости (мел, барит, тальк) резины. Иногда в качестве наполнителей используются измельченные производственные отходы резины и старые резиновые изделия.

Антиоксиданты (противостарители) замедляют процесс старения резины в результате окисления. К ним относятся альдоль и неозон Д.

Мягчители (пластификаторы) составляют 8...30 % от массы каучуковой основы. Мягчителями служат вазелин, парафин, растительные масла, битумы и другие вещества.

Резиновые смеси перед вулканизацией подвергают специальной механической или термической обработке с целью их пластификации. Сам процесс вулканизации проводят при температуре 140...180 °С с использованием различного технологического оборудования.

6. КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Работоспособность динамических конструкций (аэрокосмические, энергетические, строительные и др.) может быть повышена за счет использования конструкционных материалов, обладающих уникальными свойствами. Такими материалами являются *композиционные материалы (композиты)*, которые состоят из двух и более разнородных по химическому составу и структуре компонентов, определенным образом распределенных по объему детали (изделия). Это дает возможность конструировать материалы с заданными свойствами.

По прочности, сопротивлению тепловому воздействию и особенно по надежности композиционные материалы превосходят любой из своих компонентов в отдельности (табл. 10). Они обладают свойствами, не присущими индивидуальным компонентам. Композиционные материалы имеют более высокие значения временного сопротивления и предела выносливости (на 50-100% больше, чем у обычных сплавов); у них более высокий модуль упругости и удельная прочность; они обладают пониженной склонностью к трещинообразованию. Применение композиционных материалов повышает жесткость конструкций при одновременном снижении их материалоемкости.

Таблица 10

Значения механических свойств волокнистых композитов

Композиция	Временное сопротивление, МПа	Предел выносливости, МПа	Модуль упругости, МПа
Магний-бор (ВКМ-1)	1300	500	220
Алюминий-углерод (ВКУ1)	900	300	220
Алюминий-сталь (КАС-1А)	1700	350	110

Для композиционных конструкционных материалов характерно то, что состав, форма и свойства компонентов материала определены заранее, а компоненты присутствуют в количествах, обеспечивающих заданные свойства материала.

Все композиционные материалы состоят из матрицы и наполнителей.

Матрицей называют компонент, который связывает разнородные материалы, позволяет изготовить изделие необходимой формы, воспринимает и перераспределяет нагрузки на наполнитель от внешних нагрузок,

прикладываемых к несущему упрочняющему компоненту. Прочностные характеристики материала матрицы являются определяющими при сдвиговых нагрузках, при нагружении композита в направлениях, отличных от ориентации волокон, а также при циклическом нагружении. Поэтому материал матрицы должен быть пластичным и обладать высокой прочностью контактного взаимодействия (адгезионной прочностью) с поверхностью наполнителя.

Материал матрицы определяет также уровень рабочих температур системы, работоспособность во влажной среде, облучениях и при других воздействиях внешней среды. От матрицы зависят и теплофизические, электрические и другие свойства композита.

Композиционные материалы разрабатываются с **металлической или неметаллической матрицей.**

В качестве металлической матрицы используют алюминий, магний, медь, железо, никель, кобальт, титан и различные сплавы. Неметаллические матрицы – полимерные (эпоксидные, фенолформальдегидные и полиамидные), углеродные и керамические материалы, глины.

Наполнители, распределенные в связующем, оказывают определяющее влияние на свойства композита. Они являются разделенным компонентом и играют усиливающую или армирующую роль.

В качестве наполнителя, как правило, используют более прочное вещество: металлы компактные, порошковые и чешуйчатые, ткани из различных материалов, картон, бумага, древесная мука, волокна асбеста, очесы хлопка и льна, солома, графит, тальк, технический углерод, силикаты, кварц, стекло, полимеры, нитевидные кристаллы и усы. Наполнитель может быть порошковым, волокнистым, пластинчатым.

Композиционные материалы можно классифицировать следующим образом:

1. По составу матриц и наполнителей.

На практике широко используются **полиматричные композиты** с комбинированными матрицами, состоящими из чередующихся слоев (двух или более) различного химического состава (рис. 3а) и **полиармированные композиты** с несколькими типами наполнителей, которые дополняют свойства друг друга (рис. 3б).

2. По форме наполнителей.

Свойства композиционного материала существенно зависят от формы наполнителя. Наполнители разделяют на три основные группы: - **нульмерные** (рис. 4а), с помощью которых получают **дисперсно-упрочненные** композиты; - **одномерные** (рис. 4б), которые используют для создания **волокнистых композитов**; - **двумерные** (рис. 4в, г, д), используемые при получении **слоистых композитов**.

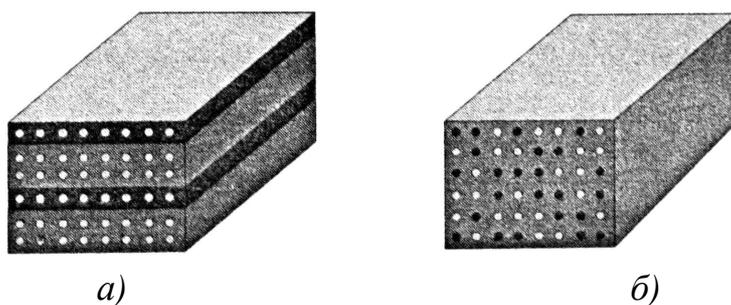


Рис. 3. Структурные схемы композитов: *а* – полиматричных; *б* – полиармированных

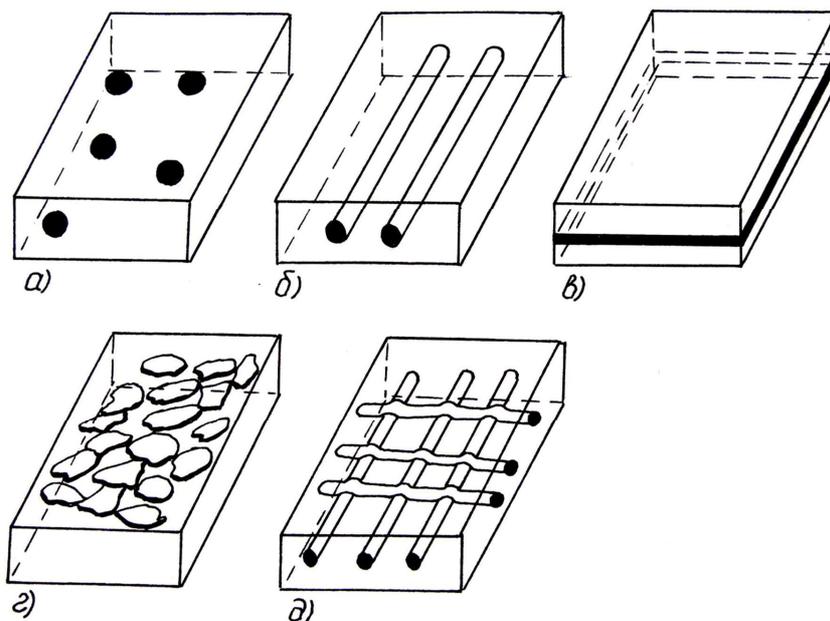


Рис. 4. Классификация наполнителей по форме: *а* – нуль-мерные; *б* – одномерные; *в, г, д* – двумерные

3. По схеме армирования.

Композиционные материалы могут армироваться:

- **нуль - мерными наполнителями** (армирование древесной мукой, графитом, слюдой, гравием, асбестом и др.);
- **нуль - и одномерными наполнителями** одновременно (хаотичное армирование, например, железобетона);
- **одномерными наполнителями** (одномерное армирование, например, непрерывными или прерывистыми борными, стеклянными или углеродными волокнами лент, пластин, листов);
- **двумерными наполнителями** (армирование волокнами, которые образуют чередующиеся перпендикулярные слои; использование тканевых слоев; использование сплошных слоев из бумаги, картона, шпона);
- **пространственными наполнителями** (армирование однонаправленными непрерывными волокнами, образующими пространственно разделенные перпендикулярные слои).

4. По структуре системы «матрица – наполнитель».

Применяются различные сочетания матриц и наполнителя:

- **неметаллическая матрица – неметаллический наполнитель** (бетон, состоящий из цементного раствора и смеси песка и щебня; пластмасса, упроченная нитевидными кристаллами из Al_2O_3 , BeO , B_4C , SiC , Si_2N_4 , углерода; гетинакс; текстолит и др.);

- **неметаллическая матрица – металлический наполнитель** (железобетон; пластики, армированные волокнами или чешуйками из металлов и др.);

- **металлическая матрица – неметаллический наполнитель** (антифрикционные и фрикционные материалы на основе бронз или железа с добавками определенных веществ (графит, дисульфид молибдена, сера); композиты с керамическими наполнителями (карбиды, оксиды, нитриды, бориды);

- **металлическая матрица – металлический наполнитель** (двух- и многослойные плакированные листы; металлы, армированные волокнами или тонкодисперсными тугоплавкими частицами, не растворяющимися в основном металле (алюминий, титан, магний, никель или сплавы на их основе).

Библиографический список

1. Колесов, С.Н. *Материаловедение и технология конструкционных материалов: Учеб. для вузов.* / С.Н. Колесов, И.С. Колесов. – М.: Высшая школа, 2004. – 519 с.
2. Бородулин, В.Н. *Проводниковые, полупроводниковые материалы: Конспект лекций по курсу «Электротехническое материаловедение».* – М.: Издательство МЭИ, 1994. – 63 с.
3. Богородский, Н.П. *Электротехнические материалы.* / Н.П. Богородский, В.В. Пасынков, Б.М. Тареев. – Л.: Энергоатомиздат, 1985. – 304 с.
4. Пасынков, В.В. *Материалы электронной техники.* / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – М.: Высшая школа, 1986. – 367 с.
5. Штофа, Я. *Электротехнические материалы в вопросах и ответах.* М.: Энергоатомиздат, 1984. – 199 с.
6. *Конструкционные и электротехнические материалы.* / В. Н. Бородулин, А.С. Воробьев, В.А. Филиков и др.; Под ред. В.А. Филикова. М.: Высшая школа, 1990. – 296 с.
7. Матвеев, А.Н. *Электричество и магнетизм.* – М.: Высшая школа, 1983. – 463 с.
8. *Справочник по электротехническим материалам. Т3.* Под ред. Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева. – Изд 3-е. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 728 с.
9. Мишин, Д.Д. *Магнитные материалы.* – 2-е изд. М.: Высшая школа, 1991. – 383 с.
10. *Технология автомобилестроения: Учебник для вузов* / Бузник Е.Н., Карунин А.Л., Дашенко О.А. и др. / Под ред. А.И. Дашенко. М.: Академический Проект: Трикта, 2005. – 624 с.

Учебное издание

Владислав Викторович Евстифеев, Михаил Сергеевич Корытов

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ, ПЛАСТМАССЫ,
РЕЗИНЫ, КОМПОЗИТЫ

Учебное пособие

Подписано к печати __.__.2009
Формат 60 × 90 1/16. Бумага писчая
Оперативный способ печати
Гарнитура Times New Roman
Усл. п. л. 2,25, уч.-изд. л. 2,25
Тираж 150 экз. Заказ №
Цена договорная

Отпечатано в ПО УМУ СибАДИ
644080, г. Омск, пр. Мира, 5