

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

А. К. Пронина

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ

Методические указания

к выполнению практических работ по дисциплине
для студентов специальности
26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования
и средств автоматики»
очной и заочной форм обучения

Севастополь
СевГУ
2024

УДК 621.31(07)
ББК 31.21я73
П81

Р е ц е н з е н т :

С.А. Конева – канд. техн. наук, доцент,
доцент кафедры «Судовое электрооборудование»

Пронина, А.К.

П81 Электротехнические материалы и технологии: методические указания к выполнению практических работ по дисциплине для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» очной и заочной форм обучения / А.К. Пронина; Севастопольский государственный университет, Морской институт. – Севастополь: СевГУ, 2024. – 47 с. – Текст : электронный.

Методические указания предназначены для студентов очной и заочной форм обучения Севастопольского государственного университета, Морского института, специальности 26.05.07 - Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики, выполняющих практические работы по дисциплине «Электротехнические материалы и технологии».

УДК 621.31(07)
ББК 31.21я73

Рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании кафедры «Судовое электрооборудование» Морского института ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет», протокол № 7 от 29 февраля 2024 г.

© Пронина А.К., 2024
© ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Практическое занятие № 1. ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	4
Практическое задание № 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПРОВОДНИКЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ.....	14
Практическое занятие № 3. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ДИЭЛЕКТРИКЕ	19
Практическое занятие № 4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	22
Практическое задание № 5. РАСШИФРОВКА ОБОЗНАЧЕНИЯ МАРОК СПЛАВОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ	27
Практическое занятие № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ	32
Практическое задание № 7. ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ	39

Практическое занятие № 1

ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ ПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: Изучить классификацию проводниковых материалов, знать свойства проводников, знать состав и свойства материалов высокой проводимости и материалов с высоким удельным сопротивлением, а также дать определение сверхпроводникам и криопроводникам. Произвести расчет основных параметров некоторых представителей проводниковых материалов. Ответить письменно на контрольные вопросы по изучаемому материалу.

1. Классификация проводниковых материалов

В качестве проводника электрического тока могут быть использованы как твердые тела, так и жидкости, а при соответствующих условиях и газы. Важнейшими практически применяемыми в электротехнике твердыми проводниковыми материалами являются металлы и их сплавы.

Из металлических проводниковых материалов могут быть выделены металлы высокой проводимости, имеющие удельное сопротивление ρ при нормальной температуре не более 0,05 мкОм·м, и сплавы высокого сопротивления, имеющие удельное сопротивление ρ при нормальной температуре не менее 0,3 мкОм·м.

Металлы высокой проводимости используют для проводов, токопроводящих жил кабелей, обмоток электрических машин и трансформаторов. Металлы и сплавы высокого сопротивления применяются для изготовления резисторов, электронагревательных приборов, нитей ламп накаливания и т.п.

К жидким проводникам относятся расплавленные металлы и различные электролиты. Для большинства металлов температура плавления высока, только ртуть, имеющая температуру плавления около минус 30 °С, может быть использована в качестве жидкого металлического проводника при нормальной температуре. Другие металлы являются жидкими при повышенных температурах.

2. Свойства проводников

К важнейшим параметрам, характеризующим свойства проводниковых материалов относят:

- удельная проводимость γ и удельное сопротивление ρ ,
- температурный коэффициент удельного сопротивления $TK\rho$ или $\alpha\rho$,
- коэффициент теплопроводности γ_m ,
- контактная разность потенциалов и термоэлектродвижущая сила (термоЭДС),
- работа выхода электронов из металла,
- предел прочности при растяжении σ_r и относительное удлинение перед разрывом $\Delta l/l$.

Удельная проводимость и удельное сопротивление проводников: Связь плотности тока I (в амперах на квадратный метр) и напряженности

электрического поля E (в вольтах на метр) в проводнике дается известной формулой $I = \gamma E$ (дифференциальная форма закона Ома), где γ (в сименсах на метр) – параметр проводникового материала, называемый его удельной проводимостью; в соответствии с законом Ома γ металлических проводников не зависит от напряженности электрического поля E при изменении последней в широких пределах.

Удельное сопротивление $\rho = \frac{1}{\gamma}$ для имеющего сопротивление R проводника длиной l с поперечным сечением s вычисляется по формуле

$$\rho = \frac{R \cdot s}{l} \quad (\text{Ом} \cdot \text{метр}). \quad (1.1)$$

Для измерения ρ проводниковых материалов разрешается пользоваться внесистемной единицей $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$; очевидно, что проволока из материала длиной 1 м с поперечным сечением 1 мм^2 имеет сопротивление в Омах, численно равно ρ материала в $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$. Вместо единицы $\text{Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$ предпочтительно применять равную ей по размеру единицу СИ $\text{мкОм} \cdot \text{м}$. Связь между названными единицами удельного сопротивления: $1 \text{ Ом} \cdot \text{м} = 10^6 \text{ мкОм} \cdot \text{м} = 10^6 \text{ Ом} \cdot \text{мм}^2/\text{м}$.

Диапазон изменений удельного сопротивления ρ металлических проводников (при нормальной температуре) довольно узок: от 0,016 для серебра и до примерно 10 $\text{мкОм} \cdot \text{м}$ для железо-хром-алюминиевых сплавов.

Все чистые металлы с наиболее правильной кристаллической решеткой характеризуются наименьшими значениями удельного сопротивления; примеси, искажая решетку, приводят к увеличению ρ .

Температурный коэффициент удельного сопротивления металлов

С ростом температуры на пути носителей заряда (свободных электронов) появляется больше препятствий, тем самым уменьшается подвижность электронов, и как следствие, уменьшается удельная проводимость металлов и возрастает удельное сопротивление (рис. 1.1).

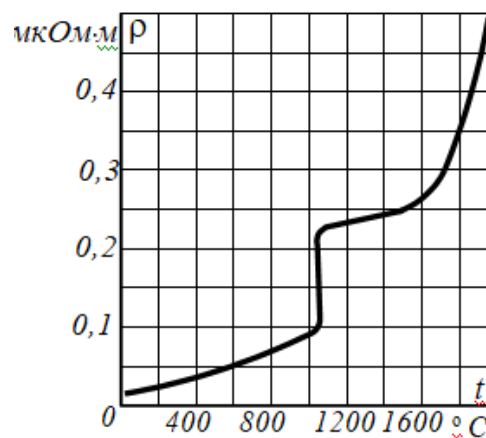


Рисунок 1.1 – Зависимость удельного сопротивления ρ меди от температуры

Температурный коэффициент выражается следующим образом:

$$TK_{\rho} = \alpha_{\rho} \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dl}. \quad (1.2)$$

Согласно выводам электронной теории металлов значения α_{ρ} чистых металлов должны быть близки к температурному коэффициенту расширения идеальных газов, то есть $\frac{1}{237} = 0,0037 K^{-1}$ повышенными значениями α_{ρ} обладают некоторые металлы, в том числе ферромагнитные металлы – железо, никель и кобальт.

При переходе из твердого состояния в жидкое у большинства металлов наблюдается увеличение удельного сопротивления ρ , как это видно из рисунка 1.1, скачок удельного сопротивления соответствует температуре плавления меди.

Примеси и нарушения правильной структуры металлов увеличивают их удельное сопротивление. Значительное возрастание ρ наблюдается при сплавлении двух металлов в том случае, если они образуют друг с другом твердый раствор.

Теплопроводность металлов. За передачу теплоты через металл в основном ответственны свободные электроны, которые определяют и электропроводность металлов. Поэтому коэффициент теплопроводности металлов γ_m намного больше коэффициента теплопроводности диэлектриков. Чистота и характер механической обработки металлов могут заметно влиять на его теплопроводность.

Термоэлектродвижущая сила. При соприкосновении двух различных металлических проводников между ними возникает контактная разность потенциалов. Причина появления этой разности потенциалов заключается в различии значений работы выхода электронов из различных металлов, а также в том что концентрация электронов, а следовательно, и давление электронного газа у различных металлов и сплавов, могут быть неодинаковыми.

Контактная разность потенциалов может явиться причиной электрохимической коррозии (разрушение алюминия в контакте с медью). Значение контактной разности потенциалов максимально при низкой температуре и уменьшается с ростом теплового движения электронов; зависимость контактной ЭДС от температуры используют в термопарах. Термопару спаивают или сваривают из двух различных проводников в двух местах, при этом образуется замкнутая электрическая цепь. Если температура спаев разная, то значения контактной ЭДС тоже разные. Эта разница вызывает ток, называемый термоэлектрическим; если цепь разорвать, то в любом месте мы обнаружим разность потенциалов, которую называют термоэлектродвижущей силой. Термопары широко применяют для измерения температуры.

Для измерения температур применяют следующие сплавы: копель (56 % Cu и 44 % Ni); алюмель (94,5 % Ni, остальное – Al, Si, Mn и Co); хромель (90,5 % Ni и 9,5 % Cr); и прочие. Средние значения термоЭДС (измеряют в мкВ/К).

Таблица 1.1 – Основные характеристики термопар

Термопара	Название	ТермоЭДС, мкВ/К	Диапазон, °С, от до	
Медь-константан	ТМК	~50	200	350
Железо-константан	ТЖК	~60	200	600
Хромель-копель	ТХК	~75	200	600
Хромель-алюмель	ТХА	~40	200	1000

3. Материалы высокой проводимости

К наиболее широко распространенным материалам высокой проводимости следует отнести медь и алюминий.

М е д ь. Преимущества меди, обеспечивающие ей широкое применение в качестве проводникового материала следующие:

- малое удельное сопротивление (из всех материалов только серебро имеет несколько меньшее удельное сопротивление, чем медь);
- высокая механическая прочность;
- удовлетворительная в большинстве случаев стойкость по отношению к коррозии (медь окисляется на воздухе даже в условиях высокой влажности значительно медленнее, чем, например, железо: интенсивное окисление меди происходит только при повышенных температурах);
- хорошая обрабатываемость (медь прокатывается в листы, ленты и протягивается в проволоку, толщина которой может быть доведена до тысячных долей миллиметра); легкость пайки и сборки.

М а р к и м е д и. В качестве проводникового материала используется медь марок М1 и М0. Медь марки М1 содержит 99,9 % *Сu*, а в общем количестве (0,1 %) кислорода должно быть не более 0,08 %. Присутствие в меди кислорода ухудшает ее механические свойства. Лучшими механическими свойствами обладает медь марки М0, в которой содержится не более 0,05 % примесей, в том числе не свыше 0,02 % кислорода. Из меди марки М0 может быть изготовлена тонкая проволока. При холодной протяжке получают твердую (твердотянутую) медь (МТ), которая благодаря влиянию наклепа имеет высокий предел прочности при растяжении и малое относительное удлинение перед разрывом, а также обладает твердостью и упругостью при изгибе: проволока из твердой меди несколько пружинит. Если же медь подвергать отжигу, то есть нагреву до нескольких сот градусов с последующим охлаждением, то получится мягкая (отожженная) медь (ММ), которая сравнительно пластична, имеет малую твердость и небольшую прочность, но весьма большое удлинение перед разрывом, более высокую удельную проводимость. Удельная проводимость меди – параметр весьма чувствительный к наличию примесей. Твердую медь применяют для контактных проводов, для шин распределительных устройств, для коллекторных пластин электрических машин.

Мягкую медь применяют для изготовления токопроводящих жил кабелей и обмоточных проводов.

С п л а в ы м е д и. В отдельных случаях помимо чистой меди в качестве проводникового материала применяются ее сплавы с оловом, кремнием, фосфором, бериллием, хромом, магнием, кадмием - бронзы. Сплав меди с цинком носит название - латунь.

А л ю м и н и й. Алюминий приблизительно в 3,5 раза легче меди. Для электротехнических целей применяют алюминий *Al*, содержащий не более 0,5% примесей. Еще более чистый алюминий марки А800 (не более 0,03% примесей) применяют для изготовления алюминиевой фольги электродов и корпусов оксидных конденсаторов. Алюминий весьма активно окисляется и покрывается тонкой оксидной пленкой с большим электрическим сопротивлением. Эта пленка предохраняет алюминий от дальнейшей коррозии, но создает большое переходное сопротивление в местах контакта алюминиевых проводов и делает невозможным пайку алюминия обычными методами. Для пайки алюминия применяются специальные пасты- припой, или используются ультразвуковые паяльники. Алюминиевые сплавы обладают повышенной механической прочностью. Примером такого сплава является альдрей, содержащий 0,3 - 0,5 % Mg, 0,4 - 0,7 Si и 0,2 - 0,3Fe (остальное Al). Сталеалюминиевый провод, широко применяемый в линиях электропередачи, представляет собой сердечник, свитый из стальных жил и обвитый снаружи алюминиевой проволокой. В проводах такого типа механическая прочность определяется главным образом стальным сердечником, а электрическая проводимость – алюминием.

Сравнительные свойства меди и алюминия приведены в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Физические свойства меди и алюминия

Материал	Сорт	Плотность, г/см ³	Удельное сопротивление при 20°С, Ом·м	Температурный коэффициент сопротивления при 0°С, 1/°С	Коэффициент линейного расширения, 1/°С	Удельная теплоемкость, Дж/кг°С	Удельная теплопроводность, Вт/м°С
Cu	Электролитическая отожженная	8,9	$(17,24 - 17,54) \cdot 10^{-9}$	$\frac{1}{235}$	$1,68 \cdot 10^{-3}$	390	390
Al	Рафинированный	2,6-2,7	$28,2 \cdot 10^{-9}$	$\frac{1}{245}$	$2,3 \cdot 10^{-3}$	940	210

Если сопротивление медной обмотки при температуре θ_x равно r_x , то ее сопротивление при температуре θ_2 :

$$r_2 = \frac{235 + \theta_2}{235 + \theta_x} r_x$$

Зависимость сопротивления меди от температуры используется для определения превышения температуры обмотки электрической машины при ее работе в горячем состоянии θ_1 над температурой окружающей среды θ_0 ($\Delta\theta = \theta_1 - \theta_0$)

$$\Delta\theta = \frac{r_z - r_x}{r_x} (235 + \theta_x) + \theta_x - \theta_0,$$

где r_z – сопротивление обмотки в горячем состоянии;

r_x – сопротивление обмотки, измеренное в холодном состоянии, когда температура обмотки и окружающей среды одинаковые.

θ_x – температура обмотки в холодном состоянии;

θ_0 – температура окружающей среды при работе машины, когда измеряется сопротивление r_x

Для определения параметров алюминиевой обмотки необходимо 235 заменить на 245.

Ж е л е з о (с т а л ь) - наиболее дешевый и доступный металл, обладающий высокой механической прочностью, широко используемый в качестве проводникового материала. Однако, даже чистое железо имеет более высокое, сравнительно с медью и алюминием удельное сопротивление ρ (около 0,1 мкОм·м); значение ρ стали, то есть железа с примесью углерода, еще выше.

При переменном токе в стали, как в ферромагнитном материале, заметно сказывается поверхностный эффект, поэтому активное сопротивление стальных проводников переменному току значительно выше, чем постоянному току. Кроме того, при переменном токе в стальных проводниках появляются потери мощности на гистерезис.

В качестве проводникового материала обычно применяется мягкая сталь с содержанием углерода 0,10 - 0,15 % и имеющая удельную проводимость γ в 6-7 раз меньшую по сравнению с медью. Такую сталь используют в качестве материала для проводов воздушных линий для передачи небольших мощностей.

Обычная сталь обладает малой стойкостью к коррозии: даже при нормальной температуре, особенно в условиях повышенной влажности, она быстро ржавеет: при повышении температуры скорость коррозии резко возрастает. Поэтому поверхность стальных проводов должна быть защищена слоем более стойкого материала. Обычно для этой цели применяют покрытие цинком.

Б и м е т а л л. Для уменьшения расходов цветных металлов в проводниковых конструкциях выгодно применять так называемый проводниковый биметалл. Эта сталь, покрытая снаружи слоем меди, причем оба металла соединены друг с другом прочно и непрерывно по всей поверхности соприкосновения. Для изготовления биметалла применяют два способа:

- *горячий* (стальную болванку ставят в форму, а промежуток между болванкой и стенками формы заливают расплавленной медью: полученную после охлаждения биметаллическую болванку подвергают прокатке и протяжке);

- *холодный* или *электролитический* – медь осаждают электролитически на стальную проволоку, пропускают через ванну с раствором медного купороса).

Холодный способ обеспечивает равномерность толщины медного покрытия, но требует значительного расхода электроэнергии, кроме того, при холодном способе не обеспечивается столь прочное сцепление слоя меди со сталью, как при горячем способе.

Сопротивление 1 км биметаллической проволоки постоянному току (при 20 °С) в зависимости от диаметра от 60 (при 1 мм) до 40 м/км (при 4 мм).

Такую проволоку применяют для линий связи, линий электропередачи и т.п. Из проводникового биметалла изготавливаются шины для распределительных устройств, полосы для рубильников и различные токопроводящие части электрических аппаратов.

4. Материалы высокого сопротивления

Это в основном сплавы. Их классифицируют по условиям применения:

- 1) для точных измерительных приборов и образцовых резисторов;
- 2) для сопротивления различного назначения;
- 3) для приборов с высокой температурой.

Для материалов, которые применяются в производстве точных электроизмерительных приборов и образцовых сопротивлений помимо высокого удельного сопротивления ρ , требуется высокая стабильность ρ во времени, малый температурный коэффициент удельного сопротивления α_ρ и малый коэффициент термоЭДС в паре данного сплава с медью.

Сплавы для электронагревательных приборов должны долго работать на воздухе при высоких температурах (иногда до 1000 °С). Кроме того, во многих случаях требуется изготовление из них гибкой проволоки, иногда весьма тонкой (диаметром порядка сотых долей миллиметра).

М а н г а н и н – наиболее типичный и широко применяемый для изготовления образцовых резисторов сплав. Примесный состав его: *Сu* – 85 %, *Mn* – 12 %, *Ni* – 3 %. Значение ρ манганина 0,42 - 0,48 мкОм·м; α_ρ весьма мал, $(5 - 30) \cdot 10^6 \text{ K}^4$; коэффициент термоЭДС в паре с медью всего лишь 1 - 2 мкВ/К. Манганин может вытягиваться в тонкую (диаметром до 0,02 мм) проволоку. Предельно длительно допустимая рабочая температура сплавов манганина не более 200 °С. Плотность манганина 8,4 Мг/м³.

К о н с т а н т а н – сплав, содержащий около 60 % меди и 40 % никеля. Этот состав отвечает минимуму α_ρ в системе *Сu* – *Ni* при довольно высоком значении ρ . Название «константан» объясняется значительным постоянством ρ при изменении температуры [$\alpha_\rho = -(5 - 25) \cdot 10^6 \text{ K}^4$ при $\rho = 0,48 - 0,52 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$]. По механическим свойствам константан близок к манганину. Его плотность 8,9 Мг/м³. Нагревостойкость константана выше, чем манганина: константан можно применять для изготовления реостатов и электронагревательных элементов, длительно работающих при температуре свыше 450 °С. Существенным отличием константана от манганина является высокая термоЭДС

константана в паре с медью, а также железом. Широкому применению константана препятствует большое содержание в его составе дорогого и дефицитного никеля.

Сплавы на основе железа. Эти сплавы в основном применяются для электронагревательных элементов. Высокая нагревостойкость таких элементов объясняется введением в их состав следующих металлов: никель, хром и алюминий. Сплавы системы $Fe - Ni - Cr$ называются нихромами; сплавы системы $Fe - Cr - Al$ называются фехралями. Нихромы весьма технологичны, их можно легко протягивать в тонкую проволоку, они имеют высокую рабочую температуру. Однако, как и в константане, в этих сплавах велико содержание дорогого и дефицитного компонента - никеля.

Фехраль намного дешевле нихрома, однако, этот сплав менее технологичен, более тверд и хрупок, из него может быть получена проволока большего поперечного сечения, чем из нихрома. Поэтому этот сплав в основном используется для электронагревательных печей большой мощности.

5. Сверхпроводники и криопроводники

При понижении температуры удельное сопротивление ρ металлических проводников уменьшается. Исключительный интерес представляет вопрос об электропроводности металлов при весьма низких (криогенных) температурах, приближающихся к абсолютному нулю.

Такое явление, т. е. наличие у вещества практически бесконечной удельной проводимости, было названо сверхпроводимостью, температура T_c , при охлаждении до которой вещество переходит в сверхпроводящее состояние, температурой сверхпроводящего перехода, а вещества, переходящие в сверхпроводящее состояние, - сверхпроводниками.

К сверхпроводникам относятся: Иридий Ir , Алюминий Al , Олово Sn , Индий In , Ртуть Hg , Тантал Ta , Ванадий V , Свинец Pb , Ниобий Nb .

Помимо явления сверхпроводимости, в современной электротехнике используется явление криопроводимости. Это явление для некоторых металлов проявляется при низких (криогенных) температурах, но без перехода в сверхпроводящее состояние. Металлы, обладающие таким свойством, называются криопроводниками.

Содержание отчета.

1) Вычислить значения и заполнить таблицу 1.3:

– напряжение $U = 5 \text{ В}$

– сопротивления проводника, Ом $R = \rho \frac{l}{s}$

– значение электрического тока, А $I = \frac{U}{R}$

– значение мощности, рассеиваемой на проводнике, Вт $P = I^2 R$

– удельная электрическая проводимость, См $\gamma = \frac{1}{\rho}$

– сечение проводника, мм^2 $s = 0,785 \cdot d^2$.

Таблица 1.3 – Таблица данных для расчета при различной длине проводника

Проводник	Вычислить						
	$\rho(\text{Ом}\cdot\text{мм}^2/\text{м})$ при $t=20^\circ\text{C}$	d(мм)	l(м)	R(Ом)	$\gamma(\text{Cм})$	I(A)	P(Вт)
медь	0,0172	5,6	10				
			50				
		9,2	10				
			50				
латунь	0,071	5,6	10				
			50				
		9,2	10				
			50				
манганин	0,43	5,6	10				
			50				
		9,2	10				
			50				
фехраль	1,3	5,6	10				
			50				
		9,2	10				
			50				

Контрольные вопросы

1. В чем отличие сплавов высокой проводимости и материалов с высоким удельным сопротивлением, области их применения.
2. Что такое удельная проводимость?
3. В чем измеряется удельное сопротивление проводника и по какой формуле определяется?
4. Чем обусловлено возрастание удельного сопротивления проводника при повышении температуры?
5. Примесь в металлах снижает или увеличивает его удельное сопротивление?
6. Что влияет на теплопроводность металлов
7. Причина возникновения термоЭДС при соединении проводников и использование этого эффекта.
8. Какие сплавы используют для термопары?
9. Назовите два металла высокой проводимости и дайте им сравнительную оценку.
10. Область применения меди и алюминия, их сплавов.
11. Какой вид сплава железа применяют в качестве проводникового материала, его достоинства.

12. Какое покрытие используют для повышения стойкости к коррозии металлов?

13. С какой целью применяют биметалл, его преимущества.

14. Область применения биметалла.

15. Сплавы высокого сопротивления, область их применения. Назовите два представителя и дайте им сравнительную характеристику.

16. Почему в качестве материалов высокого сопротивления применяют сплавы на основе железа, их преимущества.

17. При каких условиях некоторые проводники меняют свое удельное сопротивление, приближая его к нулю. Как это используется.

18. Объяснить эффект сверхпроводимости

Выводы по выполненной работе.

Сделать вывод по полученным результатам расчета. Отразить влияние выбора сечения и длины проводника на токовую проводимость и величину рассеиваемой мощности.

Практическое задание № 2

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ПРОВОДНИКЕ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ

Цель работы: Исследование явления зависимости электрического сопротивления от температуры проводниковых материалов и применение данного явления в электротехнике.

1. Теоретические сведения

Сопротивлением называется способность проводника пропускать через себя электрический ток. На величину сопротивления любого проводника электрическому току влияет его структура. Двигаясь внутри структуры, свободные электроны сталкиваются с атомами и электронами, которые замедляют их движение. Чем их концентрация больше, тем выше будет само электрическое сопротивление.

Во время работы электрических цепей прослеживается прямая зависимость сопротивления металлов от температуры. Это явление называют коэффициентом температурного сопротивления. Оно определяет соотношение сопротивления к температурным изменениям. Объясняется это явление следующим образом: с повышением температуры структура проводника получает долю тепловой энергии, вследствие чего эта энергия увеличивает скорость движения атомов. В результате повышается вероятность их столкновения со свободными электронами. Чем чаще происходят эти столкновения, тем ниже будет проводимость.

С понижением температуры направленное движение электронов облегчается (уменьшается возможность столкновения свободных электронов с атомами), и сопротивление проводника уменьшается. Этим объясняется интересное явление – **сверхпроводимость металлов**. Сверхпроводимость, т. е. уменьшение сопротивления металлов до нуля, наступает при огромной отрицательной температуре – 273°C , называемой абсолютным нулем. При температуре абсолютного нуля атомы металла как бы застывают на месте, совершенно не препятствуя движению электронов, благодаря чему снижается вероятность их столкновения со свободными электронами. При температуре абсолютного 0 (-273 градуса Цельсия) возникает явление падения до нуля сопротивления проводника. Зависимость сопротивления проводника от температуры при абсолютном нуле – сверхпроводимость.

Температура, при которой обычный проводник становится сверхпроводником, называется критической. Она будет разной для различных чистых металлов и сплавов. Все будет зависеть от их структуры, химического состава и структуры кристаллов.

Жидкости.

В жидкостях прослеживается обратная зависимость. С увеличением температуры, сопротивление жидкого проводника уменьшается. Для электролита свойственно правило отрицательного значения температурного ко-

коэффициента $\alpha_p < 0$ Удельное сопротивление электролита рассчитывается следующим образом:

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_p t] \text{ или } R = R_0 (1 + \alpha_p t), \text{ где } \alpha_p < 0.$$

При этом увеличившееся значение температуры электролита сопровождается уменьшением сопротивления и ростом его проводимости.

2. Применение

Взаимное влияние температуры и сопротивления используют при изготовлении:

1. Электродов и других нагревательных устройств. Нагревательные элементы изготавливают из жаропрочных материалов, обладающих большим удельным сопротивлением. В этом случае при относительно небольшом значении напряжения будет происходить достаточно сильный нагрев элемента.

2. Ламп накаливания. Принцип действия аналогичен с нагревательным элементом с той разницей, что нить накаливания изготавливают из материалов, излучающих свет при нагревании.

3. Реле, используемого в системах контроля тепла и пожарных сигнализациях. Принцип работы релейного терморезистора основан на свойствах проводников изменять свое сопротивление при изменении температуры.

4. Люминесцентных ламп и жидкостных аккумуляторных батарей, в работе которых применяется эффект изменения проводимости газов и жидкостей под влиянием различных температур.

5. Плавких предохранителей, где при увеличении напряжения растет сопротивление и, как следствие, температура. Предохранитель плавится и тем самым размыкает цепь.

6. Термометр сопротивления

Влияние температуры металла на его электрическое сопротивление используется в работе измерительных приборов. Их называют термометрами сопротивления.

Их чувствительный элемент выполняют тонкой проволокой из металла, сопротивление которой тщательно замерено при определенных температурах. Эту нить монтируют в корпусе со стабильными термическими свойствами и закрывают защитным чехлом. Созданная конструкция помещается в среду, температуру которой необходимо постоянно контролировать.

На выводы чувствительного элемента монтируются провода электрической схемы, которыми подключается цепь замера сопротивления. Его величина пересчитывается в значения температуры на основе ранее произведенной калибровки прибора.

3. Контрольное задание

Определить потери мощности в голом проводе из указанного в таблице 2.2 металла длиной l и сечением s при температурах провода -20°C и $+60^\circ\text{C}$, если величина тока в проводе равна I .

Относительное изменение удельного сопротивления при изменении температуры на 1 Кельвин (градус) (К-1) - средний температурный коэффициент удельного сопротивления металлов

$$\alpha_p = \frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dT}$$

Положительный знак α_p соответствует случаю, когда удельное сопротивление в окрестности данной точки возрастает при повышении температуры.

Величина α_p также является функцией температуры. В области линейной зависимости $\rho(T)$ справедливо выражение

$$\rho = \rho_0 [1 + \alpha_p t],$$

где ρ_0 – удельное сопротивление материала проводника; t – температура проводника ρ – удельные сопротивления проводникового материала при изменении температуры.

4. Алгоритм расчета

1. Произвести расчет удельного сопротивления металла проводника при изменении температуры и заполнить таблицу 2.1.

- при снижении температуры до значения $t = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- при повышении температуры проводника до значения $t = +60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

2. Рассчитать омическое сопротивление проводника (при различных температурах) по известной формуле $R = \rho \frac{l}{s}$.

3. Определить потери мощности в голом проводнике

$$P = I^2 R.$$

4. Сделать вывод согласно полученным результатам.

Таблица 2.1 - Свод расчетных данных (пример)

Вариант	Металл	Удельное сопротивление ρ_{-20} при $t = -20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (мкОм · м)	Удельное сопротивление ρ_{+60} при $t = +60\text{ }^{\circ}\text{C}$ (мкОм · м)	Омическое сопротивление R, (Ом)	Потери мощности в проводнике Вт
1	медь				
	сталь				
	вольфрам				
	алюминий				

Таблица 2.2 – Данные параметров проводникового материала по вариантам

Вариант	Металл	Длина l , м	Сечение s , мм ²	Ток I , А	Удельное сопрот. ρ (мкОм · м) при +20 °С	Температур- ный коэффициент α_ρ
1	медь	100	16	75	0,0172	0,0043
	сталь	200	20	80	0,098	0,006
	вольфрам	50	0,04	5	0,055	0,0046
	алюминий	150	70	90	0,028	0,0042
2	медь	80	10	110	0,0172	0,0043
	сталь	170	15	120	0,098	0,006
	вольфрам	70	0,06	10	0,055	0,0046
	алюминий	120	35	150	0,028	0,0042
3	медь	140	25	200	0,0172	0,0043
	сталь	135	35	100	0,098	0,006
	никель	10	0,5	20	0,073	0,0065
	бериллий	100	1,0	40	0,04	0,0060
4	медь	200	20	60	0,0172	0,0043
	алюминий	110	10	30	0,028	0,0042
	вольфрам	70	0,1	3	0,055	0,0046
	сталь	90	2,5	50	0,098	0,006
5	алюминий	120	35	150	0,028	0,0042
	медь	80	20	75	0,0172	0,0043
	сталь	30	10	80	0,098	0,006
	вольфрам	100	0,3	5	0,055	0,0046
6	алюминий	90	10	90	0,028	0,0042
	никель	30	1,0	20	0,073	0,0065
	бериллий	30	1,5	40	0,04	0,0060
	медь	100	10	60	0,0172	0,0043
7	медь	90	16	75	0,0172	0,0043
	сталь	100	20	80	0,098	0,006
	вольфрам	40	0,04	6	0,055	0,0046
	алюминий	130	70	80	0,028	0,0042
8	медь	80	25	60	0,0172	0,0043
	сталь	100	45	140	0,098	0,006
	вольфрам	65	0,08	15	0,055	0,0046
	алюминий	90	35	95	0,028	0,0042
9	алюминий	75	45	100	0,028	0,0042
	никель	50	1,2	15	0,073	0,0065
	бериллий	20	1,0	10	0,04	0,0060
	медь	170	70	60	0,0172	0,0043

Контрольные вопросы

1. Почему структура проводника влияет на его электропроводность?
2. Дать определение среднему температурному коэффициенту удельного сопротивления металлов.
3. Объясните явление влияния температуры на удельное сопротивление проводника.
4. Как объяснить явление сверхпроводимости проводников?
5. Какая зависимость сопротивления от температуры прослеживается в жидкостях?
6. Перечислите возможное использование в устройствах и приборах влияния температуры и сопротивления.

Практическое занятие № 3

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОТЕРЬ МОЩНОСТИ В ДИЭЛЕКТРИКЕ

Цель работы: Исследование электроизоляционных материалов, определение тока и потерь мощности через диэлектрик

1. Краткие сведения

Применение электроизоляционных материалов основано на том, что они препятствуют электрическому току преодолевать некоторое пространство, ограниченное изолятором. Идеальный изолятор должен абсолютно исключить условия для проводимости электрического тока. К сожалению, не существует таких материалов.

Теоретически можно обосновать существование идеальных изоляторов, но синтезировать на практике такие вещества не реально, так как даже ничтожно малая доля примесей образует диэлектрическую проницаемость. Иначе говоря, рассеяния энергии в диэлектрической среде будут наблюдаться всегда.

Исходя из того, что часть электроэнергии неизбежно теряется в изоляторе, был введён термин «диэлектрические потери» – необратимый процесс преобразования в теплоту энергии электрического поля, пронизывающего диэлектрическую среду, То есть, это электрическая мощность, направленная на нагревание изоляционного материала, пребывающего в зоне действия электрического поля.

Потери складываются:

1. Из мощности, теряемой при прохождении постоянного сквозного тока утечки через сопротивление изоляции, в соответствии с законом Джоуля - Ленца – **омические потери**.

2. Потери при переменных токах, обусловленные релаксационной поляризацией – **диэлектрические потери** – это часть энергии электрического поля, необратимо преобразующаяся в теплоту в диэлектрике.

Диэлектрические потери – это электрическая мощность, затрачиваемая на нагрев диэлектрика, находящегося в электрическом поле.

Контрольное задание № 1

Твердый диэлектрик с объемным удельным сопротивлением ρ_v и удельным поверхностным сопротивлением ρ_s имеет форму и размеры, указанные в таблице 3.1 и на рисунке 3.1. Он установлен между электродами, на которых поддерживается постоянное напряжение U . Определить ток, протекающий через диэлектрик, и потери мощности в нем.

Ток, протекающий через объем, определяется

$$I_v = \frac{U}{R_v}.$$

Ток, протекающий по поверхности диэлектрика

$$I_s = \frac{U}{R_s}$$

Суммарный ток утечки

$$I = I_v + I_s$$

Потери мощности в диэлектрике

$$P = I \cdot U$$

Удельное объемное сопротивление

$$\rho_v = R_v \frac{S}{h};$$

Сопротивление объемное

$$R_v = \rho_v \frac{h}{S}$$

где d – периметр, $l = h$.

Удельное поверхностное сопротивление

$$\rho_s = R_s \frac{d}{l}$$

Сопротивление поверхностное

$$R_s = \rho_s \frac{l}{d}$$

Конденсатор цилиндрической формы (рис. 3.1,б):

Площадь внешней поверхности цилиндра

$$S = 2\pi ah$$

Площадь внутренней поверхности цилиндра

$$S = 2\pi bh$$

Периметр внешней поверхности цилиндра

$$d = 2\pi a + h$$

Периметр внутренней поверхности цилиндра

$$d = 2\pi b + h$$

Конденсатор с верхней и нижней поверхностью цилиндра (рис. 3.1,в):

Площадь верхней поверхности цилиндра (кольцо основание цилиндра)

$$S = \pi a^2 - \pi b^2$$

Периметр верхней и нижней поверхностей цилиндра

$$d = 2\pi a - 2\pi b$$

Конденсатор с треугольными поверхностями (рис. 3.1, г)

$$S = \frac{1}{2}ab$$

$$d = a + b + c$$

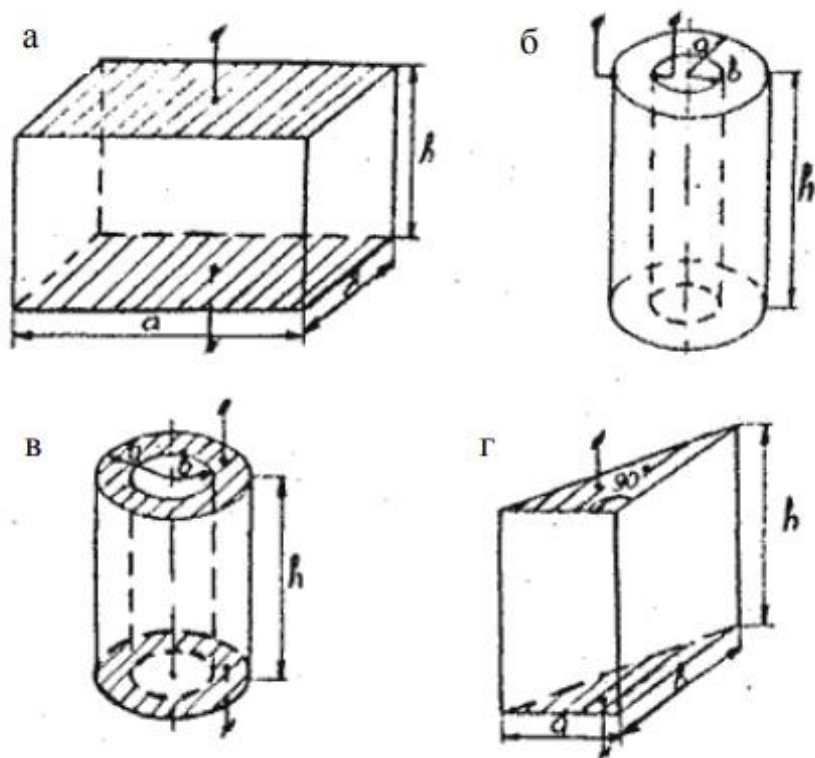


Рисунок 3.1 – Формы диэлектриков:

а, в, г – электродами являются нижняя и верхняя поверхности фигур;
 б – электродами являются внутренняя и внешняя поверхности цилиндра

Таблица 3.1 – Варианты заданий

Номер вар.	Форма	a, мм	b, мм	h, мм	ρ_v , Ом·м	ρ_s , Ом	U, кВ
1	2	3	4	5	6	7	8
1	а	20	20	20	$3 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^9$	2,0
2	б	80	15	25	$2 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{14}$	0,8
3	в	25	10	15	$3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^{11}$	1,5
4	г	35	20	10	$4 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{13}$	3,0
5	а	125	15	30	$5 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{15}$	5,0
6	б	30	5	20	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{14}$	4,0
7	в	115	20	35	$1 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{12}$	2,5
8	г	50	25	15	$1 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^{11}$	3,5
9	а	35	30	5	$8 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{12}$	0,5
10	б	40	5	25	$5 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{11}$	4,5
11	в	20	10	15	$3 \cdot 10^9$	$1 \cdot 10^9$	5,0
12	г	80	15	25	$4 \cdot 10^{11}$	$1 \cdot 10^{14}$	4,0
13	а	35	5	30	$5 \cdot 10^{14}$	$1 \cdot 10^{11}$	2,5
14	б	25	20	25	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{13}$	2,0
15	в	125	15	30	$3 \cdot 10^{13}$	$1 \cdot 10^{15}$	0,8

Практическое занятие № 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТАНГЕНСА УГЛА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПОТЕРЬ ЭЛЕКТРОИЗОЛЯЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: Знать основные свойства диэлектриков. Изучить описание некоторых электроизоляционных материалов. Уметь определить диэлектрические потери (активную мощность) и тангенс угла диэлектрических потерь. Построить векторные диаграммы токов для двух значений емкости C . Произвести анализ полученных результатов. Ответить на контрольные вопросы. Сформулировать выводы по работе.

1. Свойства диэлектриков

Диэлектрики – это материалы, противодействующие электрическому полю, обладающие большим сопротивлением и не пропускающие электрический ток.

Важнейшим свойством диэлектриков является способность их к поляризации под действием приложенного электрического напряжения.

Поляризация диэлектриков - это, процесс, состоящий в ограниченном смещении или ориентации связанных зарядов в диэлектрике при воздействии на него электрического поля. Степень поляризованности диэлектрика оценивается относительной диэлектрической проницаемостью.

Диэлектрическая проницаемость (ε) - это основная физическая величина, показывающая во сколько раз уменьшается напряженность электрического поля E' внутри однородного диэлектрика под действием напряженности E_0 внешнего поля (внешнего напряжения)

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E'}$$

Интенсивность процессов поляризации, протекающих в диэлектриках под действием приложенного напряжения, характеризуют относительной диэлектрической проницаемостью ε_r .

Диэлектрические потери – это активная мощность, поглощаемая в диэлектрике под действием приложенного к нему напряжения, рассеивается, превращаясь в теплоту. Эта мощность вызывает нагрев диэлектрика. Нагрев диэлектриков приводит к ускорению процессов старения и снижению их электрической прочности. Электрическую прочность диэлектриков проверяют в лабораторных условиях, измеряя напряжение U , которое пробивает установленной толщины h образец электроизоляционного материала. Далее электрическую прочность вычисляют по нижеуказанной формуле:

$$E_{np} = \frac{U}{h}$$

Диэлектрики всегда подвергаются воздействию высокого напряжения и могут быть разрушены силами электрического поля. Это явление называется пробоем диэлектрика.

2. Общие сведения и описание некоторых электроизоляционных материалов

К диэлектрикам также относятся группы материалов: полимеры, волокнистые пропитанные материалы, слоистые пластики, стекло, керамика, материалы на основе слюды и др.

Полимеры применяют в производстве многих изделий электротехнической промышленности. Одним из наиболее применяемых материалов этой группы является поливинилхлорид (винипласт). Этот материал устойчив к действию влаги, обладает высокой стойкостью ко многим растворителям и химически активным веществам, обладает малой нагревостойкостью.

Применяют винипласт для изоляции защитных оболочек, кабельных изделий, изоляции проводов в различных электрических машинах и аппаратах, работающих при промышленных частотах, в трубчатых разрядниках. Это хороший дугогасящий материал.

Конденсаторная бумага является наиболее тонким и высококачественным электроизоляционным видом бумаги. В пропитанном виде образует диэлектрик бумажных конденсаторов. Выпускают двух видов: кон – обычная и силкон – бумага для силовых конденсаторов. Кабельную бумагу применяют для изоляции силовых кабелей низкого и высокого напряжения.

Картон имеет весьма многостороннее применение в трансформаторостроении, машино- и аппаратостроении, применяется в качестве пазовой изоляции вращающихся электрических машин, изоляции магнитопроводов аппаратов. Изготавливается как для работы в воздухе, так и для работы в трансформаторном масле.

Гетинакс получают посредством горячей прессовки бумаги, пропитанной бакелитовой смолой. Его используют для изготовления электроизоляционных деталей электрических машин, аппаратов и приборов как низкого, так и высокого напряжения. Слоистая структура гетинакса, как и других слоистых пластиков, приводит к заметной анизотропии свойств в направлениях, перпендикулярных и параллельных слоям. Дугостойкость гетинакса, как и других пластиков, на фенолформальдегидном (бакелитовом) связующем веществе невелика.

Текстолит – слоистый прессованный материал, состоящий из двух или более слоев ткани, пропитанной фенолформальдегидной смолой. Текстолит, по сравнению с гетинаксом, обладает повышенным сопротивлением к истиранию и применяется лишь в отдельных случаях для изделий, подвергающихся ударным нагрузкам или работающих на истирание.

Стеклотекстолит – слоистый прессованный материал, состоящий из двух или более слоев стеклоткани, пропитанной различными термореактивными связующими термовеществами. Это наиболее нагревостойкий, влагонестойкий и механически прочный слоистый пластик.

Стекло – неорганическое аморфное вещество. Используют в качестве диэлектрика конденсаторов и в качестве изоляторов высокого напряжения. Органическое стекло (полиэтилметакрилат) применяют в производстве, ко-

гда не требуется большая нагревостойкость, но нужны высокие электроизоляционные свойства, химостойкость, влагостойкость. Как газогенерирующий материал обладает хорошими дугогасящими свойствами.

Миканит – материал, получаемый склеиванием между собой пластинок щипаной слюды различными смолами или лаками. Используется для изоляции между коллекторными пластинками электрических машин.

Фарфор – материал, получаемый из глины после температурного обжига. Из него изготавливают самые разнообразные электрические изоляторы (линейные, станционные, аппаратные). Фарфор стоек к воздействию атмосферных осадков, химических веществ, слабо подвержен старению.

3. Содержание отчета

1) Произвести расчет указанных в таблице 4.1. параметров для двух различных значениях емкости, согласно варианта задания.

2) Сравнить результаты расчета и проанализировать, какие изменения происходят с параметрами $tg\delta$ и P_d при увеличении емкости C .

3) Построить в масштабе векторные диаграммы токов с двумя различными значениями емкости C с указанием угла тангенса диэлектрических потерь $tg\delta$.

4) Напряжение $U = 220$ В.

Таблица 4.1 – Таблица данных и результаты расчета параметров диэлектриков

Вариант	$R(Ом)$	$C(мкФ)$	$I_a(A)$	$I_c(A)$	$tg\delta$	$P_d(Вт)$
1	250	10				
		40				
2	300	25				
		100				
3	400	15				
		60				
4	500	20				
		80				
5	450	30				
		60				
6	350	15				
		45				
7	600	35				
		105				
8	400	25				
		75				
9	200	10				
		50				
10	300	20				
		60				

4. Краткие сведения и формулы для расчета

Углом диэлектрических потерь называют угол δ , дополняющий до 90° угол сдвига фаз φ между током I , протекающим через диэлектрик, и прило-

женным к нему напряжением U (рис. 4.1). Чем больше рассеиваемая в диэлектрике мощность, переходящая в тепло, тем больше угол диэлектрических потерь δ и его функция $\operatorname{tg}\delta$. Мощность диэлектрических потерь в схеме (рис. 4.1) определяется формулой

$$P_d = U \cdot I_a \quad (4.1)$$

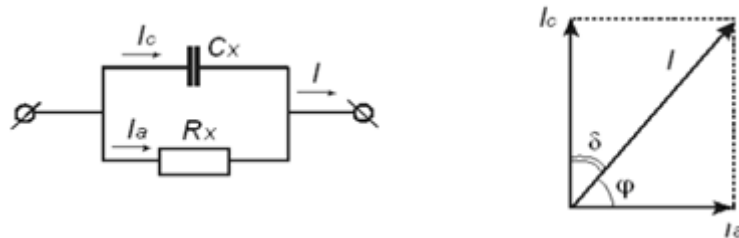


Рисунок 4.1 – Эквивалентная схема замещения и векторная диаграмма диэлектрика с потерями

Учитывая, что активный ток $I_a = U/R_x$, формулу можно записать в виде

$$P_d = \frac{U^2}{R_x} \quad (4.2)$$

Согласно векторной диаграмме

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{I_a}{I_c} = \frac{U/R_x}{U\omega C_x} = \frac{1}{\omega R_x C_x}, \quad (4.3)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая (круговая) частота тока.

Выразив из (3) и подставив в (2), можно получить формулу, связывающую диэлектрические потери с величиной $\operatorname{tg}\delta$

$$P_d = U^2 C_x \operatorname{tg}\delta. \quad (4.4)$$

Посчитать тангенс диэлектрических потерь и мощность диэлектрических потерь различными формулами и получить одинаковый результат.

Контрольные вопросы

1. Что такое относительная диэлектрическая проницаемость, какие процессы в диэлектрике она характеризует?
2. Как численно определяется?
3. Что такое диэлектрические потери, $\operatorname{tg}\delta$ и какие процессы в диэлектрике они характеризуют?
4. Чем опасны активные потери мощности в диэлектрике?

5. Какими электрическими элементами замещается диэлектрик с потерями?
6. Дать описание некоторых электроизоляционных материалов.
7. Какой из электроизоляционных материалов применяют в качестве изоляции проводов в электрических машинах?
8. Какой материал подвергается ударным нагрузкам или работает на истирание?
9. Какой материал используют для изготовления электроизоляционных деталей электрических машин, аппаратов и приборов?
10. Какой материал используется для изоляции между коллекторными пластинками?
11. Какой материал отличается хорошим дугогашением?

Практическое задание № 5

РАСШИФРОВКА ОБОЗНАЧЕНИЯ МАРОК СПЛАВОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Цель работы: развитие умений классифицировать, расшифровывать и характеризовать область применения сплавов цветных металлов. Самостоятельное выполнение заданий. Сформулировать выводы по работе.

1. Теоретические сведения

Классифицировать сплав – значит отнести его к соответствующему классу материалов по признакам: химическому составу, структуре, применению. Расшифровывая марку сплава, необходимо дать его полное название и раскрыть содержание всех букв и цифр марки. Следует иметь в виду, что в ряде сплавов содержание компонентов прямо не указано в марке, но следует из принципов маркировки данного материала и должно быть отражено при расшифровке. Характеризуя область применения сплава, можно сослаться на круг наиболее распространенных изделий из данного сплава.

Сплавы на основе меди.

Медные сплавы обладают высокими механическими свойствами, хорошо сопротивляются износу и коррозии.

По составу легирования различают:

1. латуни,
2. бронзы
3. медно-никелевые сплавы.

Традиционная маркировка имеет следующий вид.

Латуни обозначаются буквой Л, бронзы - Бр. У латуни после буквы Л указываются буквенные обозначения легирующих компонентов, далее прописывается массовое процентное содержание меди, затем подряд - массовое процентное содержание легирующих компонентов, содержание цинка - остальное.

Например: ЛМцЖ55-3-1 - латунь, медь - 55 %, марганец - 3 %, железо - 1 %, цинк - остальное.

У бронзы после букв Бр указываются буквенные обозначения легирующих компонентов, далее подряд - массовое процентное содержание легирующих компонентов, содержание меди - остальное.

Например: БрОЦС4-4-2,5 - бронза, олово – 4 %, кремний – 2,5 %, остальное - медь.

Сплавы на основе титана.

Титановые сплавы обладают высокой коррозионной стойкостью и прочностью при малой плотности. Наибольшее распространение получили сплавы, легированные алюминием, оловом, марганцем, хромом и ванадием. Сплавы широко используются в машиностроении, особенно в авиа- и судостроении.

BT1-00 (99,53 % Ti).

BT1-0 (99,46%Ti)+0,3% примеси.

Легирующие элементы – Al, Sn, Mn, Cr, V.

Сплавы на основе алюминия.

Для алюминиевых сплавов характерна относительно большая удельная прочность. Литейные сплавы имеют хорошие литейные свойства, хорошо обрабатываются резанием. Маркируют буквами АЛ, затем цифрами, указывающими порядковый номер сплава.

Сплавы на основе Al-Si – АЛ-2, АЛ-4, АЛ-4-1; АЛ-9-1.

Сплавы на основе Al-Si – Cu – АЛ-3, АЛ-5, АЛ-5-1, АЛ-6.

Сплавы на основе Al-Cu – АЛ7, АЛ19, АЛ33.

Сплавы на основе Al-Mg – АЛ-8, АЛ-13, АЛ-22 и пр.

Деформируемые сплавы обладают удовлетворительной пластичностью, высокой коррозионной стойкостью, в основном применяются для сварных и клепаных соединений элементов конструкций, испытывающих небольшие нагрузки, но требующих высокого сопротивления коррозии.

Сплавы с Mn (марганец) АМц (1 - 1,6 % Mn 1,6 - 1,8 Mg).

Сплавы с Mg (магний) АМг (2 % Mg).

Используют при изготовлении бензомаслопроводов, емкости для жидкостей в авиа и судостроении.

Марки дюралюминиевых сплавов начинаются с буквы Д, за которой стоит цифра, обозначающая условный порядковый номер сплава.

Дюралюмины – Al-Cu-Mg, марки Д1, Д16 широко применяют в авиации.

Ковочные алюминиевые сплавы Al-Mg-Si-Cu Марки АК-6 АК-8 применяют для высоконагруженных деталей сложной формы.

Высокопрочные Al-Zn-Mg-Cu Марки В95 В96 применяют для высоконагруженных деталей работающих в условиях сжатия

Антифрикционные сплавы.

Такие сплавы применяют для заливки подшипников скольжения. Применяются сплавы на основе олова или свинца (баббиты), меди, алюминия, цинка. Баббиты обозначаются буквой Б, далее ставится цифра, показывающая процентное содержание олова, или буква, характеризующая специальный элемент, входящий в сплав.

Например: Б88 - сплав содержит 88 % олова, БТ - сплав содержит теллур, БК2 - основа свинец.

Металлы и их сплавы.

Все известные в настоящее время химические элементы (более 100 наименований) по совокупности свойств подразделяют на металлы и неметаллы. Примерно 80 % общего числа элементов относится к металлам. Некоторые из них (мышьяк, сурьму и др.) иногда называют полуметаллами, так как по одним свойствам их можно отнести к металлам, а по другим – к неметаллам.

Металлы (от греческого металлон – копи, рудники) – вещества неорганического происхождения, многие из которых обладают характерным бле-

ском, высокой плотностью, прочностью и твердостью, пластичностью, хорошей электро- и теплопроводностью.

Классификация металлов.

Все существующие металлы условно принято подразделять на черные и цветные.

Черные металлы – промышленное название железа и его сплавов (чугун, сталь, ферросплавы и др.). Черные металлы составляют более 90 % всего объема, используемых в экономике металлов, из них основную часть составляют различные стали.

Цветные металлы – все остальные, например: К (калий), Na (натрий), Ca (кальций), Al (алюминий), Mg (магний); Ni (никель), Cu (медь), Pb (свинец), Zn (цинк), Sn (олово), W(вольфрам), Ti (титан), Mo (молибден), V (ванадий), Nb (ниобий), Zr (цирконий), Au (золото), Ag (серебро), Pt (платина) и т.д.

Цветные металлы в свою очередь подразделяются на следующие группы:

1) легкие цветные, например: К (калий), Na (натрий), Ca (кальций), Al (алюминий), Mg (магний);

2) тяжелые цветные с плотностью более 5 г/см³, например: Ni (никель), Cu (медь), Pb (свинец), Zn (цинк), Sn (олово); - благородные, например: Au (золото), Ag (серебро), Pt (платина);

3) редкие металлы в свою очередь подразделяют:

– на тугоплавкие (с температурой плавления выше 1875 °С), например: W(вольфрам), Ti (титан), Mo (молибден), V (ванадий), Nb (ниобий), Zr (цирконий), Ta (тантал);

– легкие, например: Sr (стронций), Sc (скандий), Rb (рубидий), Cs (цезий);

– радиоактивные, например: U (уран); Ra (радий), Ac (актинидий), Pd (палладий);

– редкоземельные, например: Ge (германий), Ga (галлий), Hf (гафний), In (индий), La (лантан), Tl (таллий), Ce (церий), Re (рений).

Классификация сплавов.

Технически чистые металлы обладают низкой прочностью и поэтому применение их ограничено. В промышленности, как правило, применяются сплавы металлов

Сплавом (металлов) называют твердые и жидкие системы, образованные главным образом сплавлением двух или более металлов, а также металлов с различными неметаллами. Сплавы являются одним из основных конструктивных материалов.

Среди них наибольшее значение имеют сплавы на основе железа и алюминия.

В технике применяется более 5 тыс. сплавов. По характеру металла (основы) различают:

1) черные или железоуглеродистые сплавы;

2) стали, чугуны (основа - Fe);

3) цветные сплавы (основа - цветные металлы), в т.ч.:

– сплавы на основе цветных металлов, таких как К (калий), Na (натрий), Ca (кальций), Al (алюминий), Mg (магний) называются легкими цветными сплавами;

– на основе цветных металлов, таких как Ni (никель), Cu (медь), Pb (свинец), Zn (цинк), Sn (олово) называются тяжёлыми цветными сплавами;

– на основе тугоплавких металлов, таких как W(вольфрам), Ti (титан), Mo (молибден), V (ванадий), Nb (ниобий), Zr (цирконий), и т.д. называются тугоплавкими сплавами;

4) сплавы радиоактивных металлов (основа – радиоактивные металлы);

5) сплавы редкоземельных металлов (основа – радиоактивные металлы).

В зависимости от количества основных компонентов, входящих в состав сплава, различают сплавы двойные (бинарные) и сложные (тройные, четверные и т. д.)

Примеси сплавов.

Помимо основных компонентов в состав сплавов входят примеси: - случайные (попадают в сплав во время его приготовления);

– специальные (вводятся в сплав в виде добавок для придания ему необходимых эксплуатационных свойств) Введение в сплав специальных добавок называется легированием, а сама добавка – лигатурой. Составляющими лигатуры могут быть как отдельные элементы (легирующие элементы), так и сплавы этих элементов (например: ферросплавы FeTi, FeV, FeCr и т.д.). Помимо этого различают *примеси вредные* (S, P, O₂, H₂, N₂), ухудшающие свойства материалов, и полезные, улучшающие их свойства - (легирующие элементы).

Структура сплавов.

По структуре сплавы разделяют:

- на твердые растворы,
- механические смеси,
- химические соединения.

1. Если атомы входящих в состав сплава компонентов имеют незначительные различия в размерах и строении электронной оболочки, то они, как правило, образуют общую кристаллическую решетку. Такая структура называется твердым раствором.

2. Механическая смесь получается в том случае, когда компоненты сплава не могут образовать общую решетку, и каждый из них кристаллизуется самостоятельно.

3. Если при химическом взаимодействии компонентов сплава получается новое вещество, свойства которого резко отличаются от свойств исходных компонентов, то такой сплав называют химическим соединением. В одном сплаве могут одновременно присутствовать все три структуры.

2. Задания для самостоятельного выполнения

Задание 1. Из перечисленных ниже марок оловянных бронз укажите сначала литейные, а затем деформируемые бронзы: БрОЦ4-3, БрОЦС4-4-4, БрО10, БрОЦСН3-7-5-1, БрОФ10-1, БрОФ4-0,25, БрОЦС5-5-5, БрОФ6,5-0,4. Для ответа необходимо учитывать влияние олова на механические свойства оловянных бронз, а также руководствоваться данными табл. 6 и 7. Укажите их химический состав.

Задание 2. Какой химический состав имеют следующие материалы: БрАЖ9-4, БрКМц3-1, БрБ2, БрМц5, БрС30, Л96, ЛС80-3, ЛЖМц59-1-1, ЛА77-2.

Задание 3. Из перечисленных марок металлических материалов выберите марки антифрикционных сплавов: БрС30, АК4, ШХ6, У7, Б83, Р!8, БН, БСт5, БрОЦС5-5-5, АСЧ-1, Б16, ШХ15, БК, БСт6, БТ, Т15К6, ВТ14.

Задание 5. Каков химический состав и назначение следующих марок латуней: Л68, ЛС59- 1Л, ЛКС80-3-3, ЛАЖ60-1-1

Задание 6. Дать расшифровку маркам стали:

20Н2М, 15ХГН2ТА, 16ХСН, 18Х2Н4ВА, ВСт3сп, ВСт4пс, Ст3Гпс
10Г2С1Д, 15ГФД, 14Г2АФ, 20ХГ2Т, У10, У13А, 4ХМНФС, 8Х6НФТ, 5ХВ2СФ

Задание 7. Дать расшифровку марки чугуна: СЧ10, ВЧ 35, АЧС2, ЧХ28.

Практическое занятие № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: Изучить природу магнитных материалов. Магнитные свойства вещества. Классы магнитных веществ. Выполнить задачу для самостоятельного изучения. Пройти тесты и ответить на контрольные вопросы. Сформулировать выводы по работе.

1. Общие сведения

Все вещества в окружающей нас природе в какой-то мере обладают магнитными свойствами. Ещё с глубокой древности была известна способность некоторых минералов притягивать железные предметы. Среди многих приборов навигации, необходимых для прокладывания курса кораблей или самолётов, обязательно должен быть и магнитный компас. Во многих измерительных приборах основными деталями служат постоянные магниты. Что же происходит с веществом, помещённом в магнитное поле? Вспомним, как магнитные свойства катушки, по которой течёт ток, усиливаются, если в катушку вставлен железный сердечник. Железный сердечник намного увеличивает магнитное поле в катушке с током. Мы знаем, что вокруг катушки с электрическим током возникает магнитное поле, а железный сердечник, создаёт своё магнитное поле и, согласно принципу суперпозиции полей, векторы этих двух полей складываются. Таким образом, мы наблюдаем усиление магнитного поля.

Магнитную индукцию, создаваемую электрическим током, обозначим через (B_0). Магнитную индукцию поля в веществе обозначим через (B). При введении железного сердечника, появляется магнитная индукция поля, возникающая благодаря намагничиванию вещества (B_1). Эти поля складываются по принципу суперпозиции полей. В итоге мы наблюдаем, что вещество может усилить или, возможно ослабить магнитное поле. Магнитная индукция поля, создаваемого этими токами в вакууме, будет меньше, чем магнитная индукция поля в веществе.

Магнитные свойства вещества определяют по тому, как эти вещества реагируют на внешнее магнитное поле и каким образом упорядочена их внутренняя структура. Всякое вещество является магнетиком, т. е. способно под действием магнитного поля приобретать магнитный момент (намагничиваться).

Основные свойства магнитных материалов.

Источники магнитного поля

1. одиночные движущиеся заряды;
2. проводники с электрическим током;
3. намагниченные тела.

Магнитная индукция B (тесла) - векторная физическая величина, являющейся силовой характеристикой поля (зависит от свойств окружающей среды и определяется силой, действующая на единицу заряда, движущегося с единичной скоростью перпендикулярно линиям магнитной индукции поля.

Магнитная проницаемость вещества μ показывает, во сколько раз вектор магнитной индукции в веществе $\vec{B}$ больше, чем вектор магнитной индукции в вакууме, $\vec{B}_0$ то есть

$$B = \mu B_0, \text{ отсюда } \mu = \frac{B}{B_0}$$

Магнитная проницаемость материалов зависит от температур. Предельно допустимая температура, при которой магнитный материал теряет свои магнитные свойства и становится парамагнетиком – точка Кюри.

Для характеристики изменения магнитной проницаемости при изменении температуры обычно пользуются температурным коэффициентом магнитной проницаемости (K^{-1})

$$TK_\mu = \frac{1}{\mu} \frac{d\mu}{dt}$$

Напряженность магнитного поля (H) (А/м) – векторная величина, характеризующая магнитное поле, которая зависит от свойств среды и определяется токами в проводниках, создающим магнитное поле.

Если медленно производить намагничивание магнитного материала, а затем его размагничивание, то изменение индукции будет отставать от изменения напряженности. Это явление получило название магнитного гистерезиса. **Магнитный гистерезис** – явление отставания магнитной индукции от напряженности магнитного поля при его квазистатическом изменении и вызывает необратимый процесс намагничивания.

К основным параметрам петли гистерезиса следует отнести:

$B_{нас}$ (точка 1) – индукция насыщения.

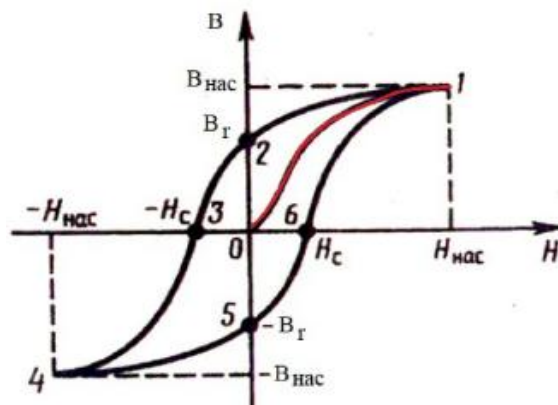
$H_{нас}$ – напряженность поля насыщения

B_r (точка 2) – остаточная индукция (при $H=0$).

H_c – коэрцитивная сила. Чем больше H_c , тем в меньшей степени материал способен размагничиваться.

Участок 01 – кривая начального намагничивания; участок 12 – кривая спада напряженности, но не по первоначальной возрастающей кривой

Участок 2-3 – напряженность меняет свое направление (знак). Напряженность поля, при которой индукция становится равной нулю – коэрцитивная сила ($-H_c$) – участок 23. Размагничивание материала в обратном направлении, в сторону отрицательной напряженности ($-H_{нас}$) – участок 34. Точка 4 – насыщение материала, магнитная индукция максимальна и отрицательна ($-B_{нас}$). Если после размагничивания материала намагничивать его снова в положительном направлении – участок 45, то кривая вернется в точку насыщения $+B_{нас}$ при положительной напряженности магнитного поля ($+H_{нас}$).



Потери в магнитных материалах. В каждом цикле перемагничивания часть магнитной энергии, запасаемой в материале, теряется, переходит в теп-

ло. Эти потери называются потери на перемагничивание, которые пропорциональны площади петли гистерезиса. Для материалов, используемых в электротехнике и энергетике потери энергии желательно уменьшить, то есть уменьшить площадь петли гистерезиса, это можно достигнуть, если коэрцитивная сила будет как можно меньше.

Мощность потерь на гистерезис. Это потери, затрачиваемые на перемагничивание массы материала за один цикл (Вт/кг). Их величина зависит от частоты перемагничивания f и значения максимальной индукции B_m . Они определяются площадью петли гистерезиса (за один цикл)

$$P_{\varepsilon} = \eta B_m^n f V.$$

Потери энергии на вихревые токи зависят от удельного сопротивления материала ρ . Чем больше ρ , тем меньше потери. Также зависит от плотности материала и его толщины. Потери пропорциональны квадрату амплитуды магнитной индукции B_m и частоты переменного поля

$$P_{\varepsilon} = \zeta B_m^2 f^2 V,$$

где ζ, η - коэффициенты, зависящие от материала; n – показатель, меняющийся в диапазоне 1,6...2. V - объем материала.

Существует три основных класса веществ с резко различающимися магнитными свойствами: ферромагнетики, парамагнетики и диамагнетики.

Диамагнетики (Cu (медь), Bi (висмут), SiO₂ (кварц), стекло, каменная соль) – это вещества, у которых магнитная проницаемость чуть меньше единицы. К таким веществам относятся золото, серебро, углерод, висмут. Магнитная проницаемость висмута равна 0,9998. Значит, магнитное поле ослабляется, когда в него помещают это вещество $B < B_0$. Это означает, что вектор магнитной индукции поля, создаваемого веществом, направлен противоположно вектору магнитной индукции поля, создаваемого током.

Парамагнетики (Al (алюминий), W (вольфрам), Pt (платина), N (азот)) – вещества, у которых магнитная проницаемость чуть больше единицы. Это алюминий, вольфрам, щелочные металлы, магний, платина. Эти вещества намагничиваются очень слабо, намагничиваются вдоль намагничивающего поля. Вектор магнитной индукции поля, создаваемого веществом, направлен в ту же сторону, что и вектор магнитной индукции поля, создаваемого током.

Ферромагнетики (Fe (железо), Ni (никель), Co (кобальт)) – это вещества, у которых магнитная проницаемость во много раз больше единицы. Это такие вещества как железо, кобальт, никель и сплавы металлов. Для железа магнитная проницаемость равна одна тысяча (1000).

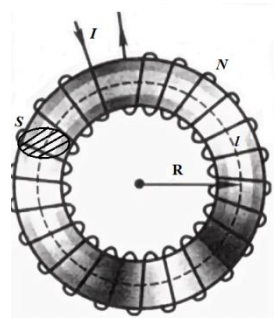
Большое применение получили ферромагнитные материалы, не проводящие электрического тока – **ферриты**. Это химические соединения оксидов железа с оксидами других веществ. К их числу относится и магнитный железняк.

Стальной или железный сердечник в катушке усиливает создаваемое ею магнитное поле, не увеличивая силу тока в катушке. Это экономит элек-

троэнергию. Сердечники трансформаторов, генераторов, электродвигателей и т. д. изготавливают из ферромагнетиков. При выключении внешнего магнитного поля ферромагнетик остаётся намагниченным, таким образом создаёт магнитное поле в окружающем пространстве. Это объясняется тем, что домены не возвращаются в прежнее положение и их ориентация частично сохраняется. Благодаря этому существуют постоянные магниты. Постоянные магниты широко применяются в электроизмерительных приборах, громкоговорителях и телефонах, звукозаписывающих аппаратах, магнитных компасах и т.д. Электроизмерительный прибор является необходимым устройством в связи, промышленности, на транспорте, в медицине и в научных исследованиях.

2. Задача для самостоятельного решения

Площадь поперечного сечения сердечника тороида, который выполнен из чистого железа, s (см²). Средний радиус тороида R (см). Число витков в обмотке N . Вычислите энергию магнитного поля тороида, если по обмотке течет ток I (А).



Формулы, необходимые для расчета

1. Напряженность магнитного поля тороида (А/м)

$$H = \frac{N}{2\pi R} I$$

2. Магнитная индукция B (Тл) сердечника тороида находим, используя зависимость $B = f(H)$ для железа.

Магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума)

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

3. Магнитная проницаемость железа находим из формулы $B = \mu\mu_0 H$;

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H}$$

4. Величина магнитного потока (Вб)

$$\Phi = Bs$$

5. Длина средней линии тороида (м)

$$l = 2\pi R$$

6. Индуктивность катушки, намотанной на железный тороида́льный сердечник (Гн)

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} s$$

7. Энергия магнитного поля тока (Дж)

$$W = \frac{LI^2}{2}$$

8. Объемная плотность энергии магнитного поля (Дж/м³)

$$w = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{B \cdot H}{2}$$

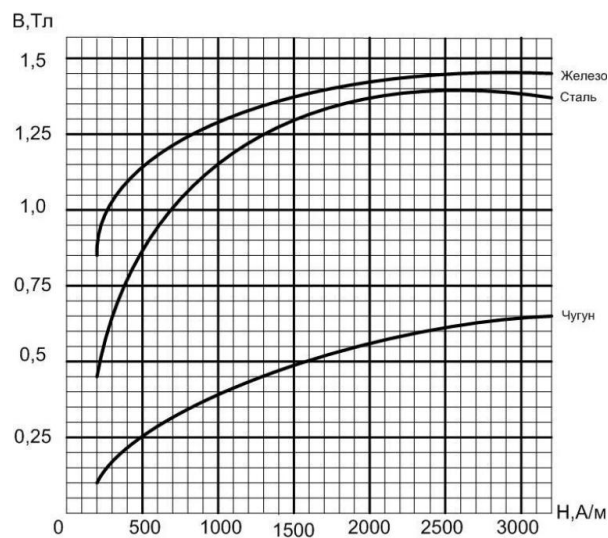


Рисунок 6.1 – Зависимость магнитной индукции от напряженности магнитного поля $B = f(H)$

Таблица вариантов

Вариант	Материал сердечника	Сечения сердечника тороида см ²	Средний радиус тороида, см	Число витков в обмотке	Ток в обмотке, А
1.	Сталь	15	40	700	7
2.	Железо	20	45	800	5,5
3.	Сталь	25	50	750	5
4.	Железо	18	35	500	3
5.	Сталь	22	40	650	4,5
6.	Железо	14	30	600	5,6
7.	Сталь	26	35	800	4,5
8.	Железо	30	50	1000	7,5
9.	сталь	20	30	550	6
10.	железо	17	28	600	6

Решить задачу согласно своему варианту. Оформить письменно в тетради. Пройти тесты, записать правильные ответы в тетрадь

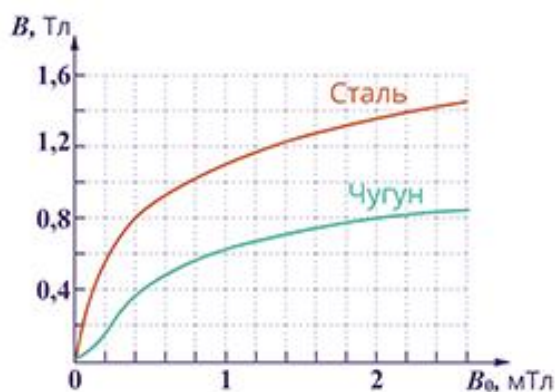
Тесты

1. Для каких целей применяют ферромагнитные материалы?

- 1) для усиления силы тока;
- 2) для ослабления магнитного поля;
- 3) для усиления магнитного поля;
- 4) для ослабления силы тока.

2. По графику определите магнитную проницаемость стали μ при индукции $B_0 = 0,4$ мТл намагничивающего поля:

- 1) 2000;
- 2) 2500;
- 3) 3500;
- 4) 4000.



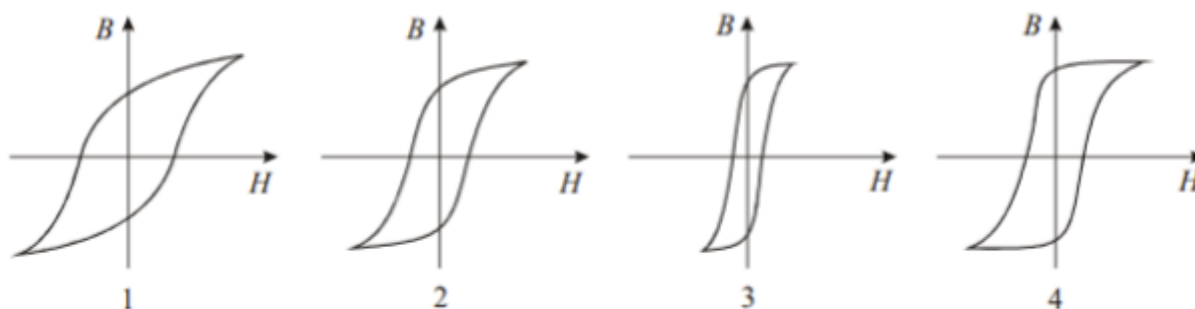
3. По графику определите магнитную проницаемость чугуна при индукции B_0 намагничивающего поля 1 мТл:

- 1) 2000;
- 2) 2500;
- 3) 3500;
- 4) 4000.

4. По приведенной значению магнитной проницаемости определите тип магнетика:

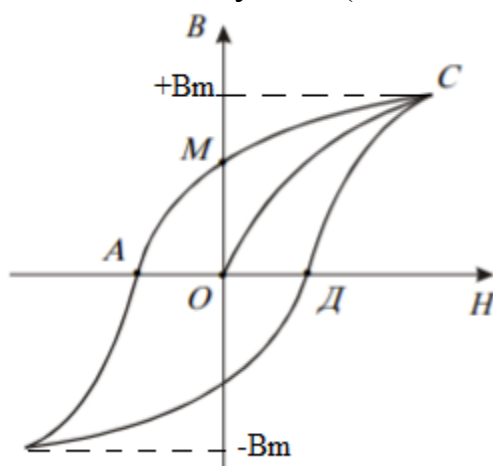
- 1) 5000;
- 2) 0,9999;
- 3) 1,00017;
- 4) 10.

5. Какой из электромагнетиков, имеющих вид петли гистерезиса (см. рис) следует использовать в качестве сердечника электромагнита:



6. Какой из отрезков (или участков) на приведенной петле гистерезиса соответствует:

- коэрцитивной силе;
- остаточной индукции;
- максимальной магнитной индукции (насыщение)?



- 1) OM;
- 2) OD;
- 3) OA;
- 4) OB_m.

Контрольные вопросы

1. Как обнаруживает себя магнитное поле?
2. Что произойдет с магнитными свойствами катушки, если разместить ее на железный сердечник?
3. Что является основными источниками магнитного поля?
4. Что такое магнитная индукция?
5. Дайте определение напряженности магнитного поля.
6. Что характеризует величина магнитная проницаемость материала?
7. Дайте характеристику явлению магнитного гистерезиса.
8. Что зависит от площади петли гистерезиса?
9. Назовите основные параметры петли гистерезиса.
10. Как магнитные материалы разделяются по реакции действия на внешнее магнитное поле?
11. Дайте подробную характеристику ферромагнитным материалам.

Практическое задание № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ

И ПРИМЕНЕНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цель работы: Изучение особенностей полупроводников и их способности изменять свои свойства под влиянием различных внешних факторов. Знать свойства собственных и примесных полупроводников и их применение. Технология получения германия и кремния, область их применения. Сформулировать выводы по работе.

1. Свойства и применение собственных полупроводников

Свойства полупроводников очень сильно зависят от содержания примесей, присутствующих в кристалле, а также дефектов кристаллической структуры. Собственным называют чистый и правильный по структуре полупроводник, в котором влиянием примесей и дефектов можно пренебречь. Кремний, являясь элементом 14-й группы системы Менделеева, кристаллизуется в структуре алмаза, при этом каждый атом находится в центре тетраэдра в окружении четырёх ближайших соседей, с которыми взаимодействует силами ковалентных связей. Все валентные электроны кремния задействованы в ковалентных связях, и свободные носители электрических зарядов отсутствуют.

Под воздействием внешнего электрического поля электрон и оставленная им дырка разрываются и окончательно освободившиеся электроны движутся к положительному электроду – это называют электронной электропроводностью полупроводника. Благодаря дыркам электроны валентной зоны также принимают участие в процессе электропроводности, они поэтапно передаются соседним атомам, заполняя образующиеся дырки. В результате дырка постепенно передвигается к отрицательному электроду – это называют дырочной электропроводностью полупроводника.

В полупроводниках различают подвижность электронов и подвижность дырок. Интересно, что подвижность электронов в полупроводнике может быть в сотни и тысячи раз больше, чем в металле; высокое сопротивление полупроводников обусловлено малой концентрацией этих носителей заряда. Однако, инжектируя («впрыскивая») электроны в полупроводник, удаётся резко снизить его сопротивление и добиться больших значений плотности тока, сравнимых с плотностью токов в металлах. Нагрев собственного полупроводника увеличивает электропроводность. При низких температурах валентная зона собственного полупроводника полностью заполнена электронами, а зона проводимости абсолютно свободна, полупроводник ведёт себя подобно идеальному диэлектрику. С увеличением температуры возрастают как электронная, так и дырочная проводимость.

Контактная ЭДС и термоЭДС возникает в месте контакта двух полупроводников или полупроводника с металлом - это стремление электрона занять минимально возможный энергетический уровень. Однако значение кон-

тактной ЭДС и термоЭДС в полупроводниковых контактах намного больше, чем в чисто металлических. Это позволяет использовать их в качестве эффективных преобразователей тепловой энергии в электрическую. Термобатареи составляют из множества последовательно включённых термоэлементов, каждый из которых представляет собой контакт положительной и отрицательной ветвей, изготовленных из полупроводников с разным типом электропроводности. Для получения электроэнергии горячие и холодные контакты должны чередоваться. Основным материалом для положительных ветвей термоэлементов – тройной сплав Bi–Sb–Zn, а для отрицательных – твёрдые растворы халькогенидов свинца.

Воздействие на полупроводник света и других электромагнитных излучений проявляется в увеличении электропроводности. Некоторые кванты электромагнитного излучения, падающего на полупроводник, отражаются от его поверхности (у большинства полупроводников коэффициент отражения находится в пределах 25 - 36 %), однако большая часть проникает вглубь и отдаёт энергию материалу. В инфракрасной области спектра энергия квантов мала, и они попросту нагревают материал. Если полупроводник не чистый, то атомы примеси создают внутри запрещённой зоны отдельные разрешённые уровни. Поглощение кванта соответствующей энергии приводит к ионизации этих примесей с образованием либо свободных электронов, либо дырок. В чистом полупроводнике поглощение кванта приводит к образованию пары электрон-дырка, если его энергия превышает ширину запрещённой зоны. В обоих случаях увеличение освещённости приводит к увеличению электропроводности, что называют **фотопроводимостью** или **фоторезистивным эффектом**.

Особо высокой светочувствительностью отличается селен Se, электропроводность которого при освещении возрастает примерно в 1000 раз. Селен является характерным примером собственного полупроводника. Селеновые фотоэлементы превращают энергию света в электрическую и могут применяться без дополнительных источников питания, например в фотоэкспонометрах. Их используют как датчики светового потока в системах автоматического включения уличного освещения, при воспроизведении звука со звуковой дорожки кинофильма, при восприятии изображения в телевизионных камерах, в фототелеграфе. Амфотерный селен входит в состав светочувствительных слоёв аппаратов для ксерокопирования. Контакт селена с металлом используется в селеновых выпрямителях. Для изготовления фоторезисторов используют сульфид (CdS) и селенид (CdSe) кадмия, чувствительные к видимому излучению, сульфид свинца (PbS), а также арсенид (InAs) и антимонид (InSb) индия, чувствительные к инфракрасному излучению.

Люминесценцией называют свечение без нагрева, т. е. холодное свечение. Причина люминесценции – возвращение электрона на более низкий энергетический уровень через некоторое время после его возбуждения. Вещества, способные люминесцировать, называются люминофорами – это полупроводники с широкой запрещённой зоной. В зависимости от вида возбужде-

ния люминофора различают фотолюминесценцию (возбуждение светом), катодолюминесценцию (возбуждение электронным лучом) и электролюминесценцию (свечение под действием электрического поля). В газосветных лампах ультрафиолетовое излучение электрического разряда, происходящего в ионизированных парах ртути, с помощью люминофора преобразуется в видимый свет (фотолюминесценция). Спектральный состав света лампы можно изменять подбором люминофора, покрывающего изнутри её стенки. В электронно-лучевых трубках осциллографов, телевизионных кинескопах и электронных микроскопах используется свечение люминофоров при бомбардировке их потоком электронов (катодолюминесценция). Однако наибольший практический интерес вызывает явление свечения под действием электрического напряжения (электролюминесценция), что в немалой степени обусловлено быстрым развитием оптоэлектроники.

Гальваномагнитные эффекты возникают в полупроводнике при одновременном воздействии на него электрического и магнитного полей. На электрон, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца, которая направлена поперёк движения.

Магнитная индукция сбивает их к левой грани полупроводниковой пластины; при этом возрастает сопротивление протеканию электрического тока – это называют магниторезистивным эффектом. По той же причине на боковых гранях пластины появляется разность потенциалов – это называют **эффектом Холла**. Значение поперечной ЭДС Холла пропорционально как силе тока, так и значению индукции магнитного поля. На основе эффекта Холла изготавливают полупроводниковые измерители магнитной индукции и тока, анализаторы спектра, фазочувствительные детекторы, модуляторы.

В очень сильных полях возможен переброс электронов из валентной зоны в зону проводимости. При этом, благодаря своим волновым свойствам электроны способны преодолевать высокие, но тонкие потенциальные барьеры, т. е. проникать сквозь тонкие изоляционные плёнки, что называют **туннельным эффектом**. Туннельный эффект используют в разрядниках для защиты от перенапряжений, а также для создания полупроводниковых элементов с ярко выраженной нелинейной зависимостью тока от напряжения – варисторов и туннельных диодов.

2. Примесные полупроводники и применение р-п-перехода

Примесный – это такой полупроводник, электрофизические свойства которого в основном определяются примесями. Примеси вводят в строго дозированных количествах; они создают дополнительные уровни в запретной зоне. При малой концентрации примесей расстояние между примесными атомами велико, их электронные оболочки не взаимодействуют друг с другом, вследствие этого примесные энергетические уровни являются дискретными, т. е. не расщепляются в зону.

Акцепторные свойства четырёхвалентных кремния и германия проявляют трёхвалентные элементы – алюминий, бор, галлий, индий. Для установ-

ления химических связей с четырьмя соседними атомами у трёхвалентного атома акцептора не хватает одного электрона, вследствие чего одна ковалентная связь оказывается невыполненной. Минимальную энергию, которую необходимо сообщить электрону валентной зоны, чтобы перевести его на акцепторный уровень, называют энергией ионизации акцептора или энергией активации акцепторной примеси. Если к полупроводнику приложить напряжение, то дырка оторвётся от иона и будет постепенно перемещаться к отрицательному электроду, обеспечивая дырочную электропроводность. Условно считают, что в полупроводнике p-типа заряд переносят положительные дырки (лат. *positivus* – положительный).

Типичными донорными примесями в кремнии и германии являются мышьяк, фосфор и сурьма. Они имеют пять электронов на внешнем уровне. Встраиваясь в узел решётки, атом донора использует четыре электрона для образования связей с ближайшими соседями, а пятый электрон оказывается лишним, т.е. не участвует в создании ковалентных связей. Минимальную энергию, которую необходимо сообщить электрону для перевода его с уровня донора в зону проводимости, называют энергией ионизации донора или энергией активации донорной примеси. Электрон притянут к иону донора электростатической силой Кулона, но под действием приложенного напряжения легко отрывается и перемещается к положительному электроду, обеспечивая электронную электропроводность полупроводника n-типа (лат. *negativus* – отрицательный)

Электропроводность примесного полупроводника определяется концентрацией и подвижностью носителей зарядов и сложным образом зависит от температуры. В процессе активации примесей, по мере увеличения температуры растёт число носителей заряда, вовлечённых в процесс электропроводности, а значит и проводимость. Однако, когда все примеси ионизируются, этот рост заканчивается и, при дальнейшем увеличении температуры, наблюдается спад электропроводности, вызванный уменьшением подвижности носителей зарядов. При дальнейшем нагреве начинается ионизация собственных атомов полупроводника, и электропроводность резко возрастает. Работа большинства усилительных и переключающих полупроводниковых приборов происходит в режиме использования примесной электропроводности.

Рассмотрим процессы, происходящие на границе двух участков полупроводника с различным типом электропроводности, называемой **p-n-переходом**. При этом пятые электроны доноров покидают свои оболочки и дополняют оболочки близко расположенных трёхвалентных акцепторов, комплектуя четырех ковалентную связь. При этом доноры превращаются в положительные, а акцепторы – в отрицательные ионы и возникает область объёмного заряда, толщина которой может быть от единиц до десятков межатомных расстояний, и чем больше легирующих примесей, тем она тоньше. Эту область, в которой находятся положительные ионы доноров и отрица-

тельные ионы акцепторов, а подвижных носителей зарядов нет; можно рассматривать как заряженный конденсатор.

При подаче на р-п-переход внешнего напряжения прямой полярности область объёмного заряда становится тоньше, а затем исчезает, и р-п-переход проводит электрический ток. Большая часть прямого напряжения, прикладываемого к р-п-переходу, затрачивается на то, чтобы поднять энергию электрона до уровня зоны проводимости, и совсем немного – на продвижение электрона по n-участку и дырок по р-участку. Суммарное напряжение на открытом р-п-переходе в основном определяется шириной запрещённой зоны полупроводника и слабо зависит от тока.

У широкозонных полупроводников при «падении» электрона из зоны проводимости в валентную излучается квант света, величина которого соответствует ширине запрещённой зоны; это используют в светодиодах и полупроводниковых лазерах. От ширины запрещённой зоны зависит цвет свечения. В сильно легированных полупроводниках объёмная зона зарядов тонкая; подвижный электрон как волна может проскочить в зону проводимости р-участка даже при очень малых значениях прямого напряжения; это используют в туннельных диодах. Однако увеличение объёмного электрического заряда происходит непропорционально росту напряжения, а ёмкость р-п-перехода уменьшается; это используют в варикапах. Изоляционные свойства закрытого р-п-перехода сохраняются до пробоя, который может быть туннельным, лавинным и тепловым. При лавинном пробое напряжение на р-п-переходе почти не зависит от тока; это используют в стабилитронах, используемых в параметрических стабилизаторах напряжения. При тепловом пробое полупроводник выходит из строя.

3. Получение и применение германия

Германий относится к числу очень рассеянных элементов, т. е. часто встречается в природе, но присутствует в различных минералах в очень небольших количествах. В настоящее время основными источниками промышленного получения германия являются побочные продукты цинкового производства, коксования углей, а также германиевые концентраты, получаемые из медно-свинцовых руд.

Из исходного сырья получают тетрахлорид германия, который переводят в диоксид, а затем восстанавливают в водородной печи при температуре 650 - 700 °С до состояния металлического порошка и сплавляют в слитки. Возможно получение порошка германия и путём непосредственного разложения тетрахлорида. С целью получения германия, пригодного для полупроводникового приборостроения, его очищают от загрязнений методом зонной плавки, который изображён в схематическом виде на рисунке 7.1.

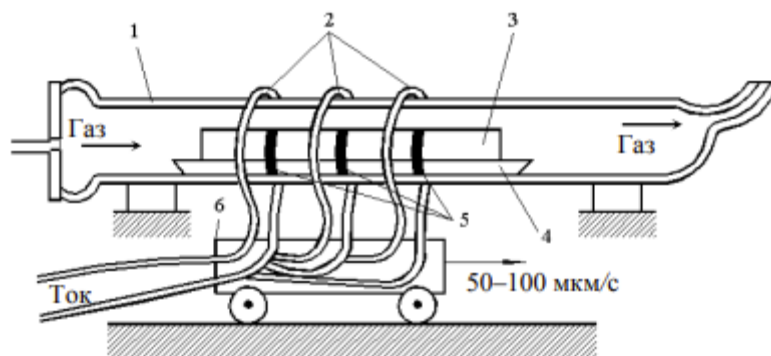


Рисунок 7.1 – Процесс очистки слитка германия методом зонной плавки

Процесс зонной плавки германия проводится в атмосфере водорода или инертных газов, или их смеси. В кварцевую трубу 1, расположенную внутри индуктора 2, помещают подвергаемый очистке слиток 3 в графитовой лодочке 4. По индуктору протекает высокочастотный ток, который нагревает и расплавляет зону 5 шириной 40 - 50 мм. С помощью подвижной каретки 6 расплавленную зону медленно (со скоростью 50 - 100 мкм/с) перемещают вдоль образца. В ходе зонной плавки все примеси захватываются жидкой фазой и вместе с ней уносятся в хвостовую часть слитка, которая обрезается по окончании процесса очистки. Выкристаллизовывается чистый металл. Длина слитка может превышать 1 м. Требуемая степень чистоты достигается после 5–8 последовательных проходов расплавленной зоны в одном направлении; качество контролируют путём измерения удельного электрического сопротивления материала. Для ускорения процесса очистки по длине слитка создают не одну, а несколько расплавленных зон. В этом случае один проход нагревателя эквивалентен сразу нескольким циклам очистки.

В импульсных диодах для достижения высокой скорости переключения германий легируют золотом. Благодаря относительно высокой подвижности носителей заряда германий применяют для изготовления датчиков Холла и других магниточувствительных приборов. В нормальных условиях чистый германий прозрачен для электромагнитного излучения с длиной волны более 1,8 мкм, что позволяет использовать его для изготовления фототранзисторов и фотодиодов, оптических линз с большой светосилой (для инфракрасных лучей), оптических фильтров, модуляторов света и коротких радиоволн, а также счётчиков ядерных частиц. Рабочий диапазон температур германиевых приборов – от минус 60 до плюс 70 °С. Невысокий верхний предел рабочей температуры является основным недостатком изделий из германия.

4. Получение и применение кремния

Кремний является одним из самых распространённых элементов, в земной коре его содержится 29,5 % (по массе). Наиболее распространённым соединением этого элемента является диоксид кремния SiO_2 в виде минерала кварца и кварцевого песка. По сравнению с германием у кремния меньше размеры атомов и период кристаллической решётки, что обуславливает более

сильную ковалентную химическую связь и, как следствие этого, большие ширину запретной зоны, удельное электрическое сопротивление и допустимую рабочую температуру. Технический кремний, содержащий около 1 % примесей, получают при восстановлении его из оксидов с углеродом в электрических печах.

Технология получения и применения кремния полупроводниковой чистоты включает в себя следующие операции:

- 1) превращение технического кремния в легколетучую жидкость – трихлорсилан SiHCl_3 ;
- 2) очистка трихлорсилана физическими и химическими методами;
- 3) термическое разложение с выделением чистого кремния;
- 4) кристаллизационная очистка с применением зонной плавки;
- 5) выращивание монокристаллов вытягиванием из расплава;
- 6) эпитаксия.

При зонной плавке кремния, из-за высокой температуры, графитовые лодочки применять нельзя, поэтому слиток располагают вертикально, а расплавленный кремний удерживается силами поверхностного натяжения. Методом вытягивания из расплава выращивают монокристаллы кремния диаметром до 150 мм и длиной до метра с нужным типом проводимости и широким диапазоном значений удельного сопротивления, однако, из-за высокой температуры, эти монокристаллы загрязнены кислородом из кварцевого тигля.

Эпитаксия кремния. При изготовлении кремниевых приборов и интегральных микросхем важную роль играют технологии эпитаксиального осаждения тонких слоёв. Термин «эпитаксия» означает ориентированное наращивание кристаллической плёнки одного вещества на поверхности другого кристалла, служащего подложкой. Наиболее распространённый вариант промышленной технологии получения кремниевых эпитаксиальных слоёв основан на процессе водородного восстановления тетрахлорида кремния в соответствии с реакцией, изображённой на рисунке 7.2:

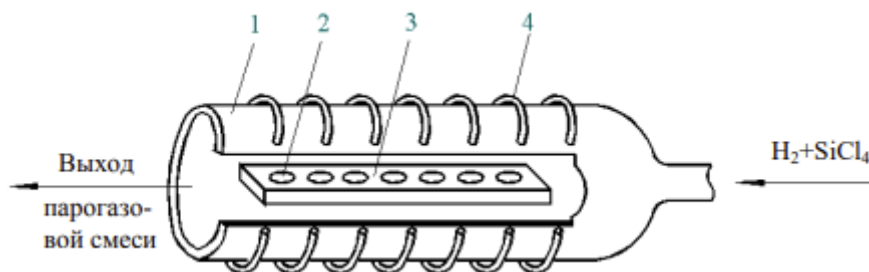
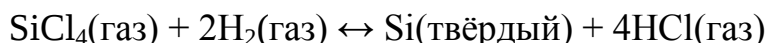


Рисунок 7.2 – Процесс выращивания монокристаллических плёнок кремния
 $\text{H}_2 + \text{SiCl}_4$ парогазовой смеси

Реакция протекает в кварцевых реакторах 1 при температурах порядка 1200 °С; подложками служат монокристаллические пластины кремния 2,

расположенные на графитовой подставке 3; для нагрева используют высокочастотный индуктор 4. Подложки вырезают из слитков и предварительно подвергают механической и химической полировке.

В ряде случаев при изготовлении интегральных микросхем эпитаксиальные слои кремния осаждают на диэлектрические подложки. В качестве материала таких подложек используют различные монокристаллы: сапфир (Al_2O_3), шпинель ($\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), берилл ($\text{Al}_2\text{Be}_3[\text{Si}_6\text{O}_{18}]$), кварц (SiO_2) и др. Ориентированное выращивание монокристаллических плёнок кремния на диэлектрических подложках открывает возможности создания интегральных микросхем с практически идеальной изоляцией элементов.

Изоляционные оксидные плёнки из SiO_2 получают методом термического окисления чистым кислородом или парами воды при температуре 1000 - 1300 °С. Они имеют стеклообразную структуру и по свойствам близки к расплавленному кварцу. Кремний является основным материалом при изготовлении интегральных микросхем, а также дискретных полупроводниковых приборов. Из кремния изготавливают выпрямительные, импульсные и СВЧ-диоды, стабилитроны, тиристоры, низкочастотные и высокочастотные, мощные и маломощные биполярные транзисторы, полевые транзисторы и приборы с зарядовой связью; рабочие частоты кремниевых приборов достигают 10 ГГц.

Кремниевые выпрямительные диоды и тиристоры могут выдерживать обратные напряжения до нескольких киловольт и пропускать ток в прямом направлении до нескольких килоампер. Кремниевые стабилитроны, в зависимости от степени легирования материала, имеют напряжение стабилизации от 3 до 400 В.

Чистый кремний прозрачен для электромагнитного излучения с длиной волны более 1,1 мкм. Кремниевые фоточувствительные приборы, особенно фотодиоды, отличаются высоким быстродействием. Спектр фоточувствительности кремниевых фотодетекторов лежит в пределах 0,3 - 1,1 мкм и хорошо согласуется со спектром излучения лазеров. Кремниевые фотоэлементы, под названием солнечных батарей, применяют для получения электрической энергии, их коэффициент полезного действия доходит до 10 - 12 %. Кремний применяют для изготовления тензодатчиков, в которых используется сильная зависимость удельного электрического сопротивления кремния от механических напряжений. При изготовлении больших интегральных микросхем используют поликристаллический кремний, который может выполнять функции резистора, проводникового соединения, а также контактного соединения с различными областями кристаллов. Осаждение плотного мелкозернистого слоя поликристаллического кремния проводят по способу термического разложения силана SiH_4 при температуре 700 - 1000 °С. Для получения высокой электропроводности поликристаллический кремний легируют.

Аморфный кремний выступил в качестве более дешёвой альтернативы монокристаллическому, например, при изготовлении на его основе солнечных элементов. Аморфные пленки Si по своим свойствам не представля-

ют практического интереса, однако при добавке водорода получают **гидрированный кремний** Si:H. Его можно легировать традиционными донорными (фосфор P, мышьяк As) и акцепторными (бор B) примесями, придавая ему электронный или дырочный тип проводимости, создавать в нем p-n-переходы. Оптическое поглощение аморфного кремния в 20 раз выше, чем кристаллического. Поэтому для существенного поглощения видимого света достаточно пленки Si:H толщиной 0,5 - 1 мкм вместо дорогостоящих кремниевых 300-мкм подложек. По сравнению с поликристаллическими кремниевыми элементами изделия на основе Si:H производят при более низких температурах (300 °C). На основе гидрированного кремния синтезирован ряд аморфных полупроводников, обладающих интересными электрическими и оптическими свойствами: Si1-XCX:H, Si1-XGeX:H, Si1-XNX:H, Si1-XSnX:H. Гидрированный кремний является прекрасным материалом для создания светочувствительных элементов в ксерографии, датчиков первичного изображения (сенсоров), мишеней видеоконфигураторов для передающих телевизионных трубок. Оптические датчики из гидрированного аморфного кремния используются для записи в памяти видеоинформации, для целей дефектоскопии в металлургической и текстильной промышленности, в устройствах автоматической экспозиции и регулирования яркости. Температурный диапазон кремниевых приборов – до 180 °C.

Контрольные вопросы

1. Какие из химических элементов, обладающих свойствами полупроводников, имеют наибольшее значение для электротехники и электроники?
2. Что такое собственные полупроводники? Для чего их применяют?
3. Что такое фоторезистивный эффект? Эффект Холла?
4. Какие примеси являются донорами, а какие акцепторами?
5. Как проводимость примесного полупроводника зависит от температуры?
6. Какие процессы происходят на контакте p- и n-полупроводников?
7. Какие технологические операции используют для очистки германия?
8. Как изготавливают монокристаллы германия?
9. Какие технологические операции используют для очистки кремния?
10. Какие преимущества кремния обусловили его широкое применение?
11. Что такое эпитаксия? В чем особенности и преимущества эпитаксиальных технологий?
12. Для чего применяют поликристаллический и аморфный и гидрированный кремний?

Пронина Анна Константиновна

**ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ
МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ**

*Методические указания
к выполнению практических работ*

В авторской редакции

Изд. № 43/2024. Объем 3 п.л. Усл. печ. л. 2,79. Уч.-изд. л. 2,94.
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»