



ТЕХНИЧЕСКИ УНИВЕРСИТЕТ – ВАРНА
катедра „Електроенергетика“



РАЗРАБОТЕНИ ТЕМИ ЗА ДЪРЖАВЕН ИЗПИТ
ЗА ОБРАЗОВАТЕЛНО-КВАЛИФИКАЦИОННА СТЕПЕН

„БАКАЛАВЪР“

СПЕЦИАЛНОСТ „ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКА“

РАЗДЕЛ I

**„Електротехнически материали, техника на високите напрежения
и техническа безопасност“**

Съставил:

доц. д-р инж. М.Василева, гл.ас. д-р инж. М.Иванова, ас. Инж.
Р.Димитрова

Версия 02.2019 г.

СЪДЪРЖАНИЕ

ТЕМА 1. Електрически процеси в диелектрици	3
1.1. Явления в диелектрик под действие на електрично поле	3
1.2. Поляризация	3
1.3. Електропроводимост на диелектриците.....	4
1.4. Диелектрични загуби	7
ТЕМА 2. Газообразни и течни електроизолационни материали	8
2.1. Газообразни диелектрици.....	8
2.2. Течни диелектрици	9
2.2.1. Нефтени (минерални) масла	9
2.2.2. Растителни масла.....	10
2.2.3. Синтетични течни изолационни материали.....	11
ТЕМА 3. Твърди електроизолационни материали.....	13
3.1. Органични твърди диелектрици моли	13
3.2. Неорганични диелектрични материали.....	18
3.2.1. Керамики	18
3.2.2. Стъкла.....	20
3.2.3. Слюда	22
3.3. Многокомпонентни диелектрици	23
3.3.1. Компаунди.....	23
3.3.2. Лакове.....	23
3.3.3. Слоести пластмаси.....	24
ТЕМА 4. Проводникови материали	27
4.1. Общи сведения.....	27
4.2. Електрична проводимост на металите.....	27
4.3. Влияние на различни фактори върху електропроводимостта на металите	28
4.3.1. Влияние на температурата.....	28
4.3.2. Влияние на примесите върху електропроводимостта на металите. Специфично съпротивление на сплави	28
4.3.3. Изменение на специфичното съпротивление на металите при деформация... ..	29
4.3.4. Съпротивление на проводниците при високи честоти	29
4.4. Сврхпроводимост и хиперпроводимост	30
4.5. Термоелектродвижещо напрежение	31
4.6. Най-често използвани проводникови материали.....	32
4.6.1. Материали с голяма електропроводимост	32
4.6.2. Проводникови материали с голямо съпротивление.....	33

4.6.3. Проводникови материали за контакти	34
ТЕМА 5. Полупроводникови материали. (Нелинейни елементи на базата на полупроводникови химични съединения)	36
5.1. Общи сведения	36
5.2. Структура на елементарните полупроводникови материали.....	36
5.3. Собствена проводимост на полупроводниците	36
5.4. Примесна проводимост	38
Примеси, които обуславят дупчестата проводимост, се наричат <i>акцептори</i>	38
5.5. Зависимост на проводимостта от различни фактори	39
5.5.1. Температурна зависимост на проводимостта.	39
5.5.2. Влияние на деформацията върху проводимостта на полупроводниците	40
5.5.3. Фотопроводимост	40
5.5.4. Електропроводимост на полупроводниците в силно електрично поле	41
5.5.5. Свойства на PN преход	41
5.6. Видове полупроводникови материали	44
5.6.1. Химични елементи със свойствата на полупроводници.....	44
5.6.2. Химични съединения със свойствата на полупроводници.....	45
5.6.3. Оксидни полупроводникови материали	46
ТЕМА 6. Магнитни материали.....	47
6.1. Основни понятия	47
6.2. Видове магнетизъм	48
6.3. Криви на намагнитване.....	49
6.4. Ефекти в магнитните материали	51
6.4.1. Магнитострикция.....	51
6.4.2. Загуби на енергия в магнитните материали	51
6.4.3. Зависимост на магнитните характеристики от различни фактори.....	52
6.5. Класификация на магнитните материали	53
6.5.1. Магнитно меки материали за ниска честота	54
6.5.2. Магнитно меки материали за висока честота.....	55
6.5.3. Магнитно твърди материали.....	56
6.5.4. Магнитни материали със специално предназначение	56
ДОПЪЛНИТЕЛНА ЛИТЕРАТУРА.....	59

ТЕМА 1. Електрически процеси в диелектрици

1.1. Явления в диелектрик под действие на електрично поле

Характерен за всеки диелектрик процес, осъществяващ се при въздействие с електрично поле, е явлението *поляризация* – ограничено и обратимо преместване на електрични заряди на микроскопични или макроскопични разстояния в пределите на един образец.

В диелектриците се съдържа неголям брой свободни заряди, които обуславят протичането през тях на малък ток – осъществява се явлението *електропроводимост*.

Проводимостта и евентуално поляризацията са причини за загряване на диелектрика, което е свързано с явлението *диелектрични загуби*.

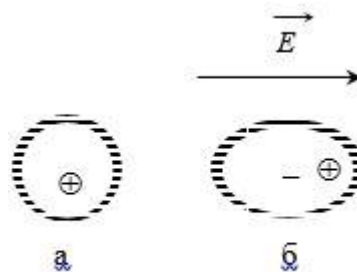
Всеки диелектрик може да бъде използван само при напрежения, непревишаващи някаква гранична стойност, характерна за него при определени условия. При по-високи напрежения настъпва *пробив в диелектрика* – загуба на неговите електроизолационни свойства.

1.2. Поляризация

Механизъм на явлението

Диелектричната поляризация е явлението, при което под действие на електричното поле се преместват ограничено и обратимо свързани електрични заряди (в някой случа и свободни заредени частици).

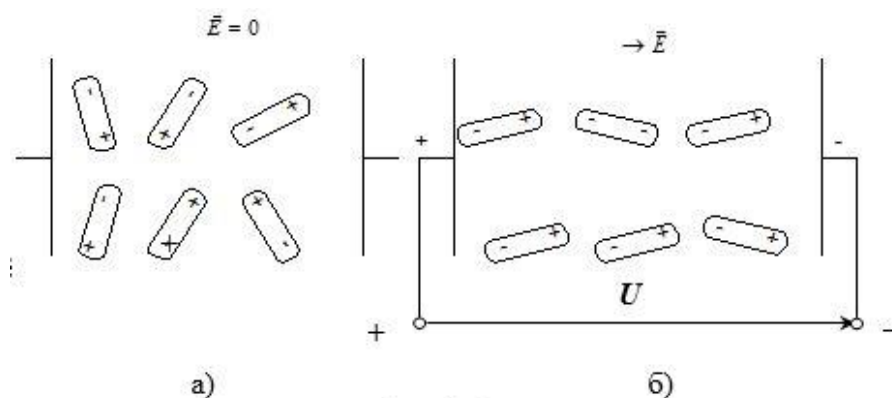
При поляризация в неполярните молекули електронните обвивки на атомите се изместват обратно на посоката на полето. Ядрата, като по-масивни, се преместват на пренебрежимо малки разстояния по посока на полето. В резултат молекулите придобиват индуцирани диполни моменти. Явлението се нарича *електронна поляризация*. Тя се извършва във всички диелектрици. Фиг. 1.1 илюстрира електронна поляризация на атом.



Фиг. 1.1

За оценка на електричните свойства на диелектриците важно значение има класифицирането им на неполярни и полярни.

Диполите в полярните диелектрици при отсъствие на електрично поле са ориентирани хаотично (фиг. 1.2.а). Под действие на електричното поле те се стремят да се ориентират по посока на полето (фиг.1.2.б). На завъртането и установяването им в това положение се противопоставят междумолекулните сили и топлинното движение на молекулите. Затова диполите успяват да се насочат само частично. Това е механизмът на *диполно- релаксационната поляризация*.



Фиг. 1.2

В различните диелектрици могат да се осъществяват и други видове поляризации. Те се делят на две групи – бързи, извършващи се за време, по-малко от 10^{-10} s, и бавни (релаксационни), извършващи се за повече от 10^{-10} s. Електронната поляризация е бърза (практически мигновена), а диполно-релаксационната – бавна.

Величината, означена с ϵ_r , се нарича *относителна диелектрична проникваемост* – тя е свързана с процеса поляризация и е една от най-важните характеристики на диелектриците.

Относителната диелектрична проникваемост на един диелектрик е число, което показва колко пъти се увеличава капацитетът на вакуумен кондензатор, когато между електродите му е поставен съответният диелектрик.

$$\epsilon_r = \frac{C}{C_0}$$

Неполярните диелектрици се характеризират с малка стойност на ϵ_r (най- често между 1,9 и 2,8); за полярните диелектрици ϵ_r има по-големи стойности (от 3 до няколко десетки). (Това твърдение не е правило, а само тенденция, от която има изключения. Например за диаманта, който е неполярен диелектрик, $\epsilon_r = 5,6 \div 5,8$).

1.3. Електропроводимост на диелектриците

Основни понятия

По своето предназначение диелектриците, поставени в неизменящо се във времето електрично поле, не трябва да провеждат електричен ток.

Обаче, както показва опитът, през всички диелектрици под действие на постоянно напрежение U преминава някакъв, обикновено твърде незначителен ток, наречен ток на проводимостта или утечен ток I_{np} .

Електропроводимостта на диелектриците се обуславя от движението по направление на електричното поле на свободни заредени частици.

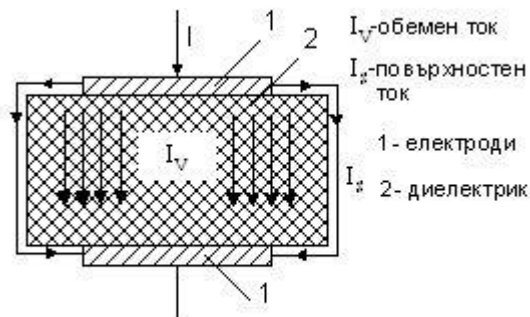
В течните и повечето твърди диелектрици проводимостта е йонна. Йоните могат да бъдат на самия диелектрик и на примесите.

Някои газове и много малък брой твърди диелектрици притежават и електронна проводимост. Електронната проводимост е значителна във всички диелектрици при пробив.

Електричното съпротивление на електроизолационна конструкция $R_{из}$ съгласно закона на Ом е:

$$R_{из} = \frac{U}{I_{np}}$$

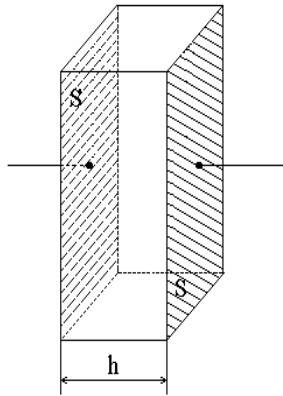
При постоянно напрежение, приложено към образец от твърд електроизолационен материал, ток тече през обема (обеман ток I_v) и по повърхността му (повърхностен ток I_s) (фиг. 1.3). Съответно той притежава обемно съпротивление R_v и повърхностно съпротивление R_s .



Фиг. 1.3

Специфично обемно и специфично повърхностно съпротивление

Обемното и повърхностно съпротивление (R_v и R_s) са характеристики на конкретна електроизолационна конструкция – те зависят от геометрията на изолятора и електродите, посредством които се прилага напрежение, както и от материала и условията на средата – температура, влажност и др.



Фиг. 1.4

За характеризиране на веществото по отношение на неговата електропроводимост се въвеждат величините *специфично обемно съпротивление* ρ_v и *специфично повърхностно съпротивление* ρ_s .

Обемното съпротивление на образец от диелектрик с форма на плоско-паралелна пластина, намираща се между 2 успоредни електрода, всеки с площ S и разстояние между тях h (фиг. 1.4) е:

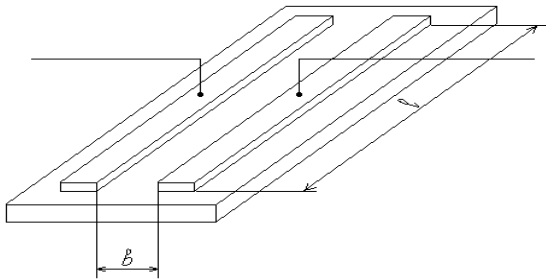
$$R_v = \rho_v \frac{h}{S}, \quad (1.1)$$

откъдето следва:

$$\rho_v = \frac{R_v S}{h}, \Omega \cdot m \quad (1.2)$$

За диелектриците $\rho_v > 10^7 \Omega \cdot m$

Съпротивлението на част от повърхността на твърд електроизолационен материал R_s , намиращ се между 2 успоредни електрода, всеки с дължина l и разстояние между тях b (фиг. 1.5) е:



Фиг. 1.5

$$R_s = \rho_s \frac{b}{l} \quad (1.3)$$

От уравнение (1.3) следва:

$$\rho_s = R_s \frac{l}{b}, \Omega \quad (1.4)$$

Реципрочните стойности на ρ_v и ρ_s се наричат съответно специфична обемна електрична проводимост (γ_v) и специфична повърхностна електрична проводимост (γ_s):

$$\gamma_v = \frac{1}{\rho_v}; \quad \gamma_s = \frac{1}{\rho_s}.$$

Дименсиите им са: за γ_v - $\frac{S}{m}$; за γ_s - S. (S – Сименс).

ρ_v и ρ_s , респективно γ_v и γ_s не зависят от геометрията на образца и електродите, а само от веществото и условията, при които то се намира.

С величините R_s , ρ_s , γ_s се характеризират само твърдите диелектрици.

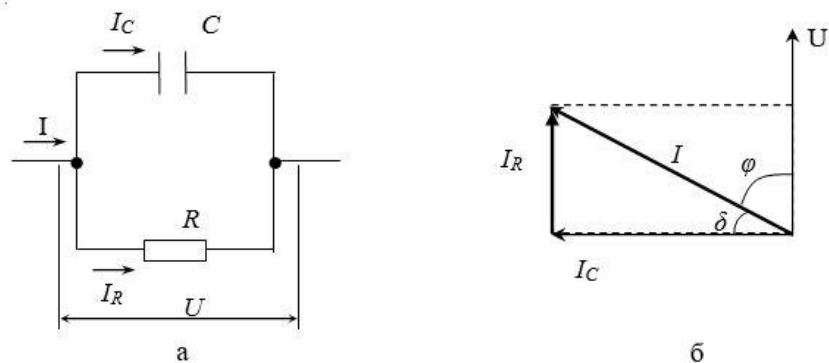
1.4. Диелектрични загуби

Електричната енергия, която се отделя в диелектрик за единица време (1 s) под действие на приложено върху него напрежение и се превръща в топлина, се нарича диелектрични загуби.

Изразходваната за единица време енергия е мощност. Означава се с P_a ; дименсията ѝ е Ват (W).

Диелектричните загуби имат две компоненти. Едната се дължи на електропроводимост. Тя съществува както при постоянно, така и при променливо електрично поле. Другата се проявява само под действие на променливи полета в полярни диелектрици и е свързана с триене между частиците при непрекъснатото им преориентиране. Тя обикновено е много по-голяма от първата.

За да се характеризират диелектричните загуби, се изхожда от представата, че електроизолационна конструкция, намираща се под синусоидално изменящо се напрежение, се проявява като реален кондензатор. Една възможна негова заместваща схема се състои от паралелно свързани идеален кондензатор с капацитет C и активно съпротивление R (фиг. 1.6.а).



Фиг.1.6.

На фиг.1.6.б е показана съответната векторна диаграма на напрежението и токовете. Ъгъл δ , допълващ фазовата разлика φ между напрежението и тока до 90° се нарича ъгъл на диелектричните загуби. $\operatorname{tg} \delta$ е важен параметър на материалите. За схемата от фиг. 1.6а мощността на загубите е:

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta, \quad (1.5)$$

където ω е кръговата честота.

В неполярните диелектрици загубите са незначителни. Техният $\operatorname{tg} \delta$ е малък – от порядъка на 10^{-4} . Те могат да работят както при ниски, така и при високи честоти. Затова се наричат *високочестотни диелектрици*.

Полярните диелектрици се характеризират с повишени или големи диелектрични загуби ($\operatorname{tg} \delta$ е от порядъка на $10^{-1} \div 10^{-3}$). За тях P_a расте с повишаване на честотата, поради което те не са подходящи за използване при високи честоти.

ТЕМА 2. Газообразни и течни електроизолационни материали

2.1. Газообразни диелектрици

Газообразното е най-неустойчивото структурно състояние на веществото. Газовете имат най-малка плътност от всички диелектрици. Поради голямата топлинна енергия, която притежават, молекулите им преодоляват силите на взаимно привличане и се движат свободно в пространството, изпитвайки въздействие само при сблъскване една с друга.

Въздух

Въздухът е полярен газ, поради съдържанието на влага. При нормално налягане има плътност $1,293\text{kg/m}^3$.

Недостатъци на въздуха: може да съдържа до 4 обемни процента водни пари, влашаващи съществено електроизолационните му свойства; кислородът, влизащ в състава му предизвиква окисляване на материалите, с които въздухът влиза в съприкосновение, поради което се понижават характеристиките им.

Компоненти на въздуха

Като електроизолационни газове намират практическо приложение всички основни компоненти на въздуха с изключение на кислорода. За тях може да се посочи следното: имат подобни свойства, но и някои съществени предимства, в сравнение с въздуха.

Азот и въглероден диоксид. Неполярни са, не горят и не поддържат горенето. Употребяват се (под налягане, с което се повишава неколкостранно електричната им якост) в кондензатори за високи напрежения, кабели и трансформатори.

Водород. Също е неполярен, има много малка плътност и добра топлопроводност, поради което е подходяща изолация за движещи се и имащи нужда от охлаждане конструкции.

Недостатъците му са, че образува в много големи съотношения с въздуха взривоопасна смес (гърмящ газ).

Използва се за изолация и охлаждане на големи електрически машини с херметично затворена конструкция.

Инертни газове: аргон, неон и други.

Имат ниска електрична якост и малка топлопроводност (особено криптона и ксенона), което ги прави приложими за електровакуумни прибори и осветителни лампи. Най-ниска електрична якост има хелият – около 17 пъти по-малка от тази на въздуха.

Пари на метали

Парите на някои метали и техните съединения (най-вече живакът и натрият) имат подобни свойства и приложение както инертните газове (главно в осветителната техника).

Електроотрицателни газове

Характерна тяхна особеност е, че молекулите им присъединяват към себе си свободни електрони, превръщайки се по този начин в отрицателни йони. За да могат те да осъществят ударна йонизация е необходим по-голям интензитет на електричното поле, отколкото при йонизация от електрони. Благодарение на това те имат значително по-голяма електрична якост от въздуха.

Най-голямо приложение от тях като електроизолационни материали намират:

Елегаз. Той е безцветен, без мирис, химически инертен и топлоустойчив. Теплопроводността му е близка до тази на въздуха и значително се повишава след като се прибави хелий към него.

Електричната якост на елегаза е от 2,5 (при равномерни полета) до 5 пъти (при силно неравномерни полета) по-голяма от тази на въздуха и се повишава чрез сгъстяването на елегаза, което може да достигне 1MPa без втечняване.

Елегазът се употребява за изолация на кабели, кондензатори, комплексни разпределителни устройства и др.

Фреон. Има близка до тази на елегаза електрична якост, но при нормални условия може да се сгъсти само до 0,6 MPa и при ниски (в работния диапазон на повечето съоръжения) температури се втечнява. Намира подобно приложение като елегаза.

Газообразни перфлуорирани въглеродороди, т.е. въглеродороди, в които всички водородни атоми са заместени с флуорни – най-общо съставът им е C_xF_x . В зависимост от конкретния състав електричната им якост е $6 \div 10$ пъти по-голяма от тази на въздуха.

Освен самостоятелната употреба електроотрицателните газове намират приложение и като добавки с незначителна концентрация към въздуха, което подобрява неколкостранно електроизолационните му свойства.

2.2. Течни диелектрици

Течностите имат значително по-голяма плътност от газовете, но подобно на тях нямат постоянна структура и форма.

В електротехниката намират приложение като електроизолационни материали следните течни диелектрици:

2.2.1. Нефтени (минерални) масла

Те са продукти на фракционната дестилация на нефта, подложени на допълнително пречистване. Представяват смеси на въглеродорода.

В зависимост от степента на допълнително пречистване и предназначението им, се наричат трансформаторно, кондензаторно и кабелно масло.

Трансформаторното масло е почти безцветна до тъмно-жълта течност, по-лека от водата, с малък вискозитет, гори (температура на възпламеняване $135 \div 145^\circ\text{C}$) и е

хигроскопична. Има добри електроизолационни, импрегниращи и топлоотнемащи свойства.

Електричните свойства на трансформаторното масло зависят много от срока и начина на експлоатацията му. След продължителна работа в резултат от съприкосновението с въздуха и под въздействието на топлината, светлината, контакт с металите и т.н. трансформаторното масло се окислява. Образуват се замърсяващи продукти – киселини, смоли, част от които се разтварят в него, а друга се утаява на дъното на съда. Поема влага от околната среда. Такова (остаряло) трансформаторно масло се нарича експлоатационно и има понижени параметри. Прибавянето на инхибитори (антиокислителни вещества) забавят стареенето му. Остарялото масло може частично или напълно да възстанови свойствата си след подлагането му на регенерация, чрез няколкостепенна обработка със специални адсорбенти. Регенерираното трансформаторно масло се нарича свежо.

Освен споменатите предимства трансформаторното масло е евтин материал и силно газоотделя в съприкосновение с електрична дъга, т.е. има дъгогасящи свойства.

Трансформаторното масло се използва широко за изолация, импрегниране и охлаждане в редица електрични апарати.

Кондензаторно масло – това е особено щателно пречистено с абсорбенти нефтено масло с оглед получаване на по-добри електроизолационни свойства. Използва се за импрегниране на хартиени кондензатори.

Кабелно масло – също щателно пречистено и добре обезгазено нефтено масло, предназначено за импрегниране на хартиена изолация в силовите кабели. Има две разновидности кабелно масло: малко вискозно – за работни напрежения над 35kV и вискозно (постига се чрез прибавяне към маслото на 10÷30% колофон) – за работни напрежения до 35kV.

2.2.2. Растителни масла

Употребяваните като електроизолационни материали се подразделят на изсъхващи и неизсъхващи.

Изсъхващите масла са течни, но в електроизолационните конструкции се втвърдяват и се използват като твърди диелектрици. От тези растителни масла най-голямо приложение намират лененото и тунговото масло. Съхнат в тънки пластове под действие на светлината, топлината, кислорода. За ускоряване на съхненето към тях се прибавят сикативи (катализатори), но в ограничено количество, тъй като ускоряват стареенето им.

Предимствата им са, че са евтини, при съхненето им не се отделят газове (не се образуват шупли). Те са термореактивни, но гъвкави.

Недостатъци: слабо полярни са и не много влагоустойчиви, бързо стареят.

След прибавяне към тях на колофон, битуми или синтетични смоли (за повишаване на влагоустойчивостта и твърдостта им) растителните изсъхващи масла се употребяват като маслени лакове.

Неизсъхващите масла се течни и се използват като течни диелектрици. Най-голямо приложение от тях намира рициновото масло – полярна, вискозна, практически негорима и взривобезопасна течност. Употребява се за импрегниране на хартиената изолация в херметически затворени кондензатори.

2.2.3. Синтетични течни изолационни материали

Независимо от добрите електроизолационни свойства на естествените течни диелектрици, те не винаги са удовлетворителни. За това се е наложило разработването на синтетични електроизолационни материали. Най-употребяваните от тях са:

Хлорирани въглеводороди. Получават се от различни въглеводороди чрез замяна в тяхната молекула на няколко (или всички) атоми на водорода с хлорни атоми. Един от представителите на тази група е хлорираният дифенил.

Среща се под търговските наименования совол, клофен, пиринел и др. Това е прозрачна безцветна, полярна, токсична течност. Не гори и е взривобезопасна.

Недостатъците му са, че при температури под 0°C има опасност от замръзване; поради токсичността му трябва да се вземат специални мерки при работа с него; поради големия му вискозитет не може да се използва за охлаждане на трансформатори. Последният недостатък се преодолява чрез разреждане на совола с трихлорбензол – така получената течност се нарича *совтол*.

Соволът намира приложение за импрегниране на силови кондензатори за високо и ниско напрежение за компенсиране $\cos\varphi$ на електричната мрежа.

Силициевоорганични течности. Това са течни полимери, съдържащи повтаряща се силиконова група $-\text{Si} - \text{O} - \text{Si} - \text{O} -$; атомите на силиция се свързват с органични радикали. В зависимост от вида на тези радикали се различават полиметилсилоксенови, полиетиленсилоксенови и полиметилфенилсилоксенови течности.

Всички силициевоорганични течности са неполярни, с малки диелектрични загуби и работен температурен диапазон от -60 до $+200^\circ\text{C}$, в които свойствата им не се изменят. Практически не горят. Не са хигроскопични.

Недостатъкът им е, че са скъпи, което ограничава употребата им.

Използват се за импрегниране и заливане на малки по размери отговорни електрични апарати, предназначени да работят в условия на повишени температури.

Флуороорганични течности. Те са производни на въглеводородите, амините и т.н., в които водородът частично или напълно е заменен с флуорни или с флуорни и хлорни атоми. Най-голямо приложение намират трифлуортрихлоретана и дихлортетрафлуоретана. Тези течности са неполярни, топлоустойчиви (имат работни температури до 200°C) и

нехигроскопични. Химически са много стабилни, не горят и не поддържат горенето. До 300°C не отделят токсични газове. Добре топлоотнемат и са малко вискозни.

Недостатъкът им е, че са леснолетливи, поради което трябва да се употребяват в херметически затворени конструкции, като се има предвид, че притежават много голямо температурно разширение. Много са скъпи.

Употребяват се за заливане и импрегниране на малки апарати, където се изисква пълна взриво- и пожаробезопасност и работа при повишени температури.

ТЕМА 3. Твърди електроизолационни материали

Това са най-голямата група диелектрици в електротехниката, отличаващи се с многообразие в структурно отношение, което определя и големите граници, в които се намират електричните и неелектричните им свойства.

3.1. Органични твърди диелектрици моли

Според начина на получаването си биват: естествени; изкуствени (естери и хидрати на целулозата) и синтетични.

Естествени органични диелектрици

Шеллак. Отделя се от един вид насекоми по клоните на тропическите дървета в Индия, Индонезия, Бирма и др. Има вид на тънки, чупливи люспи. Цветът му е светло-лимонов до тъмнооранжев. Разтваря се много добре в спирт, а частично – в ацетон и етер. В бензин и бензол не се разтваря.

Употребява се във вид на спиртов разтвор като съставен елемент при производството на слепващи лакове, слюдени изолации и за лакиране на различни детайли.

Колофон. Получава се при дестилация на борова смола. Цветът му е светложълт до кафяв. Разтваря се в спирт, бензин, бензол, терпентин, ацетон, нефтени и растителни масла. Неразтворим е във вода. Той е термопластичен. Съдържанието на киселини му придава способност да образува с металите соли (резинати), служещи като сикативи в изсъхващите масла. При температури по-високи от 150°C разтваря оксидите на медта.

Намира приложение:

- влизайки в състава на редица компаунди с цел да се увеличи твърдостта им и да се подобрят електричните им характеристики;
- разтворен в нефтените масла увеличава вискозитета им и служи като стабилизатор – намалява стареенето;
- влиза в състава на редица флюси при спояването на медни проводници
- използва се като сикатив в съхнещите масла.

Копали – те са мъчнотопими и мъчноразтворими материали, получени като продукт на дървета, расли преди хилядолетия. Температурата им на топене е над 360°C.

Разтворени в растителни масла след термообработка при 200÷320°C се получават масленосмолисти лакове с много твърда повърхност на лаковото покритие.

Към копалите се отнася кехлибарът. Цветът му е светложълт до тъмнокафяв. Неразтворим е. В разтопено състояние се разтваря в терпентин, серовъглерод, битум и масла. Употребата му е ограничена поради високата цена. Използва се в измервателните

уреди, при които е необходимо запазване на високоизолационни качества, независимо от влажността на въздуха.

Синтетични органични диелектрици

В съвременните електротехника и електроника най-широко приложение имат синтетичните високомолекулни органични съединения (полимери). В миналото те са се наричали смоли. Понастоящем това название се счита за остаряло. Все пак в наименованието на някои материали е останала думата “смола” (например епоксидни смоли, фенол-формалдехидни смоли).

Синтетичните полимери се получават по методите на полимеризацията и поликондензацията. Полимеризацията е химичен процес, при който молекулите на мономери самопроизволно или под действието на активиращи вещества се свързват помежду си и се получават полимерните молекули. Странични продукти, както по време на реакцията, така и след завършването ѝ, не се отделят. Поликондензацията е също химичен процес, при който част от атомите на молекулите на мономерите се свързват, и се образуват полимерите, като се отделят странични нискомолекулни вещества (амоняк, вода, хлороводород и др.)

Полимеризационни полимери.

Всички са термопластични. Някои от тях са полярни, други – не.

Полиетилен – бял, гъвкав, полупрозрачен неполярен материал. Топлоустойчивостта му е $70 \div 130^\circ\text{C}$. Термопластичен е.

От него се изработва изолацията на кабели и проводници за високи честоти и изолацията на кабели за високо напрежение (от 10 до 400 kV); използва се за херметизиращи обвивки на кабели.

Полипропилен – неполярен термопластичен материал с електрични свойства, близки до тези на полиетилена. Полипропиленово фолио служи за диелектрик на кондензатори, които се използват в измервателната и високочестотната техника.

Полистирол. Електричните му свойства са анолигични на свойствата на полиетилена. Той е твърд термопластичен прозрачен материал. Добрите му свойства, технологичността и ниската цена го правят много подходящ за изработване на детайли, работещи във високочестотни електрични полета.

От полистирол се изготвя тънко фолио (*стирофлекс*), което се употребява в производството на кондензатори. Стирофлексните кондензатори, подобно на полипропиленовите, имат много добри качества и се използват в измервателната и високочестотната техника.

Политетрафлуоретилен – полимерен материал с изключителни свойства. У нас е широко известен с търговското название *тефлон*. Електричните му параметри се запазват

постоянни до много високи честоти и не се изменят в широк температурен диапазон от -60°C до 300°C . Използва се за изолация на кабели, проводници, кондензатори, работещи при най-тежки климатични и експлоатационни условия.

Поливинилхлорид. Полярен диелектрик. При $140^{\circ}\text{C} \div 170^{\circ}\text{C}$ се разлага преди да се е размекнал. Към него се прибавят омекотители и стабилизатори, благодарение на които може чрез загряване да се размеква и формова.

Използва се като конструктивен материал, за изолация на телефонни и силови кабели, за защитни обвивки на съобщителни и силови кабели.

Плексиглас (полиметилметакрилат). Той е полярен твърд прозрачен термопластичен материал. Има добра механична якост и лесно се обработва, но е с не особено високи електрични показатели, затова рядко се използва като изолатор. От него се изработват крепежни елементи.

Поликондензационни полимери

Всички са полярни. Някои от тях са термопластични, други – термореактивни.

Фенолформалдехидна смола. Получава се при поликондензация на фенол с фенолформалдехид в присъствието на катализатор. Ако катализаторът е киселинен и има излишък на фенол, получава се новолачна смола, а при алкален катализатор и излишък на формалдехид – резолна смола или бакелит.

Новолачните смоли са термопластични. Най-разпространената смола от тази група е изолът (новолакът). Той се употребява главно като заместител на шеллака и като изходен продукт за получаване на преспрахове. Образува твърд, но крехък лаков филм, устойчив на бензин и вода; има добри електроизолационни свойства.

Резолните смоли са термоактивни. Най-разпространените смоли са бакелитът, карболитът и др. При втвърдяването им се различават три стадия: А-резол (смолата при загряване се разтопява и може да се разтваря в органични разтворители); В-резитол (междинно състояние); С-резит (неразтворима и нетопима смола).

Фенолформалдехидните смоли са намерили широко приложение в електропромишлеността. От тях се приготвят преспрахове за горещо пресоване на почти всички видове инсталационни и монтажни изделия, лакове за слоестите и намотъчните материали (гетинакс, текстолит, тръби и цилиндри за трансформатори), слепващи, покривни и импрегнационни лакове.

Полиамиди. Те са бели или слабожълти термопластични материали, при стапяне се разлагат; силно хигроскопични са; при механично натоварване показват стремеж към бавна деформация; имат голяма износоустойчивост на триене.

Полиамидите при бързо охлаждане имат аморфна структура, но при благоприятни условия на изстиване на стопилката могат да получат и кристална структура на твърдата фаза.

Намират приложение като конструктивен материал и под формата на влакна, фолио и лакове.

Търговски наименования: найлон, капрон, силон, перлон и др.

Полиуретани - подобни са на полиамидите, но имат по-малко водопоглъщане; по-добра адхезия към металите и са по-бензиноустойчиви.

Полиуретаните могат да бъдат термопластични (при прекъсване на поликондензационния процес на междинен етап) и терморезистивни. Последните наподобяват на каучуците и дори ги превъзхождат по отношение на износоустойчивост, водопоглъщане и др. Шуплестите полиуретани (дунапрен) имат добри звуко- и топлоизолиращи качества.

Полиуретаните се използват в състава на компаунди, емайл-лакови покрития на проводници (те се калайдисват без почистване на лаковото покритие – само с потапяне в разтопен калай), за херметизиране на специални видове керамични и хартиени кондензатори и др.

Полиетилен-терафталат. Той е термопластичен. Може да бъде аморфен или кристален. В кристално състояние има температура на топене $250 \div 260^\circ\text{C}$.

Намира приложение най-често под формата на влакна и фолио (при производството на кондензатори). На основата на модифициран полиетилен-терафталат се получава лак с клас на топлоустойчивост В за емайлирани проводници. Лакът е терморезистивен.

Полиетилен-терафталатът е получил много широко приложение във вид на тънка лента, известна у нас с търговското наименование *хостафан*.

Хостафанът притежава изключително висока диелектрична якост ($E_{пр} = 280 \text{ MV/m}$ на лента с дебелина $25 \mu\text{m}$) и висока механична якост. Запазва свойствата си в температурен интервал $-60 \div +150^\circ\text{C}$ и не старее. Може да се метализира, което заедно с отличните електрични параметри го прави особено подходящ за диелектрик на кондензатори.

Епоксидни смоли – характеризират се с добри електроизолационни свойства, химична устойчивост и минимална свиваемост при втвърдяване ($1 \div 3\%$).

В изходно състояние те са нискомолекулярни съединения, сиропобразни до колофонообразни, термопластични с голяма химична активност и не се използват като диелектрици.

За втвърдяване, т.е. получаване на пространствени връзки и минаване в терморезистивно състояние, се прибавят втвърдителите, които влизат в реакция с функционалните групи на епоксидната смола и я довеждат до необратимо твърдо състояние.

Към епоксидните смоли се прибавят и пълнители (до 400%) – кварцово брашно, порцелан на прах и др., които изменят в широки граници физико-механичните им свойства.

Максималната работна температура на епоксидните смоли без пълнители е 110°C , а с неорганични пълнители – нараства на 150°C .

Намират широко приложение в състава на компаунди и лепила.

Силициевоорганични материали (силикони). В техните молекули се съдържа силиций. Имат голяма топлоустойчивост ($250\div 350^{\circ}\text{C}$). Те са полярни и термореактивни. Приложение са намерили силициевоорганични течности, смазки, каучук и твърди материали. Използват се и като компаунди.

Битуми

Те са сложни смеси на въглеводороди с характерен черен цвят. При повишаване на температурата се размекват и се разтопяват. По произход са два вида – естествени (изкопаеми), наречени още асфалти, и изкуствени (нефтени), получени при дестилация на нефта.

Битумите се разтварят в бензол, толуол и по-слабо - в бензин. Неразтворими са в спирт и вода. Температурата на размекване е от 30 до 90°C . В електропромишлеността природните битуми се употребяват при производството на електроизолационни покривни лакове, подходящи за въздушно сушене. Нефтените битуми се използват при производството на импрегнационни лакове, когато са нужни еластични, не особено твърди лакови филми и за компаунди.

Восъкообразни диелектрици

Парафин – кристално вещество с бял цвят и температура на топене $50 \div 55^{\circ}\text{C}$. При нагряване до 140°C се окислява. Разтваря се в нефтени масла, бензин и бензол. Неразтворим във вода и спирт. Употребява се за импрегниране на хартиени кондензатори за ниско напрежение и за изолационни детайли, за заливане на високочестотни бобини и трансформатори. Напоследък неговата употреба рязко се намалява поради ниската му работна температура.

Церезин – има точка на топене $65 \div 80^{\circ}\text{C}$ и повишена в сравнение с парафина устойчивост на окисляване. Използва се за заливане на нехерметизирани кондензатори, като омекчител за каучуковите смеси в кабелната промишленост и за повишаване на тяхната устойчивост на светлина.

Халовакс – кристално вещество със светложълт до зеленикав цвят, което не гори и не се окислява. Употребява се за заливане на кондензатори. Използването му през последните години е намалена поради силната му токсичност.

Олеовакс – вещество с бял или светлокремав цвят, с температура на топене 80°C , което лесно се окислява. Употребява се за импрегниране на хартиени кондензатори, на които може да се повиши капацитетът със $75\div 100\%$. Употребата му се ограничава от сравнително високия $\text{tg}\delta$, който расте с повишаването на температурата.

Каучук и гума

Естествен каучук – получава се от каучуконосни растения в тропичните страни (Бирма, Индонезия и др.) и от такива, аклиматизирани в умерения пояс. Млечният сок (латексът) на растенията се подлага на коагулация и отделяне на примесите. По химичен състав каучукът е въглеводород, аморфно вещество със зигзагообразна форма на молекулите. На този строеж се дължи и неговата голяма разтегливост.

Чистият каучук е с твърде малка устойчивост на висока (над 70°C) и ниска (-65°C) температура. Механичните му свойства и еластичността му се влияят от температурата. Притежава малка устойчивост към разтворителите – бензин и масло. Поради тези отрицателни свойства не се употребява в чист вид, а винаги в смес с различни вещества, главно сяра и различни пълнители. Тази смес се подлага на термична обработка (известна под наименованието вулканизация) при температура от 180°C до 200°C. По време на вулканизацията каучукът влиза в реакция със сярата, в резултат на което се получава гума с подобрена нагревоустойчивост, студоустойчивост, механична якост и устойчивост на разтворители. В зависимост от количеството сяра се различават два основни вида гума; мека гума - със съдържание на сяра 1÷3% и твърда гума (известна под наименованието ебонит) със съдържание на сяра 30÷35%.

В меката гума цялото количество вложена сяра не се свързва с каучука. Остава известно количество свободна сяра. Такава гума не може да се употребява като изолация на проводниците, ако те не са специално защитени от вредното действие на свободната сяра върху медта. Вредното действие на свободната сяра върху медта се изразява в образуването на меден сулфид (CuS), при което се намалява сечението на жилото. Това води до увеличаване на плътността на тока, загряване на проводника и възможност за бързото му излизане от строя. Ако при вулканизация се използва органичното вещество тиурам, се получава гума, несъдържаща свободна сяра. В случаите, когато не се изискват особено високи електроизолационни свойства, в каучуковата смес се прибавят и значителни количества сажди като пълнител. Това поевтинява гумата.

Произвеждат се чрез полимеризация различни видове синтетични каучуци – бутадиенов каучук, хлоропренов каучук, бутадиенстиролен каучук, бутил каучук, етилен-пропиленов каучук.

3.2. Неорганични диелектрични материали

Неорганичните диелектрици в зависимост от структурните им особености биват: керамики, стъкла и слюда, а в зависимост от приложението им – изолаторни и кондензаторни. *Изолаторните диелектрици* се употребяват за монтаж на елементи, чиито потенциал е отличен от нула, и затова се наричат още монтажни диелектрични материали. Необходимо е да имат малка диелектрична проникваемост, защото участват във формирането на паразитен капацитет, който особено при високи честоти е задължително да бъде по възможност малък. *Кондензаторните диелектрици* трябва да имат голяма диелектрична проникваемост, за да се получи голям капацитет при малки геометрични размери на кондензатора.

3.2.1. Керамики

Всички керамики притежават три структурни фази – кристална, аморфна (стъклообразна) и газова. Кристалната фаза (химични съединения или техни твърди разтвори) определя в най-голяма степен електричните свойства на керамиката. Газовата фаза се получава като следствие на технологията на получаване на тези материали (керамична технология). Тя предизвиква намаляване на механичната и електричната якост и увеличаване на диелектричните загуби при по-високи напрежения от йонизацията на

газа. По тези причини газовата фаза е нежелана и стремежът е да се произвеждат керамики с минимално съдържание на газ. Има обаче и керамики, които специално се произвеждат с голямо съдържание на газова фаза и се наричат порести. Те притежават относителна диелектрична проницаемост, близка до тази на въздуха, и се използват за изработването на основи за резистори с цел да се получи минимален паразитен капацитет.

Както и останалите диелектрични материали, предназначени за електротехниката и електрониката, керамиките трябва да имат достатъчна електрична якост, малки диелектрични загуби и механични свойства, съобразени с експлоатационните условия.

Изолаторните керамики освен изброените свойства трябва да притежават малка диелектрична проницаемост ($\epsilon_r < 12$).

Радиопорцеланът е високочестотен керамичен материал от системата $\text{BaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$. Изходната му маса се характеризира с голяма пластичност и затова от него се изработват малогабаритни детайли със сложна геометрична форма.

Ултрапорцеланът е корундова керамика. Корундът е една от кристалните модификации на Al_2O_3 и притежава отлични електрични свойства. Ултрапорцеланът е с по-малки диелектрични загуби и по-голяма стабилност на диелектричната проницаемост в сравнение с радиопорцелана. Корундовите керамики се отличават с повишена топлопроводност и абразивност. Последното свойство затруднява механичната обработка на детайлите.

Целзиановата керамика има много нисък температурен коефициент на линейно разширение, голяма стабилност на диелектричната проницаемост и много малки загуби до температура 300-400°C.

Стеатитовата керамика е от системата $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$. Тя има малки диелектрични загуби и се използва за изработване на детайли за променливи кондензатори, тела за бобини, цокли за електровакуумни лампи и др. Тези детайли се произвеждат с малки размерни допуски.

Алуминооксидната керамика съдържа висок процент Al_2O_3 – от 85% до 99,8%. Благодарение на отличните електрични, механични и топлинни свойства тази керамика намира широко приложение в електрониката – за детайли на СВЧ прибори и на електровакуумни лампи, за подложки на хибридни интегрални схеми и др.

Берилievoоксидната керамика притежава много високо изолационно съпротивление и изключително голяма топлопроводност. При стайна температура коефициентът на топлопроводност е почти наполовина от този на медта. Високата цена силно ограничава приложението ѝ.

Кондензаторни керамики. Изискванията към тях са същите както към изолаторните керамики, с изключение на диелектричната проницаемост ϵ_r , която трябва да бъде колкото е възможно по-голяма. Известно е, че диелектричните материали, в които се наблюдава спонтанна поляризация, притежават много висока диелектрична проницаемост. Керамики с такава поляризация се наричат сегнетокерамики.

Сегнетокерамиката се получава на основата на бариев титанат (BaTiO_3). Поради доменната структура на сегнетодиелектриците, диелектричната проницаемост силно зависи от температурата, т.е. тези материали имат голяма температурна нестабилност.

Като се променя съставът на керамичната маса, се получават сегнетокерамики с различна стойности на диелектричната проницаемост и на температурата на Кюри. От сегнетокерамиките се правят малобагаритни нискочестотни кондензатори с голям капацитет, които имат обаче и голяма температурна нестабилност.

За качествата на керамичните кондензатори от значение е температурният коефициент на диелектричната проницаемост TK_{ϵ_r} . Кондензаторните керамики се произвеждат в много разновидности, поради което се групират в зависимост от стойността на диелектричната проницаемост и температурния коефициент на диелектричната проницаемост, както следва:

- Керамики с висока диелектрична проницаемост и отрицателен температурен коефициент на диелектричната проницаемост $\text{TK}_{\epsilon_r} < 0$.
- Керамики с ниски стойности на диелектричната проницаемост и на температурния коефициент на диелектричната проницаемост. Диелектричната проницаемост на тези керамики има стойности от 12 до 25, а $\text{TK}_{\epsilon_r} = (-50 \div + 30) \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$.

3.2.2. Стъкла

Стъклата представляват сложни системи от стъклообразуващи (SiO_2 , P_2O_5) и други оксиди (Na_2O , K_2O , CaO , BaO , PbO , ZnO , Al_2O_3 и др.). Основната част на повечето технически стъкла е SiO_2 , поради което те се наричат силикатни. Свойствата на стъклата се променят с изменение на състава на оксидите – диелектричната проницаемост е от 3,8 за кварцовото стъкло до 16 за алкалните и оловните стъкла (за някои бариєви стъкла е до 25), диелектричните загуби се изменят от 0,0002 за кварцовото стъкло до 0,007 за някои алкални стъкла, изоляционното съпротивление също варира в широки граници – някои стъкла са с голямо ρ ($\approx 10^{13} \Omega \cdot \text{m}$), други имат малко ρ ($\approx 10^2 \div 10^7 \Omega \cdot \text{m}$) (те са полупроводници). Най-добри електрични свойства притежава кварцовото стъкло.

Алкалните оксиди (Na_2O и K_2O) оказват силно влияние върху електричните свойства на стъклата. Увеличаването на съдържанието им предизвиква повишаване на диелектричната проницаемост и намаляване на специфичното съпротивление. Въвеждането на тежки оксиди (BaO , TiO_2 , PbO) неутрализира в известна степен влиянието на алкалните оксиди и даже предизвиква увеличаване на специфичното съпротивление.

Силикатните стъкла, които се употребяват в електрониката, се разделят на следните групи:

Безалкални

Безалкални стъкла (не съдържат алкални оксиди). Към тях се включва и кварцовото стъкло. За тях са характерни добрите електроизолационни свойства, голямата топлоустойчивост и ниския температурен коефициент на линейно разширение (TK_{ϵ_r} на кварцовото стъкло е най-малък измежду всички вещества). Тези стъкла не са технологични – от тях трудно се изработват детайли със сложна геометрична форма и малки размерни

допуски.

Алкални стъкла без съдържание на тежки оксиди. Имат по-ниска топлоустойчивост, технологични са, но електроизолационните им свойства са влошени.

Алкални стъкла със съдържание на тежки оксиди. Те са сравнително технологични и имат електроизолационни свойства приблизително еднакви с тези от първа група. В зависимост от приложението им се различават също няколко групи стъкла.

Електровакуумните стъкла са предназначени за направата на балони на електровакуумни лампи. Най-важното им свойство е температурният коефициент на линейно разширение, който трябва да бъде еднакъв с този на метала на изводите. Според това изискване се различават платиновни [$TK_{\varepsilon_r} = (85 \div 92) \cdot 10^{-7} K^{-1}$], молибденови [$TK_{\varepsilon_r} = (46 \div 52) \cdot 10^{-7} K^{-1}$], волфрамови [$TK_{\varepsilon_r} = (35 \div 42) \cdot 10^{-7} K^{-1}$] и други стъкла. Наименованието се определя не от състава на стъклото, а от стойността на TK_{ε_r} . Стъклата, от които се изработват високочестотни прибори, трябва да имат малки диелектрични загуби.

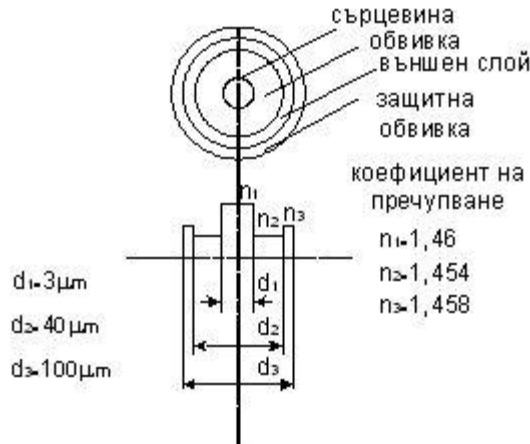
Изолаторните стъкла отговарят на същите изисквания, както и изолаторните керамики. Използват се за направата на проходни или монтажни изолатори. Употребяват се безалкалните стъкла.

Кондензаторните стъкла имат свойства, подобни на кондензаторните керамики. На тези изисквания отговарят алкалните стъкла със съдържание на тежки оксиди.

В практиката се използват и различни видове специални стъкла:

- оптични стъкла (с висока прозрачност и повишен коефициент на пречупване);
- цветни стъкла;
- ултравиолетови стъкла (прозрачни за ултравиолетовите лъчи);
- рентгенови стъкла (прозрачни за рентгенови лъчи);
- стъкла с проводяща повърхност и др.

Стъкла за оптични влакна. При конструирането на оптичните влакна най-важно значение имат коефициентите на пречупване на светлината между различните конструктивни елементи, защото от тях зависи светлинния лъч да премине на големи разстояния. На фигура 3.1 е показана конструкцията на оптично влакно и разпределението на коефициентите на пречупване между отделните елементи. Сърцевината и обвивката са направени от много чисти стъкла, за да се намали колкото е възможно затихването на светлинния лъч. Изискванията към чистотата на външния слой не са толкова строги, но коефициентът на пречупване трябва да бъде различен от този на обвивката. Външният слой служи за увеличаване на диаметъра на влакното до такава степен, че да се получи достатъчна механична якост. За изработването на оптични влакна се използват натриево-калциеви силикатни стъкла, боросиликатно стъкло, а също и топен кварц. Освен специалните изисквания за чистота, от голямо значение са структурните дефекти и якостните свойства на тези стъкла.



Фиг. 3.1

Ситалите са поликристални материали, получавани чрез стимулирана кристализация на стъкла. Заемат междинно място между стъклата и керамиките. Характеризират се с микрокристална структура, която им придава по-голяма плътност, по-висока механична якост и топлопроводност в сравнение със стъклата и керамиките. Кристализацията се стимулира чрез катализатори. В зависимост от тях се различават термоситали и фотоситали.

Широкият обхват от стойности на температурния коефициент на линейно разширение на различните ситали и високата топлопроводност правят тези материали подходящи за подложки на хибридни тънкослойни интегрални схеми.

3.2.3. Слюда

Слюдата е природен кристален минерал. От двата вида слюда – флогопит и мусковит, приложение в електрониката намира мусковитът. Характерно за слюдените кристали е способността им лесно да се цепят на тънки пластини, които могат да се използват като диелектрик за кондензатори.

Мусковитът е много добър диелектрик. Неговите основни електрични свойства не зависят от честотата на електричното поле. Температурната му стабилност е също много добра. При подбора на пластините трябва да се избягва слюда с петна, които се дължат на примеси - соли и оксиди (главно железни), защото те повишават диелектричните загуби и намаляват електричната якост. При температура над 500°C започва отделяне на съдържащата се в кристала на слюдата вода, което предизвиква влошаване на електричните и механичните свойства на материала. Слюдата мусковит се използва като диелектрик на слюдени кондензатори. По-лошите параметри на слюдата флогопит и по-високата топлоустойчивост определят приложението ѝ само като изолационен материал.

Синтетичната слюда флуорфлогопит има по-висока топлоустойчивост от мусковита, защото в кристалите си не съдържа вода. Използва се за работа при повишена температура като изолационен екран в електровакуумните лампи и като диелектрик на кондензатори.

3.3. Многокомпонентни диелектрици

3.3.1. Компаунди

Компаундът е маса за заливане или импрегниране с цел защита от околната среда. При изготвянето е в течно състояние и се втвърдява при охлаждане или вследствие на химичен процес. Компаундите могат да служат за корпусиране на детайли. За преценка на качествата им от гледна точка на употребата голямо значение има степента на свиване след втвърдяване. Обикновено компаундите с топло втвърдяване се свиват повече от тези със студено втвърдяване. Качествените компаунди трябва да имат високо изолационно съпротивление, малки диелектрични загуби и относителна диелектрична проникваемост. За осигуряване на качествена защита от околната среда те трябва да са влагонепроницаеми, да имат необходимата механична якост и адхезия.

Най-разпространени в електротехниката и електрониката са компаундите, изработени на основата на терморективни полимерни диелектрици.

Особено често се прилагат епоксидните компаунди. Получават се от епоксидни смоли и различни пълнители. Механичните и електричните им свойства са много стабилни във влажна среда и зависят от използвания в компаунда пълнител – стъкло, калциев карбонат, силициев диоксид, слюда и други минерални вещества.

3.3.2. Лакове

Те са колоидни разтвори на смоли, битуми, съхнещи масла и други подобни вещества (смолите, битумите и др. се наричат лакова основа – филмообразувател, поставен в изпаряващи се разтворители). При сушене разтворителите се изпаряват, като лаковата основа преминава в твърдо състояние и образува лаковия филм. За отстраняване неблагоприятното екологично влияние на разтворителите през последните години са създадени специални водоразтворими полимери, от които се получават лакове за емайлиране на проводници и за антикорозионни покрития, нанасяни по електрофорезен начин.

В зависимост от предназначението си лаковете се групират в три групи: импрегнационни, покривни и слепващи лакове.

В зависимост от начина на сушене лаковете са с горещо и с въздушно сушене. При горещото сушене се изискват специални съоръжения за повишаване на температурата до 100°C и повече. При въздушното сушене не са необходими специални съоръжения, тъй като сушенето е при обикновена (стайна) температура. Когато се налага ускоряване на времето за сушене, използват се съоръжения, позволяващи повишаване на температурата до 60-80°C.

Според химичния състав лаковете са маслосъдържащи, смолисти и целулозно-естерни.

Маслосъдържащите лакове се произвеждат на основата на ленено или рициново масло с естествени или изкуствени смоли с подходящи за смолата и предназначението на лака разтворители.

Целулозно-естерните лакове се произвеждат на основата на целулозата, разтворена в подходящ разтворител.

Импрегнационни лакове – служат за импрегниране на твърди порести електроизолационни материали – хартия, прежда, тъкан и намотките на електрически машини и апарати. При импрегнирането порите и празнините в изолационните материали се запълват с лак. В резултат на това се увеличават пробивното им напрежение и топлоотвеждането, значително се намалява хигроскопичността и се подобрява чувствително механичната здравина на изолацията.

Основни изисквания за импрегнационните лакове са:

а) да имат добри импрегнационни свойства при максимално съдържание на лакова основа;

б) да осъществяват здраво сцепване на отделните навивки от намотките, за да не се разлепват;

в) технологията на импрегнирането и сушенето да е съобразена с устройствата, които ще се импрегнират;

г) да имат високи електроизолационни свойства при нормална и при работна температура и да ги запазват дълго време;

д) да имат добра влагоустойчивост;

е) да бъдат безвредни, включително и по отношение на медта и изолацията.

Покривни лакове – служат за повишаване на повърхностното съпротивление на изолацията в електрическите машини и апарати, за подобряване на нейната влагоустойчивост, устойчивостта на химически активни среди и др. Използват се за създаване на изолационни слоеве върху металите (при производството на емайлирани проводници) и за изолиране на електротехническата стомана.

Слепващи лакове – служат за сцепване на изолационни материали или за укрепването им към метални повърхности.

Подобно разделение на лаковете е условно. Като пример може да се посочи производството на гетинакс. При него се импрегнират отделните листове хартия и след това се залепват. Следователно този лак е едновременно импрегнационен и лепващ.

3.3.3. Слоести пластмаси

Слоестите пластмаси се състоят от свързани чрез полимерни материали два или повече слоеве, изработени на базата на влакнеста основа, наречена пълнител. Като пълнители се използват текстил, хартия, стъклена и азбестова тъкан стъквени нишки и др. Свързващо вещество може да бъде почти всеки полимерен материал, но най-често това са термореактивни полимери, които имат по-висока размерна стабилност и повишена топлоустойчивост. Приложение намират фенолните, полиестерните, епоксидните и силиконовите смоли.

Пластмасите, включително слоестите, са част от ежедневието на човека. Това е така поради извънредно голямото разнообразие от пластмаси с най-различни свойства, които заедно с ниската цена ги правят предпочитани. По същите причини пластмасите навлизат масово в електрониката, още повече че те в ред случаи не могат да бъдат заменени с други материали – например слоестите пластмаси за печатни платки. При това положение, много важно е да се използва точен критерий за избор на пластмаса. Необходимо е да са дефинирани точни експлоатационни условия, с което лесно може да се определи кои параметри са важни и какви стойности трябва да притежават. Някои от изискванията към пластмасите са противоречиви. Например за подобряване на електричните свойства е необходимо да се увеличи процентното съдържание на полимерен материал, но това пък влошава механичните свойства. Пластмаси с текстилен пълнител се режат по-лесно от тези с хартиен пълнител, но последните имат по-добри електрични свойства.

Фенолформалдехидните слоести пластмаси са едни от първите, намерили широка употреба в електротехниката и електрониката. Фенолформалдехидната пластмаса с хартиен пълнител е известна с търговското наименование *гетинакс*, с пълнител памучна тъкан – *текстолит*, а със стъклена тъкан *стъклотекстолит*. Пълнителите в голяма степен определят механичните и топлинните свойства на пластмасите, но оказват влияние и върху електричните им свойства. Например загубите в пластмаса с памучен пълнител са по-големи от тези в пластмаса с хартиен или стъклен пълнител.

За изработване на печатни платки се използват едностранно или двустранно фолирани гетинакс и стъклотекстолит – повърхностите им са покрити с тънък слой мед.

Стъклотекстолитът се произвежда и с други полимери като свързващи вещества, например епоксидни, полиестерни, силиконови, тефлонови и др.

Гетинаксът е значително по-хигроскопичен от стъклотекстолита. Поради това след нарязване страничните стени трябва да се обработят с електроизолационни лакове, защото там се открива най-хигроскопичната част на материала – хартията.

Поради по-лошите електрични свойства на текстолита, но по-добри механични свойства, той се използва за изработване на конструктивни детайли.

Епоксидните слоести пластмаси се отличават с добри механични, топлинни и електрични свойства. Могат да се употребяват за работа при ниска температура, тъй като те не се напукват. Топлоустойчивостта, определена по изменението на електричните параметри, е около 120°C, а по изменението на механичните свойства – до 260°C.

Епоксидните слоести пластмаси се използват за изработване на печатни платки поради голямата адхезия на медното фолио към епоксидната смола.

Силиконовите слоести пластмаси са с отлични електрични, топлинни и механични свойства. Те попадат в топлинен клас H (до 180°C) (вж. т. 26.2). Запазват свойствата си до много ниски температури – около - 260°C. Диелектричните загуби в тези материали се запазват ниски до около 150°C. Адхезията на медното фолио към силиконовите слоести пластмаси е по-малка отколкото към епоксидните пластмаси. Тези пластмаси се използват за изработването на различни детайли (подложени на повишена температура). По-скъпи са

и затова трябва да се използват само в случаите, в които свойствата на епоксидните пластмаси не отговарят на експлоатационните изисквания.

Тефлоновите слоеви пластмаси притежават превъзходните електрични и топлинни свойства на политетрафлуоретилена и механичните качества на пълнителите. Механичните свойства на тефлоновите пластмаси са значително по-добри в сравнение с тези на тефлона, като съвсем малко са влошени електричните свойства. Тези пластмаси се използват като диелектрични материали от топлинен клас H (до 180°C).

ТЕМА 4. Проводникови материали

4.1. Общи сведения.

Основно свойство на проводниковите материали е тяхната висока електрична проводимост. Те се използват при производството, пренасянето, разпределението, трансформирането и употребата на електричната енергия.

Проводници на електричен ток са твърди тела, течности, а при подходящи условия и газове.

Твърди проводникови материали са металите, техни сплави и някои модификации на въглерода (електротехнически въглен).

Към течните проводникови материали се отнасят разтопените и течни метали и електролитите.

Металите в твърдо и течно агрегатно състояние притежават електронна проводимост и се наричат *проводници от първи род*. Към тази група спада и въгленът.

Електролитите, или както още се наричат *проводници от втори род*, са разтвори (обикновено във вода) и стопилки на йонни диелектрици (соли, основи, киселини).

В електротехниката и електрониката като проводници се използват почти изключително метали и техните сплави.

4.2. Електрична проводимост на металите

В металите валентните електрони на атомите са свободни и при отсъствие на електрично поле те извършват хаотично топлинно движение с много големи скорости – средно от порядъка 10^6 m/s. Те търпят голям брой удари с положителните йони (атомите без валентните електрони), разположени във възлите на кристалната решетка. Поради това всеки електрон мени много често посоката и големината на скоростта си.

Електричното съпротивление на проводник с дължина l и лице на напречното сечение S е:

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (4.1)$$

където ρ е специфично съпротивление. Дименсията за ρ е $\Omega \cdot m$.

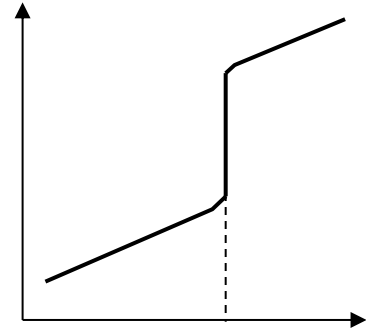
Реципрочната стойност на ρ $\left(\gamma = \frac{1}{\rho} \right)$ е специфична електрична проводимост; дименсията ѝ е S/m .

4.3. Влияние на различни фактори върху електропроводимостта на металите

4.3.1. Влияние на температурата

Концентрацията на свободните електрони в металите не зависи от температурата. При нейното повишаване се усилват колебанията на положителните йони, намиращи се във възлите на кристалната решетка и се появяват повече препятствия по пътя на насоченото движение на електроните и специфичното съпротивление ρ нараства.

Типична крива на изменение на специфичното съпротивление ρ на метален проводник в зависимост от температурата θ е показана на фиг. 4.1.



Фиг. 4.1

Рязкото изменение на специфичното съпротивление при топене е свързано със скокообразното изменение на плътността, респективно на концентрацията на свободните електрони. Повечето метали в разтопено състояние имат по-голям обем, отколкото в твърдо и за тях при топене специфичното съпротивление се увеличава; за метали с противоположно изменение на обема при топене ρ намалява (например бисмут, галий).

4.3.2. Влияние на примесите върху електропроводимостта на металите.

Специфично съпротивление на сплави

Най-голяма проводимост притежават чистите метали.

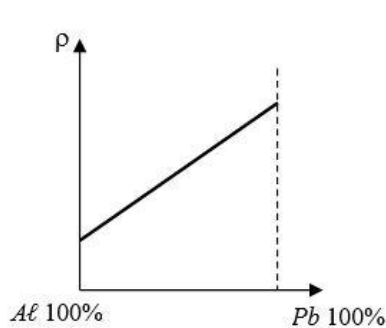
Метални и неметални примеси, дори и в най-малки количества, предизвикват съществено увеличение на съпротивлението. Причина е изкривяване на кристалната решетка, възникване на дефекти в нея и намаляване на дрейфовата скорост на електроните.

Влиянието на метални примеси върху специфичното съпротивление на даден метал зависи от типа на образуваната сплав. Различават се 3 вида сплави – механична смес, твърд разтвор, химично съединение.

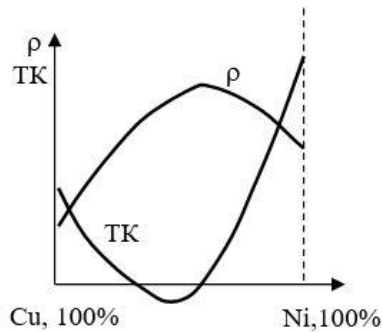
Когато при сплавяване металите образуват механична смес, техните кристали само се смесват, без да се изкривяват, запазвайки своята самостоятелност. Не възниква нов тип кристална решетка. Специфичното съпротивление на тези сплави зависи линейно от процентното съдържание на компонентите. Това е илюстрирано на фиг. 4.2 за сплавта алуминий (Al) - олово (Pb).

Значително нарастване на специфичното съпротивление се наблюдава за сплавите от типа твърд разтвор. При тяхното образуване се осъществява съвместна кристализация. Атомите на отделните компоненти проникват в кристалните решетки на другите компоненти. Кривата на специфичното съпротивление на твърдия разтвор има максимум, отговарящ на определен състав (фиг. 4.3). Подобна сплав се получава например от мед (Cu)

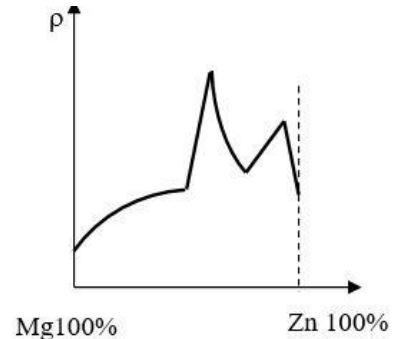
и никел (Ni). Увеличението на ρ се дължи на изкривяването на кристалната решетка, съдържаща атоми на двата метала, което е причина за намаляване на свободния пробег на електроните.



Фиг. 4.2



Фиг. 4.3



Фиг. 4.4

Температурният коефициент на специфичното съпротивление $TK\rho$ притежава минимум, а за някои състави на сплавта Cu-Ni има дори отрицателни стойности.

Когато при сплавяване на металите отделните компоненти при определени количествени съотношения образуват химични съединения, в графиката на ρ във функция от процентното съдържание на съставните метали се наблюдават точки на пречупване. На фиг. 4.4 е показана подобна зависимост за сплав на магнезий (Mg) и цинк (Zn).

4.3.3. Изменение на специфичното съпротивление на металите при деформация

При еластично опъване или свиване специфичното съпротивление ρ се изменя подчинявайки се на приблизителното уравнение:

$$\rho = \rho_0(1 \pm s\sigma), \quad (4.2)$$

където ρ_0 е специфично съпротивление при отсъствие на механично напрежение, σ - механично напрежение, s - коефициент на механично напрежение. Знакът “+” съответства на деформация при опън, а знакът “-” – при свиване.

4.3.4. Съпротивление на проводниците при високи честоти

При високи честоти електромагнитното поле прониква в техническите проводници на неголяма дълбочина. Голяма част от тока се оказва съсредоточена близо до повърхността. Явлението се нарича *скин-ефект*. То е причина за нарастване на еквивалентното специфично съпротивление на проводниците при висока честота. Δ се нарича *дълбочина на проникване* и се определя от уравнението

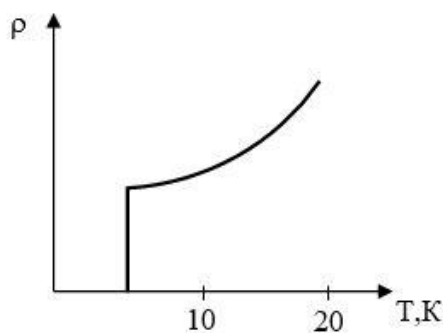
$$\Delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \gamma \mu_0 \mu_r}}, \quad (4.3)$$

в което са въведени следните означения: f - честота на тока, γ - специфична електрична проводимост, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7}$, Н/м (Хенри на метър) – магнитна константа, μ_r - относителна магнитна проницаемост на проводника.

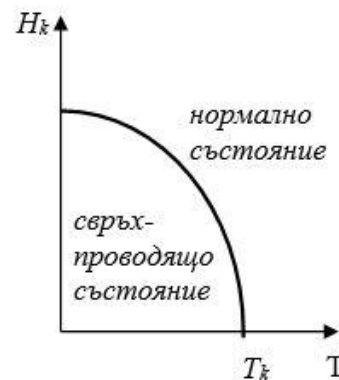
Вредното действие на скин-ефекта при високи честоти може да се намали чрез увеличаване на повърхността на проводника при запазване на лицето на напречното сечение. Най-често това се постига чрез използване на литцендрат – сноп от емайлирани проводници с малък диаметър (0,05÷0,1 mm); броят им в литцендрата обикновено е между 4 и 35.

4.4. Свръхпроводимост и хиперпроводимост

Свръхпроводимостта е рязко намаляване практически до 0, на електричното съпротивление на някои метали, сплави и химични съединения при температура $T \leq T_k$, където T_k е характерна за дадено вещество критична температура (фиг. 4.5).



Фиг. 4.5



Фиг. 4.6

При температури $T < T_k$ веществото може да се изведе от свръхпроводящо състояние чрез въздействие с външно магнитно поле, чиито интензитет $H > H_k$, където H_k е критичен интензитет, зависещ от химичната природа на веществото и нарастващ с понижаване на температурата.

Типична зависимост на критичния интензитет на магнитното поле H_k от температурата за цилиндричен образец, разположен по направление на полето, е показана на фиг. 4.6.

Ако $T < T_k$ и $H < H_k$, свръхпроводящият образец е идеален диамагнетик – магнитната индукция в него е $B=0$ (ефект на Майснер).

Известни са около 30 химични елемента, които могат да преминат в свръхпроводящо състояние (между тях са алуминий, титан, ванадий, цинк, галий, цирконий, ниобий, кадмий индий, калай, олово, бисмут, торий, уран и др.) и няколко

хиляди сплави и съединения, притежаващи тези свойства (молибден-рениеви, ниобий-циркониеви, ниобий-титанови сплави, ниобий-калай-Nb₃Sn и много други). Най-проводящите метали – сребро (Ag) и мед (Cu) не могат да бъдат свръхпроводници.

Едно от перспективните приложения на свръхпроводниците е в магнитотехнологията за получаване на силни магнитни полета чрез свръхпроводящи соленоиди, които се отличават от обикновените по това, че за тяхното хранване не е нужен непрекъснат разход на енергия - по затворена намотка произволно дълго време циркулира еднократно възбуден електричен ток и създава строго постоянно магнитно поле без хранване.

Освен свръхпроводимостта, в електротехниката широко се използва явлението *хиперпроводимост* (или *криопроводимост*) – достигане от някои метали на незначително специфично съпротивление при криогенни температури (температури под 120K), но по-високи от температурата на свръхпроводящия преход (ако изобщо даденият метал може да е свръхпроводник).

Най-често използвани охладители са: течен азот (с температура на кипене $T_{кип}=77\text{K}$) и течен водород ($T_{кип}=20\text{K}$); понякога се използват течен неон ($T_{кип}=27\text{K}$) и състен хелиев газ при температура 10K.

Достойнства на хиперпроводниците спрямо свръхпроводниците са:

- Температурите, при които металите преминават в хиперпроводящо състояние, са значително по-високи от тези за преминаване в свръхпроводящо състояние. Това значително опростява и поевтинява инсталациите, посредством които се получават ниски температури.

- Ако поради случайно повишаване на температурата или на интензитета на магнитното поле дори и в малък участък от свръхпроводящ контур свръхпроводимостта бъде нарушена, внезапно се освобождава голямо количество енергия, което може да предизвика сериозна авария. В случай на хиперпроводимост повишаването на температурата води до постепенно нарастване на съпротивлението без ефект на взрив.

От хиперпроводниковите материали се изисква висока чистота. Вредното влияние на примесите е много по-силно при криогенни температури, отколкото при нормална.

Хиперпроводниците с успех могат да се използват за намотки на електрични машини и трансформатори, за токопроводящи жила на кабели и др. подобни. В магнитотехнологията се прилагат криогенни соленоиди.

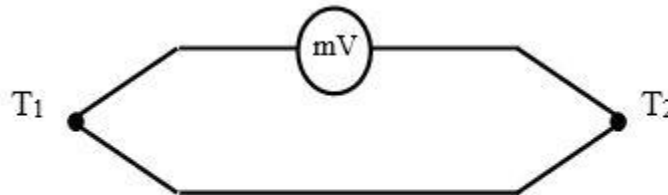
4.5. Термоелектродвижещо напрежение

В затворена верига от 2 разнородни проводника, когато местата на съприкосновението им (спойки) имат различни температури T_1 и T_2 , между двата проводника възниква термоелектродвижещо напрежение (ТЕДН), което е пропорционално на температурната разлика $T_1 - T_2$:

$$E_T = \alpha_T(T_1 - T_2) \quad (4.4)$$

α_T е коефициент на ТЕДН и е характерна величина за дадена комбинация от 2 проводника.

Веригата, изобразена на фиг. 4.7, се нарича термодвойка. Използва се най-често за измерване на температури.



Фиг. 4.7

4.6. Най-често използвани проводникови материали

4.6.1. Материали с голяма електропроводимост

Мед (Cu) – метал с характерен червеникав цвят.

В електропромишлеността се използва чиста мед с примеси, не повече от 0,1%. Тя се получава чрез електролиза.

Главните предимства, които са наложили медта като първостепенен проводников материал, са малкото ѝ специфично съпротивление (само среброто има по-малко специфично съпротивление), относително високата якост, задоволителната устойчивост към корозия и добрата обработваемост (валцуване, изтегляне и относително лесно спояване и заваряване).

Съществено значение за промишлеността имат и някои сплави на медта.

Месинг – сплав на мед и цинк. Характеризира се с повишена механична якост. Употребява се за направа на тоководещи детайли за електрически съоръжения и апарати.

Бронз – сплав на мед, калай, фосфор, силиций, берилий, кадмий, хром, манган и др. В зависимост от процентното съдържание на примесите се получават сплави с различна якост на опън. Специфичното съпротивление на бронза е по-високо от това на медта. Бронзът се характеризира и със значително повишена твърдост. Кадмият намалява най-малко електричната проводимост спрямо медта (13%), но значително повишава твърдостта и якостта на опън. Бронзът се употребява за направа на тоководещи пружини, за контакти и контактни проводници, колекторни пластини с особено отговорно предназначение и др.

Алуминий (Al) – един от най-разпространените в земните недра метал. Има сребристобял цвят. Положителните му свойства са: по-лек е от медта около 3,5 пъти, лесно се обработва механично (изтегляне, валцуване до съвсем тънки листа – фолио, коване). Отрицателните му свойства са: сравнително малка механична якост, голямо специфично

съпротивление – около 1,65 пъти по-голямо от това на медта, необходимост от голямо количество електрична енергия за получаване на 1 тон електролитен алуминий. Трудно се заварява поради образуването на оксиден слой по повърхността му. При допиране до мед корозира галванически.

Използваният в електропромишлеността електролитен алуминий не трябва да съдържа повече от 0,5% примеси, специфичното му съпротивление не бива да бъде по-голямо от $0,0285 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$. Алуминият се употребява за тоководещи жила на силови и контролни кабели и проводници, при производството на електролитни кондензатори, за защитна обвивка на кабели вместо оловна, шини и др. При употребата му като тоководещ елемент трябва да се знае, че за да има същото съпротивление като медния проводник, който ще замества, сечението му трябва да бъде 1,68 пъти по-голямо. Масата на алуминиевото жило спрямо медно с еднакво съпротивление и дължина е $8,9 / (2,7 \cdot 1,68) = 1,96$ пъти по-малка.

Биметални проводници. В практиката се използва помеден стоманен проводник. Помедяването става чрез леене или чрез галванично покриване. Основното изискване за биметалните проводници е съдържанието на мед да бъде не по-малко от 50% от масата на проводника. Употребяват се като тоководещи проводници в съобщителните линии, като шини при разпределителните уредби и за тоководещи части на електрични апарати и съоръжения.

4.6.2. Проводникови материали с голямо съпротивление

В електрическата промишленост при производството на електрични уреди, еталонни резистори, реостати, електронагревателни елементи и уреди се налага употреба на материали с голямо специфично съпротивление.

Манганин – сплав на мед и манган. Той се характеризира със способността си да се изтегля на много тънки нишки с диаметър до 0,02mm и ленти с дебелина до 0,01mm. В контакт с медта генерира незначително термоелектродвижещо напрежение. Получаването на нисък температурен коефициент на съпротивление се постига със специална термообработка при температура 350-550°C във вакуум с бавно охлаждане след това. Манганинът е основна сплав, употребявана за електроизмервателни уреди и еталонни резистори.

Константан – сплав на мед с никел. Характерно за него е това, че температурният му коефициент на съпротивление е приблизително равен на нула, респективно съпротивлението му остава постоянно при изменение на температурата (от тук идва и името му). И той като манганина позволява изтегляне на тънки нишки и ленти. Нагрят до 900°C и охладен на въздух, константанът се покрива с оксиден слой, който е добър изолатор за напрежения до 1V. Образува термоелектродвижещо напрежение при съприкосновение с мед и желязо. Употребява се главно при производството на реостати, електронагревателни уреди за работна температура до 450°C и за термодвойки за измерване на температури до неколкостотин градуса.

За електронагревателни елементи се прилагат: *нихром* (сплав на Ni и Cr); *хром-алуминиеви сплави* (съдържат и Fe); *кантал* (сплав на Cr, Mn, Co, Fe) и др.

Нихромът се използва при изработване на жични резистори, когато не се предявяват строги изисквания за точност и стабилност.

4.6.3. Проводникови материали за контакти

Сребро – употребява се най-много за триещи и маломощни прекъсващи контакти поради малкото му специфично съпротивление (най-малко от всички метали), добрите технологични качества и сравнително ниската цена.

Злато. То има малко специфично съпротивление, както среброто, но за разлика от него е много по-устойчиво на корозия при нормална и повишена температура.

Осигурява добър електричен контакт при много малък контактен натиск – около 0,1N, поради което при прекъсването на електричните вериги дори с малък ток златните контакти лесно се заваряват и разяждат от електроискрова корозия. Затова златото е подходящ контактен материал за работа при малки напрежения и токове. Тъй като в чисто състояние е много мек метал, за контакти се използва злато с повишена твърдост, постигната след сплавяването му или като се подлага на студена деформация.

Най-често златото намира приложение като сплав с 5%Ni – за триещи контакти.

Платина. Има не много малко специфично съпротивление, но е извънредно корозоустойчив метал. Електродъговите му характеристики са много добри, поради което е подходящ за прекъсване на по-големи мощности.

Недостатък на платината е, че поглъща водорода, в резултат на което става крехка.

За контакти обикновено се използва не чиста платина, а сплавите ѝ с иридий, родий, никел и други.

Сплави. За триещи и маломощни прекъсващи контакти се използват сплави, в състава, на които влизат благородни метали, заради тяхната устойчивост на окисляване. Поради ниските температури на топене на благородните метали, обаче, в тези сплави се прибавят като компоненти и метали с висока температура на топене.

Платино-иридиевата сплав (80% платина и 20% иридий) е много устойчива на корозия, има повишена устойчивост на ерозия и е 2-3 пъти по твърда от платината. Контактите от тази сплав допускат голяма честота на прекъсване на тока при твърде дълъг срок на експлоатация.

Сплавите на основата на златото и среброто се използват за прекъсващи контакти на токове до 5A и неголяма честота на превключване (до едно превключване на 5 s). Имат висока твърдост, устойчивост на ерозия и заваряване. Прибавянето на трети компонент към тези сплави (като например платина, цирконий и др.) повишава устойчивостта им на окисляване.

Контактните сплави на основата на сребро имат около два пъти по-голяма твърдост от чистото сребро и повишената устойчивост против образуването на сулфидно покритие върху повърхнината в присъствието на пари на сярата.

Сребърно-кадмиевите сплави притежават свойството под действие на електрична дъга да образуват кадмиев оксид. При високи температури той се разлага, като отделя газове, които способстват за гасене на електричната дъга.

Освен изброените до тук сплави за триещи и маломощни прекъсвачи контакти, се използват още сплавите на злато, сребро, никел с паладий, волфрам с молибден и др.

Електровъгленови изделия. Изработват се от сажди, графит или антрацит, смесени със свързващо вещество, което обикновено е каменовъглена смола или течно стъкло. Изделията се подлагат на изпичане, при което се получава различно състояние на въглерода в тях.

Използват се най-често във вид на четки, които са предназначени за създаване на плъзгащ контакт между неподвижна и въртяща се част на електричните машини и като плъзгащ или търкалящ се контакт в автотрансформатори.

ТЕМА 5. Полупроводникови материали. (Нелинейни елементи на базата на полупроводникови химични съединения).

5.1. Общи сведения

Полупроводниците са материали със специфично съпротивление при нормална температура в границите $10^{-5} \div 10^8$, $\Omega \cdot m$. Те, както и металите, притежават електронна проводимост, но преминаването на електричен ток през тях е сложно квантово явление.

Присъщи на полупроводниковите материали свойства са:

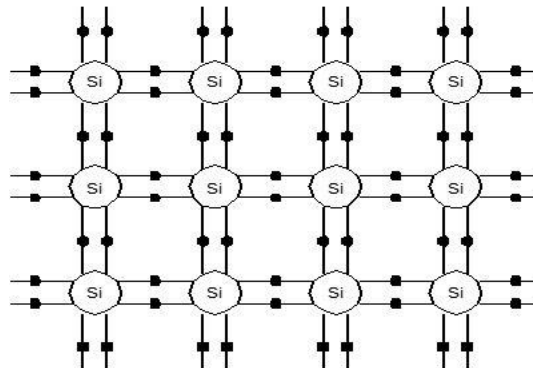
- многократно изменение на специфичното съпротивление в резултат на външни енергетични въздействия – светлина, топлина, електрично и магнитно поле, механични напрежения и др.;

- значителна зависимост на електричната проводимост от примеси;

- чрез подходяща технология е възможно реализиране на елемент с еднопосочна електрична проводимост.

5.2. Структура на елементарните полупроводникови материали

За изясняване на механизма на преминаване на електричен ток през полупроводниците ще бъде разгледан равнинен модел на кристал от чист *Si* (фиг. 5.1). Всеки валентен електрон в кристала се групира в двойка с електрон от съседен атом. Така чрез електронни двойки даден атом е в ковалентна връзка с 4 свои съседа.



Фиг.5.1

При абсолютна нула (0, K) свободни електрони липсват и полупроводникът е идеален диелектрик.

5.3. Собствена проводимост на полупроводниците

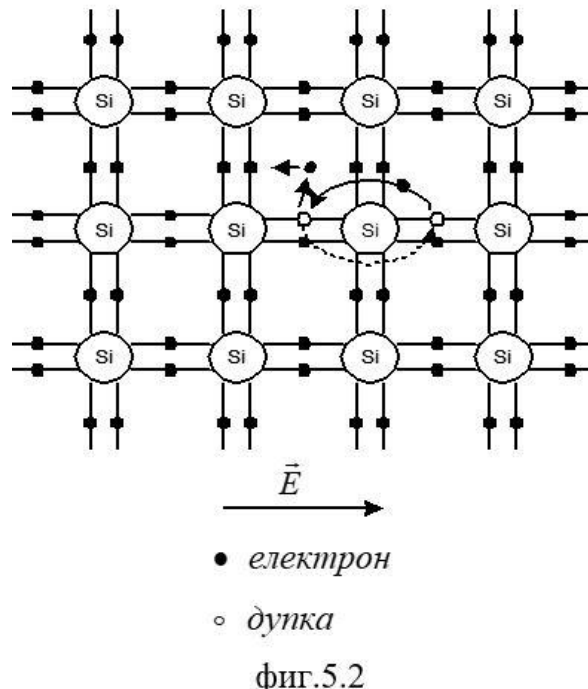
Чист полупроводник, в който няма примеси и дефекти, се нарича *собствен полупроводник*.

При външни енергетични въздействия някои от валентните електрони се откъсват от атомите и стават свободни. В същото време в атом, от който се освобождава електрон, остава некомпенсиран положителен заряд. Вакантното място на електрона в една разкъсана връзка се нарича *дупка*. Привличайки съседен електрон, некомпенсираният положителен заряд го откъсва и така се възстановява нарушената връзка. Дупката се премества при атома, от който е дошъл новият електрон. Може да се приеме, че дупката е фиктивна частица с положителен електричен заряд $+e$, равен по големина на заряда на електрона ($-e$).

Едновременно с генериране на свободни електрони и дупки в полупроводниците се извършва и *рекомбинация*, при която електроните взаимодействат с дупките и нарушените ковалентни връзки се възстановяват. По такъв начин в полупроводника се установява динамично равновесие и концентрацията на електрони и дупки се запазва постоянна при определена интензивност на енергетичното въздействие.

Очевидно е, че в чист полупроводник броят на свободните електрони е равен на броя на дупките.

В електрично поле свободните електрони се движат в посока, обратна на посоката на полето, а дупките – в посока на полето – през полупроводника протича електричен ток. (При движение на дупки реално се движат валентни електрони)



Свободните електрони се наричат *N-токоносители* (от английската дума *negative* – отрицателен), а дупките – *P-токоносители* (от *positive* – положителен).

Електричната проводимост на чист полупроводник се нарича *собствена*, тъй като се обуславя от собствени токоносители

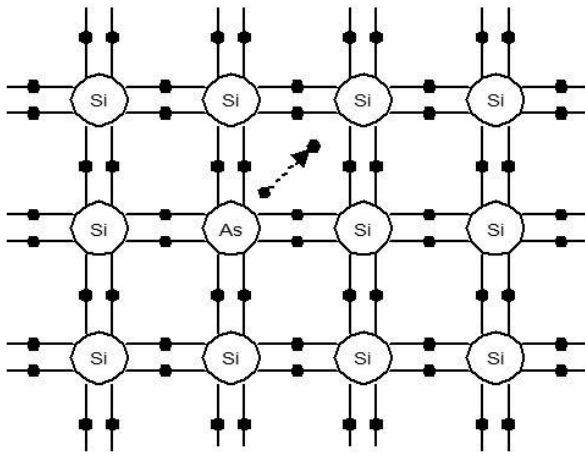
5.4. Примесна проводимост

Много по-голяма концентрация на токоносителите се получава, когато в полупроводника има примеси от атоми на друг елемент.

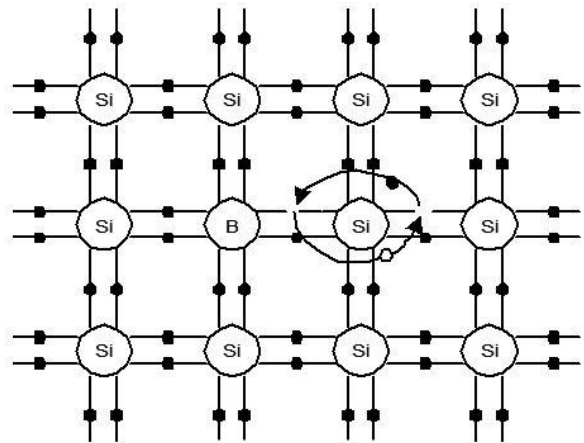
Ако атом на Si в кристалната решетка се замени с атом на 5-валентен елемент, например As (арсен) (фиг. 5.3), неговият пети валентен остава несвързан в електронна двойка. Поради това връзката му с атома е слаба и той лесно се откъсва от него. В такъв кристал има свободни електрони. Полупроводникът притежава електронна проводимост (N -проводимост) и се нарича полупроводник от N -тип.

Некомпенсираният положителен заряд на As остава неподвижен и не участва в проводимостта.

Примеси, които довеждат до поява на свободни електрони в полупроводниците, се наричат *донори*.



Фиг. 5.3



Фиг. 5.4

Нека в кристалната решетка на силиция, силициев атом е заместен с атом на тривалентен елемент, например B (бор). Този атом има 3 валентни електрона и чрез тях може да осъществи ковалентна връзка с 3 силициев атома (фиг.5.4). Връзката с четвърти атом остава неосъществена. Така възниква празно място (*дупка*), към която може да прескочи електрон от съседна ковалентна връзка и незаेतото място (дупката) се премества. Полупроводникът придобива дупчеста проводимост (P -проводимост) и се нарича полупроводник от P -тип.

Некомпенсираният отрицателен заряд на борния атом не може да се движи в кристала и да участва в проводимостта.

Примеси, които обуславят дупчеста проводимост, се наричат *акцептори*

Токоносителите, чието количество в даден полупроводник е преобладаващо, се наричат *основни*. В реалните примесни полупроводници винаги има малки количества от другия тип носители. Те се наричат *неосновни*.

Разгледаният механизъм на електричната проводимост обяснява силната ѝ зависимост от външни енергетични въздействия – те увеличават количеството на токоносителите.

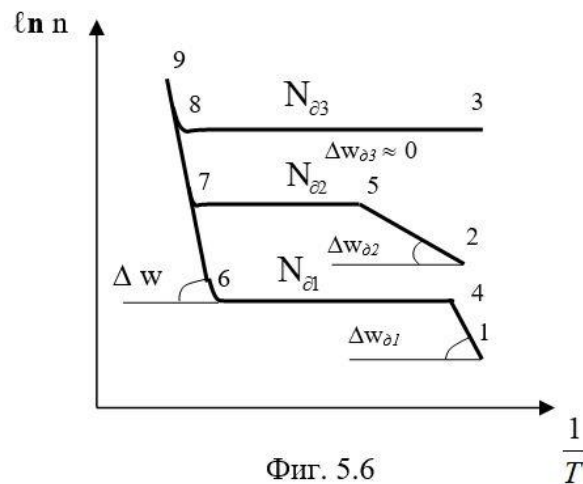
5.5. Зависимост на проводимостта от различни фактори

5.5.1. Температурна зависимост на проводимостта.

Проводимостта на даден полупроводник се определя от концентрацията на токоносителите и подвижността им.

Температурна зависимост на концентрацията на токоносителите.

В широк температурен диапазон и за различно съдържание на примеси са в сила температурните зависимости на концентрацията на носителите в полупроводник от N- тип, изобразени на фиг.5.6.



В областта на ниските температури зависимостта $\ln n = f(\frac{1}{T})$ се представя чрез участък 1-4 от графиката. Концентрацията на токоносителите се обуславя само от примесите. Наклонът на графиката се определя от актива-ционната енергия ΔW_d .

С повишаване на температурата броят на носителите, доставяни от примесите расте, докато не се изтощят електронните ресурси на примесните атоми. В участъка 4-6 примесите са изтощени, а преход на електрони през забранената зона още не се осъществява. При по-нататъшно повишаване на температурата започва бързо нарастване на концентрацията на носителите вследствие на преход на електрони през забранената зона (участък 6-9). Наклонът на тази част от графиката характеризира ширината на забранената зона ΔW .

Ъгълът на наклона на участък 1-4 зависи от концентрацията на примесните атоми N_{d1} . Колкото е по-голяма е концентрацията на примесните атоми ($N_{d1} < N_{d2} < N_{d3}$), толкова по-малка е енергията на активация ($\Delta W_{d1} > \Delta W_{d2} > \Delta W_{d3}$).

При достатъчно голяма концентрация на примесите $\Delta W_{d3} \approx 0$. Кривата се състои от две части-3-8 и 8-9. В първата концентрация на носителите на заряд е постоянна до температури, при които електрони започват да преминават през забранената зона.

Зависимост на подвижността на токоносителите от температурата

В полупроводниците с атомна решетка разсейването на носителите се дължи на топлинните колебания на решетката и на йонизираните примеси. Тези два механизма на разсейване водят до поява на два участъка в температурната зависимост на подвижността. При разсейване от топлинните колебания на решетката, подвижността намалява и се подчинява на зависимостта:

$$\mu \sim \frac{1}{T^{3/2}} .$$

При ниски температура топлинното разсейване е незначително и преобладаващо е разсейването от йонизирани примеси. В този случай е характерно намаляването на разсейването на движещите се частици при увеличаване на скоростта, тъй като те се намират по-малко време под влияние на полето на йонизираните примесни атоми. Затова с повишаване на температурата подвижността расте:

$$\mu \sim T^{3/2} .$$

5.5.2. Влияние на деформацията върху проводимостта на полупроводниците

Проводимостта на твърдите кристални тела се изменя от деформация вследствие на увеличаване или намаляване на междуатомните разстояния, водещо до изменение на концентрацията и подвижността на токоносителите.

Концентрацията на носителите на заряд намалява или нараства вследствие на изменение ширината на енергетичните зони и изместване на примесните нива, което от своя страна води до изменение на енергията на активация на носителите на заряд.

Подвижността на носителите се изменя при увеличение или намаляване на амплитудата на колебания на атомите при тяхното отдалечаване или сближаване.

В различни полупроводници една и съща деформация може да предизвика както увеличение, така и понижаване на проводимостта.

Величината, числено характеризираща изменението на специфичната проводимост на полупроводниците при деформация, е тензочувствителността

$$d_{\rho} = \frac{\frac{\Delta\rho}{\rho}}{\frac{\Delta l}{l}}, \quad (5.1)$$

която представлява отношение, между относителното изменение на специфичното съпротивление и относителната деформация в дадено направление.

5.5.3. Фотопроводимост

Фотопроводимост се нарича увеличението на електричната проводимост или все едно намаляване на специфичното съпротивление на веществата под действие на електромагнитно излъчване (в частност светлина).

Енергията на един фотон е:

$$W_{\phi} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}, \quad (5.2)$$

където $h = 4,13 \cdot 10^{-15}$, eV.s е константа на Планк, ν - честота на светлинната вълна в Hz, $c = 3 \cdot 10^8$, m/s - скорост на светлината във вакуум, λ - дължина на вълната в m; W_{ϕ} е в eV. [При преобразуване на уравнение (5.1) е използвана зависимостта $\lambda \nu = c$].

Когато попадне фотон в собствен полупроводник енергията W_{ϕ} се изразходва за образуване на двойка електрон-дупка за сметка на преминаване на електрон от валентната зона в зоната на проводимостта. За това е необходимо да бъде изпълнено условието:

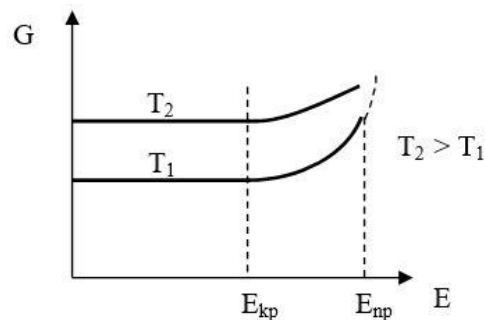
$$W_{\phi} \geq \Delta W.$$

Съществува гранична честота $\nu_{ГР}$ респективно гранична дължина на вълната $\lambda_{ГР} = c/\nu_{ГР}$, при които енергията на фотона е достатъчна за възбуждане на електрон от най-горното ниво на валентната зона до най-ниското ниво от зоната на проводимостта.

5.5.4. Електропроводимост на полупроводниците в силно електрично поле

Слабо е такова поле, в което проводимостта не зависи от интензитета, т.е. в сила е законът на Ом. Силни са полета, в които проводимостта се оказва зависеща от интензитета.

Критичен интензитет на полето $E_{кр}$ е този, който условно може да се приеме за граница между областите на слаби и силни полета (фиг. 5.7). Тази граница зависи от природата на полупроводника, концентрацията на примесите и температурата.



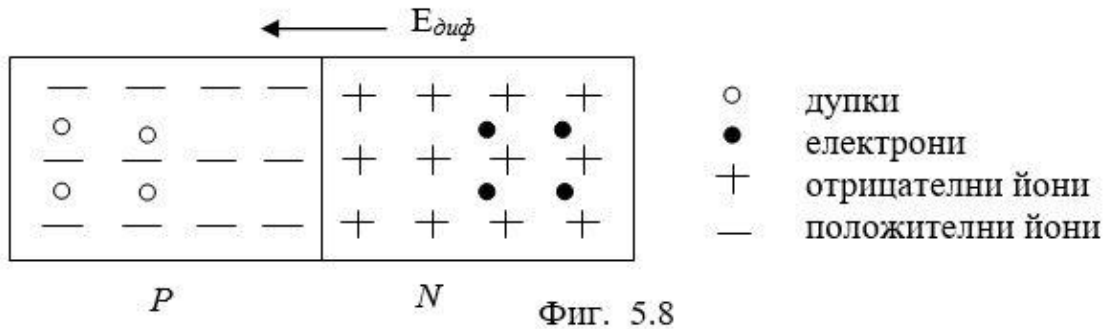
Фиг. 5.7

При интензитети $10^6 \div 10^7, \frac{V}{m}$ в полупроводника започват да се появяват нови носители и специфичната му проводимост нараства.

5.5.5. Свойства на PN преход

Чрез внасяне подходящи примеси в полупроводник, могат да се образуват 2 части с различни видове проводимост: P и N. Границата между двете области се нарича PN преход.

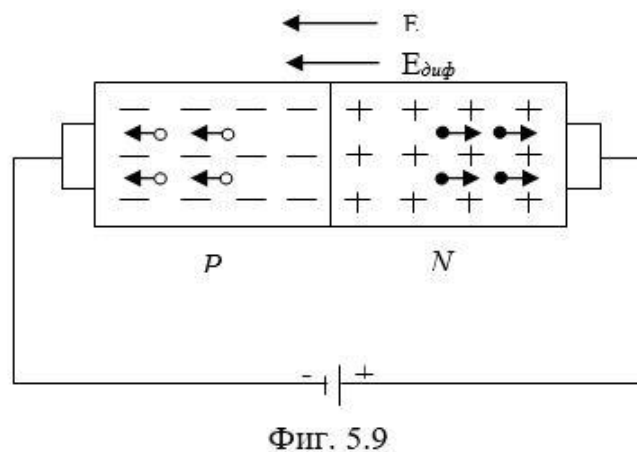
P- полупроводникът съдържа дупки и свързани с кристалната решетка отрицателни акцепторни йони; *N*- полупроводникът съдържа свободни електрони и свързани с кристалната решетка положителни донорни йони (фиг. 5.8).



След създаване на *PN* прехода започва проникване (дифузия) на дупки и електрони от едната област в другата. Дупките, проникнали в *N*-областта рекомбинират с намиращите се там свободни електрони. По същия начин електроните, проникнали в *P*- областта рекомбинират с намиращите се там дупки. В резултат на това акцепторните и донорните йони в граничната област вече не са неутрализирани и представляват неподвижни обемни заряди с противоположни знаци. Те създават вътрешно електрично поле - *дифузионно поле* - с интензитет $E_{диф}$. То е потенциална бариера, която спира по-нататъшното проникване на дупки от *P*- в *N*- областта и на електрони от *N*- в *P*- областта.

Поради рекомбинацията на преминалите през прехода електрони и дупки граничната област обеднява на токоносители, притежава голямо съпротивление и затова се нарича *спиращ слой*.

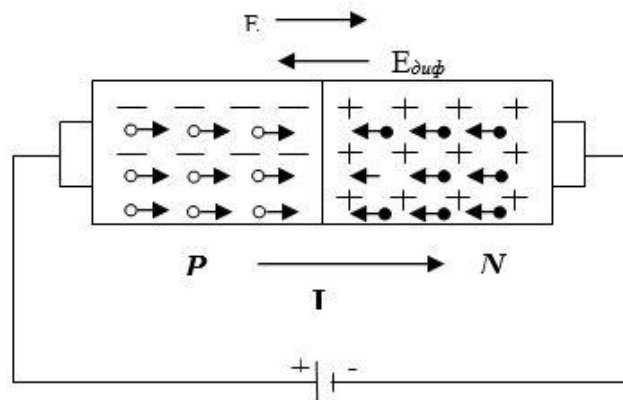
Най-важно свойство на *PN*- прехода с неговата едностранна проводимост. Това означава, че в едната посока неговото съпротивление е голямо, а в другата - малко. За да се изясни тази особеност, първо се разглежда така нареченото обратно включване на прехода, при което неговото съпротивление е голямо – положителният полюс на източник е свързан с *N*- областта, а отрицателният - с *P*- областта (фиг.5.9).



При това включване дифузионното поле и външното поле са еднопосочни и в прехода действа сумарно поле с увеличен интензитет ($E_{диф} + E$). То действа на токоносителите и те се отдалечават от прехода, т.е. обеднената зона (спирацията слой) се разширява и съпротивлението на прехода нараства.

Поради наличие на неосновни токоносители – N в P - областта и P в N - областта- при обратно включване през реалния PN преход протича малък обратен ток.

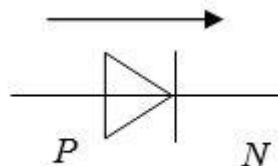
При право включване на прехода положителният полюс на източника е свързан с P - областта, а отрицателният – с N - областта (фиг.5.10).



Фиг. 5.10

Дифузното и външното поле са противоположни и в прехода действа разликата между техните интензитета: $E_{диф} - E$. PN - преходът се стеснява и при $E \geq E_{диф}$ спирацията слой се разгражда. Основните носители от P - и N - областта проникват съответно в N - и P - областта, където те се оказват неосновни и рекомбинират с намиращите се там основни токоносители. От отрицателния полюс на източника в N областта постъпват нови електрони. От P - областта към положителния полюс преминават електрони и освобождават дупки. PN - преходът притежава малко съпротивление и през него протича ток.

PN - преходът се използва в голяма част от съвременните полупроводникови елементи – диоди (фиг.5.11), биполярни транзистори, тиристоры, динистори, биполярни интегрални схеми.



Фиг.5.11

5.6. Видове полупроводникови материали

5.6.1. Химични елементи със свойствата на полупроводници

Най-широко използвани материали от тази група са германият и силицият, намиращи се в IV група от Менделеевата таблица. Към тях се причисляват също селенът и телурът (VI група от Менделеевата таблица), но те имат ограничено приложение.

Германият представлява крехък, светлосив материал. Неговото съществуване е предсказано от Менделеев през 1870г., който го е нарекъл екасилиций. През 1886г. е открит от Винклер, който му дава съвременното наименование. Германият е твърде рядък елемент – съдържанието му в земната кора се оценява на около $7.10^{-4}\%$. Получава се от GeCl_4 , който се хидролизира, докато се получи GeO_2 . Последният се редуцира до прахообразен германий във водородна среда и се преработва чрез топене в графитна ладия и инертна атмосфера до получаване на германиеви слитъци. По-нататъшната обработка има за цел почистване на германиевите слитъци от примесни атоми и кристализация до получаването на бездефектни кристали с необходимата чистота. Това става по методите на зонното топене или изтегляне на кристал от течна фаза.

Примесните германиеви полупроводници от *N* - тип се получават чрез легиране с антимон или арсен, а от *P* - тип – чрез легиране с галий. Работният температурен интервал за германиевите елементи е от -60 до $+70^\circ\text{C}$.

Сравнително ниската горна гранична температура е сериозен недостатък на германиевите прибори.

Изработеният през 1948г. транзистор е германиев, но впоследствие постепенно германият започва да отстъпва на силиция като материал за изработване на полупроводникови елементи. Независимо от това, той се използва за изработване на специални прибори – датчици на магнитни полета, оптични лещи за инфрачервени лъчи, оптични филтри, модулатори на светлината, броячи на ядрени частици.

Силицият никога не е срещан в чист вид в природата, макар че е един от най-разпространените елементи в земната кора (около 25%) – най-често като силициев диоксид. От силициевите оксидни съединения се получава SiCl_4 или SiHCl_3 , а от тях чрез редукция във водородна атмосфера се редуцира силиций. Пречиштането на силиция става по метод на безтиглово зонно топене или изтегляне на кристали. Силицият има висока температура на топене (1414°C), при която е химически силно активен.

По-широката забранена зона определя и по-високата работна температура на силициевите полупроводникови елементи. Силиций от *N*-тип се получават чрез легиране с фосфор, а от *P*-тип - чрез легиране с индий. В зависимост от концентрацията на неконтролираните примеси (чистотата) силициевите полупроводникови елементи имат горна гранична работна температура в интервала $120-200^\circ\text{C}$. Това е сериозно предимство пред германиевите елементи.

Силицият се използва широко в производството на диоди, транзистори, интегрални схеми, слънчеви елементи и др.

Селенът съществува в няколко разновидности с различен цвят и кристален строеж. Полупроводник е сивият кристален селен.

Приложението му в съвременното производство на полупроводникови прибори е ограничено. От него се изработват светлочувствителни елементи.

5.6.2. Химични съединения със свойствата на полупроводници

Полупроводникови материали от типа $A^{IV}B^{IV}$. (Символът означава съединение на елементи от IV група с елементи от IV група на Менделеевата таблица).

Типичен представител е силициевият карбид (SiC). Получава се при висока температура от кварцов пясък в присъствие на въглерод. В зависимост от примесите цветът му се изменя от черен, зелен, оранжев, светлосин до безцветен.

При нормална температура проводимост-та му е примесна. Типът на проводимостта освен от примесите зависи и от съдържанието на свободен Si или свободен C.

От зърна SiC със свързващи вещества се получават различни многофазни материали: тирит – SiC с глина, вилит – SiC с течно стъкло и др. От тях се изработват нелинейни резистори - варистори, чието съпротивление намалява с повишаване на приложеното върху тях напрежение.

Произвеждат се най-често във вид на дискове. Волт-амперната им характеристика е нелинейна (фиг. 5.12) и се подчинява на уравнението

$$I = BU^\beta,$$

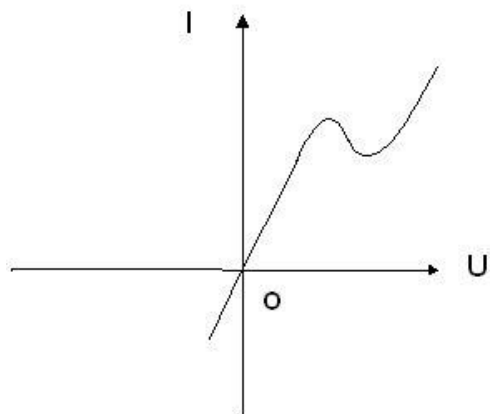
където B и β са константи, характерни за конкретен образец; β се нарича *коэффициент на нелинейност*.

Полупроводникови материали от типа $A^{III}B^V$

Основният метод за получаване на тези съединения е чрез непосредствено взаимодействие на елементите във вакуум или инертна среда.

Увеличаването на сумарния атомен номер на съединението води до стесняване на широчината на забранената зона.

Галиевият арсенид (GaAs) е тъмносив материал. Широчината на забранената му зона е по-голяма от тази на Ge и Si, а също така и подвижността на токоносителите му е по-голяма. Широката забранена зона обуславя висока работна температура (до около 450°C), а голяма подвижност на токоносителите – възможност за работа във високочестотно електрично поле. Използва се за изработване на тунелни диоди [диоди, в чиято волт-амперна характеристика има падащ участък (фиг.5.12), фотолуминесцентни източници на светлина (светодиоди), полупроводникови лазери, детектори на ренгеново лъчение].



Фиг.5.12

Индиевият антимоид ($InSb$) е блестящ материал. Той е с много тясна забранена зона и много голяма подвижност на токоносителите. При нормална температура материалът има собствена проводимост поради тясната забранена зона.

Използва се за изработване на датчици на магнитно поле, детектори на инфрачервено лъчение, термоелектрични генератори и охладители.

Галиевият фосфид се използва за изработването на светодиоди с червено или зелено светене в зависимост от примесите.

Полупроводникови материали от типа $A^{II}B^{VI}$.

Типични представители са сулфидите – кадмиев сулфид (CdS), цинков сулфид (ZnS) (ширината на забранената му зона е $\Delta W=3,6$ eV и по този показател би трябвало да се причисли към диелектриците); селенидите – кадмиев селенид ($CdSe$), живачен селенид ($HgSe$); телуриди – кадмиев телурид ($CdTe$), живачен телурид ($HgTe$), $ZnTe$, а също оловен сулфид (PbS), бисмутов сулфид (Bi_2S_3). Използват се за изработване на фоторезистори (резистори, чието съпротивление намалява при осветяване).

Сулфидите се прилагат в качеството на луминофори – вещества, които преобразуват погълнатата от тях енергия в светлина.

5.6.3. Оксидни полупроводникови материали

Използват се за изработване на термистори – резистори с отрицателен температурен коефициент на съпротивлението. С цел получаване на точно определени свойства се прилагат смеси от оксиди ($CuO - Mn_3O_4$; $NiO - Mn_3O_4$; $NiO - Co_3O_4 - Mn_3O_4$ и др.)

ТЕМА 6. Магнитни материали

6.1. Основни понятия

Известно е, че магнитното поле се поражда от движещи се електрични заряди. От друга страна движещи се в магнитно поле заряди изпитват действието на сили.

Характеристика на магнитното поле е векторната величина магнитна индукция \vec{B} , чиято големина е

$$B = \frac{M_{\max}}{m} = \frac{M_{\max}}{IS} . \quad (6.1)$$

Дименсията за \vec{B} е *Тесла* (Т)

Освен с магнитна индукция, магнитното поле се характеризира с величината *интензитет* \vec{H} (с дименсия А/м). Дефинира се чрез уравнението

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{H}_i , \quad (6.2)$$

където, $\mu_0 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ H / m}$ (Хенри на метър) е магнитна константа.

Намагнитността \vec{H}_i е пропорционална на интензитета на полето \vec{H}

$$\vec{H}_i = \chi_m \vec{H} , \quad (6.3)$$

където коефициентът на пропорционалност се нарича магнитна възприемчивост (безразмерна величина).

При вземане под внимание на уравнение (6.3) от (6.2) следва

$$\vec{B} = \mu_0 (\chi_m + 1) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H} . \quad (6.4)$$

Величината $\chi_m + 1 = \mu_r$ се нарича относителна магнитна проницаемост.

За вакуум $\chi_m = 0, \mu_r = 1$ и

$$\vec{B} = \vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H} . \quad (6.5)$$

При сравняване на уравнения (6.4) и (6.5) се получава:

$$\vec{B} = \mu_r \vec{B}_0$$

$$\text{или } \mu_r = \frac{B}{B_0} . \quad (6.6)$$

Следователно **относителната магнитна пропорционалност μ_r е равна на отношението между магнитната индукция във веществото и индукцията на външното магнитно поле, създадено във вакуум.**

Величините χ_m и μ_r характеризират магнитните свойства на материалите.

6.2. Видове магнетизъм

Различават се 5 вида магнетизъм: *диамагнетизъм*, *парамагнетизъм*, *феромагнетизъм*, *антиферомагнетизъм* и *феримагнетизъм*. Веществата, за които са свойствени тези видове магнетизъм, се наричат съответно *диамагнетици*, *парамагнетици*, *феромагнетици*, *антиферомагнетици* и *феримагнетици* (*ферити*).

За *диамагнетиците* χ_m е отрицателна величина с много малка стойност от порядъка - 10^{-6} . Съответно $\mu_r < \approx 1$.

Диамагнетизмът се проявява в материали, при които има пълно компенсиране на всички орбитални и спинови магнитни моменти. Диамагнетици са например всички инертни газове, вода, цинк, злато, живак и др.

Парамагнетиците имат положителна магнитна възприемчивост със стойност от порядъка 10^{-3} - 10^{-6} , т.е. $\mu_r > \approx 1$.

Парамагнетизмът е явление, което се наблюдава във вещества, чиито атоми (молекули или йони) притежават постоянен магнитен момент, дължащ се на некомпенсирани магнитни моменти, обусловени от орбитални движения на електроните. Парамагнетици са например Al, Pt.

Феромагнетиците са вещества, притежаващи свойството силно да се намагнитват във външно магнитно поле и частично да съхраняват намагнитеността си при премахване на полето. Имат положителна магнитна възприемчивост, достигащи до 10^5 - 10^6 , т.е. $\chi_m \gg 1$, респективно $\mu_r \gg 1$.

Изследванията показват, че феромагнетизмът има не орбитален, а спинов произход.

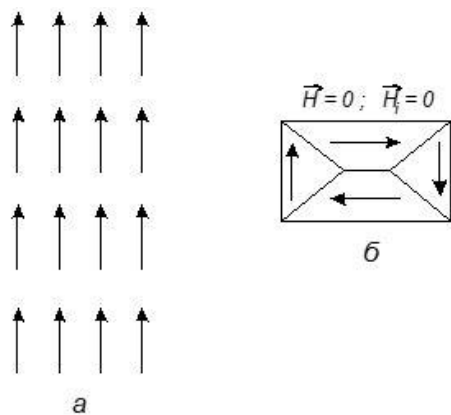
Феромагнетици са химични елементи (метали) с недостроени вътрешни електронни слоеве, съдържащи електрони, чиито спинови магнитни моменти не са взаимно компенсирани. Такива са желязо (*Fe*), кобалт (*Co*), никел (*Ni*), гадолиний (*Gd*).

Във феромагнетиците има спонтанно намагнитени макрообласти с размери от порядъка 10^{-4} - 10^{-6} m, в които всички магнитни моменти на атомите (молекулите или йоните) са еднопосочно ориентирани (фиг.6.1.а)

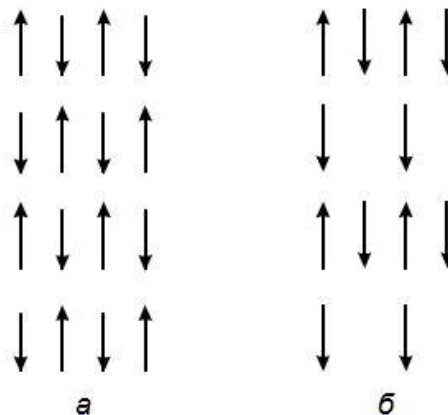
В ненамагнитен образец при отсъствие на външно магнитно поле магнитните моменти на домените са насочени базразборно в целия обем и намагнитеността $\vec{H}_i = 0$ (фиг.6.1.б).

Антиферомагнетиците се характеризират с антипаралелно ориентиране на некомпенсирани магнитни моменти на съседни атоми (молекули, йони) (фиг.6.2.а.). Те са подобни на слаби парамагнетици.

Антиферомагнетик е например хромът (*Cr*).



Фиг.6.1



Фиг.6.2

Феримагнетизмът е некомпенсиран антиферромагнетизъм. Наблюдава се, когато насочените антипаралелно некомпенсирани магнитни моменти на съседни атоми (молекули, йони) са с различни големина или когато не е еднакъв броят на противоположно насочените моменти (фиг.6.2.б). Феримагнетизъм могат да притежават само химични съединения Съдържат Fe_2O_3 и един или повече оксиди на двувалентни (порядко едновалентни) метали.

Феримагнетиците (феритите) имат доменна структура , магнитната им възприемчивост и съответно относителната магнитна проницаемост са много по- големи от 1, следователно те , подобно на феромагнетиците притежават способността силно да се намагнитват във външно магнитно поле. Някои ферити се отличават с голямо специфично съпротивление.

Въпреки, че по същността на магнитните си свойства диамагнетиците, парамагнетиците и антиферромагнетиците се различават помежду си, относителната им магнитна проницаемост μ_r е почти една и съща, близка до 1 и практически еднаква с тази на вакуум. Ето защо тези 3 групи вещества се отнасят към немагнитните материали.

Феромагнетиците и феритите образуват групата на силно магнитните вещества.Макар, че природата на магнетизма им е различна, те имат сходни магнитни свойства и често не се прави разлика между тях от потребителска гледна точка, освен в случаите, когато се използват някои техни специфични особености. В електротехниката и електрониката те се прилагат като *магнитни материали*.

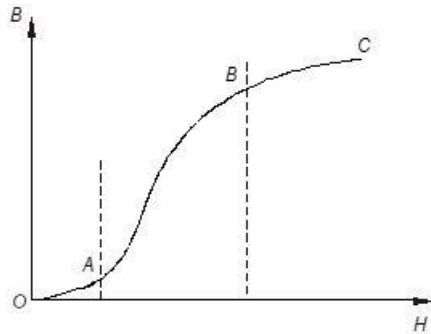
6.3. Криви на намагнитване

Ако образец от феромагнитен материал не е намагнитен, то при прилагане на магнитно поле с монотонно нарастващ интензитет H , магнитната индукция B ще нараства по така наречената *начална крива на намагнитване* (фиг.6.3). На тази крива се различават 3 характерни участъка: начален участък OA , характеризиращ се с малък наклон; среден участък AB с голям наклон; краен участък BC (зона на насищане) с малък наклон. Характерът на кривата на начално намагнитване се обяснява със следните процеси:

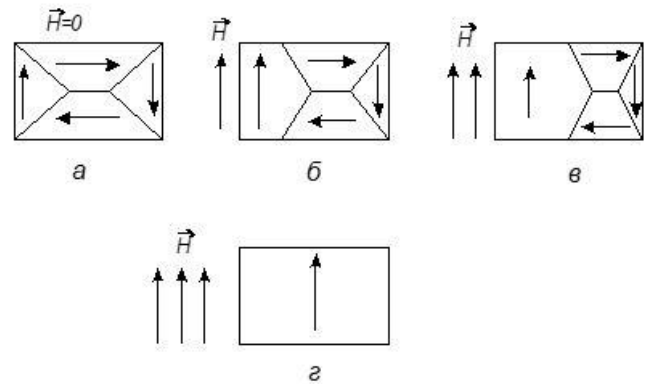
- в участък OA се извършва обратимо преместване на доменните граници – увеличават се размерите на тези домени, чиито магнитни моменти сключват остър ъгъл с интензитета \vec{H} на външното поле и намаляват размерите на домовете, чиито магнитни моменти сключват тъп ъгъл с \vec{H} (фиг.6.4.б);

- в участък AB доменните граници се преместват необратимо (фиг.6.4.в);

- в участък BC се завъртват векторите на магнитните моменти по посока на външното поле (фиг.6.4.г).



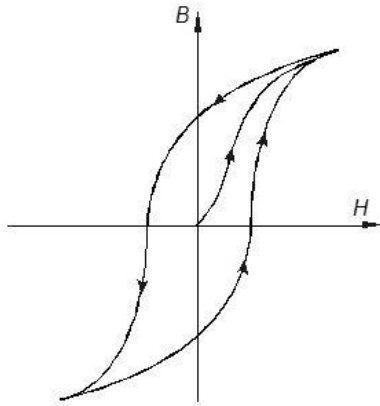
Фиг.6.3



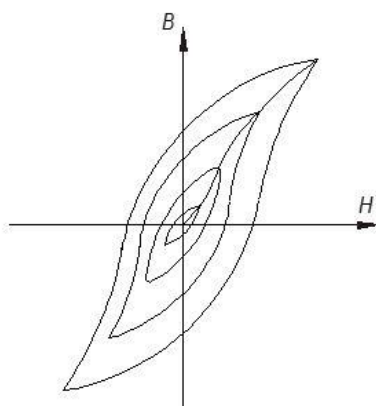
Фиг.6.4

Ако се намагнетизира феромагнетик в магнитно поле, а след това от дадена точка на началната крива на намагнитване интензитетът \vec{H} започва да намалява, магнитната индукция \vec{B} също ще намалява, но не по началната крива, а по друга, по-високо разположена. При увеличаване на \vec{H} в противоположна посока образецът се размагнитва и пренамагнитва, а при нова промяна на посоката на \vec{H} , \vec{B} може да възвърне първоначалната си стойност, т.е. ще бъде описана затворена линия, наречена *хистерезисна крива* (или *хистерезисен цикъл*) (фиг.6.5).

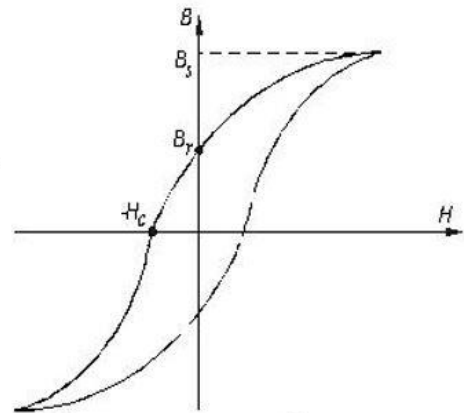
В зависимост от максималната стойност на H за един цикъл, може да се получи семейство хистерезисни криви (фиг.6.6). Ако се съединят върховете им с плавна линия, ще се получи *основната крива на намагнитване*.



Фиг. 6.5



Фиг. 6.6



Фиг. 6.7

Цикълът, при който се достига насищане, се нарича граничен. От него се дефинират 3, характерни за магнитните материали величини (фиг.6.7).

B_s е магнитна индукция на насищане. Стойността на B при $H=0$ в процеса на размагнитване на образец, намагнитен до насищане, се нарича остатъчна магнитна индукция: B_r . За да се намали магнитната индукция до 0, е необходимо да се приложи обратно поле с интензитет $-H_c$, наречен коерцитивен интензитет.

6.4. Ефекти в магнитните материали

6.4.1. Магнитострикция

Магнитострикция е промяна на линейните размери на феро- и феримагнитни вещества при намагнитване. Възниква в резултат на изменение на размерите на магнитните домени. Количествена характеристика на явлението е коефициентът

$$\lambda_s = \frac{\Delta l_s}{l_0} = \frac{l_s - l_0}{l_0}, \quad (6.7)$$

където l_0 е дължина на образец при отсъствие на поле; l_s – дължина на образца по направление на полето при насищане.

Това явление е характерно за всички магнитни материали. Коефициентът λ_s може да е както положителен, така и отрицателен. От феромагнитните метали най-голям по абсолютна стойност е за никел (Ni) (но с отрицателен знак). Следователно никелът се свива по направление на намагнитване, но се удължава в напречно направление.

6.4.2. Загуби на енергия в магнитните материали

Когато магнитен материал се намира в променливо магнитно поле, цикличното пренамагнитване се осъществява с определени загуби, отделящи се във вид на топлина.

Според причините загубата са:

- загуби от хистерезис;
- загуби от *вихрови токове** ;
- допълнителни загуби.

Загубите на мощност от хистерезис се подчиняват на уравнението

$$P_h = \eta f B_m^n V \quad (6.8)$$

където η е коефициент, зависещ от материала (основен химичен състав, примеси, текстура); f – честота; B_m – максимална стойност на магнитната индукция в цикъла; V – обем на образеца; степенният показател n е в границите $1,6 \div 2$.

Загубите от вихрови токове се определят от уравнението:

$$P_f = \xi f^2 B_m^2 V, \quad (6.9)$$

където ξ е коефициент, зависещ от материала (неговото специфично съпротивление, плътност); от формата и размерите на образеца.

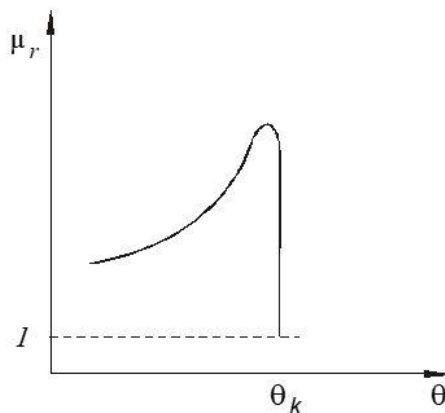
Поради факта, че P_f зависи от втората степен на честотата, а P_h – от първата, при високи честоти се отчитат преди всичко загубите от вихрови токове.

6.4.3. Зависимост на магнитните характеристика от различни фактори.

А. Влияние на температурата върху относителната магнитна проницаемост

Относителната магнитна проницаемост μ_r на феро- и феримагнитните материали зависи от температурата така, както е показано на фиг.6.8 – при загряване μ_r расте, достига максимум при температура около точката на Кюри θ_k , над която рязко спада до 1.

При $\theta > \theta_k$ областите на спонтанно намагнитване (домените) се разрушават от топлинното движение на частиците и материалът губи магнитните си свойства, като се превръща в парамагнетик. За желязото точката на Кюри е 768°C , за кобалта 1131°C , за никела 358°C .



Фиг.6.8.

Процесът на изменение на μ_r в зависимост от температурата е обратим – при охлаждане веществото отново възвръща магнитните си свойства.

Б. Зависимост на относителната магнитна проницаемост от честотата на магнитното поле

Както е известно, при променливо магнитно поле във всеки проводник, включително и в магнитните материали възникват вихрови токове, които с увеличаване на честотата нарастват. Те на свой ред също създават магнитно поле, което е противоположно насочено на намагнитващото поле, т.е. вихровите токове имат размагнитващо действие. Резултатната магнитна индукция спада от повърхността към вътрешността на образеца – ефективното му сечение намалява, съответно спада μ_r .

За ограничаване на вихровите токове при високи честоти се използват магнитни материали с голямо специфично съпротивление. Такива са магнитодиелектриците и феритите. В Фширок честотен диапазон тяхната относителна магнитна проницаемост остава постоянна, но при високи честоти, превишаващи определена критична стойност за даден материал μ_r , намалява поради инертността на пренамагнитване, свързана с инертността на доменните граници.

6.5. Класификация на магнитните материали

Използваните в електротехниката и електрониката материали се класифицират на:

1. Магнитно меки – характеризиращи се с малък коерцитивен интензитет и голяма относителна магнитна проницаемост. Хистерезисният им цикъл е тесен (фиг.6.9.а).

2. Магнитно твърди – с голям коерцитивен интензитет и малка относителна магнитна проницаемост. Хистерезисният им цикъл е широк (фиг.6.9.б).

Условна гранична стойност на H_c , по която се различават магнитно меките и магнитно твърдите материали е $4 \frac{kA}{m}$.

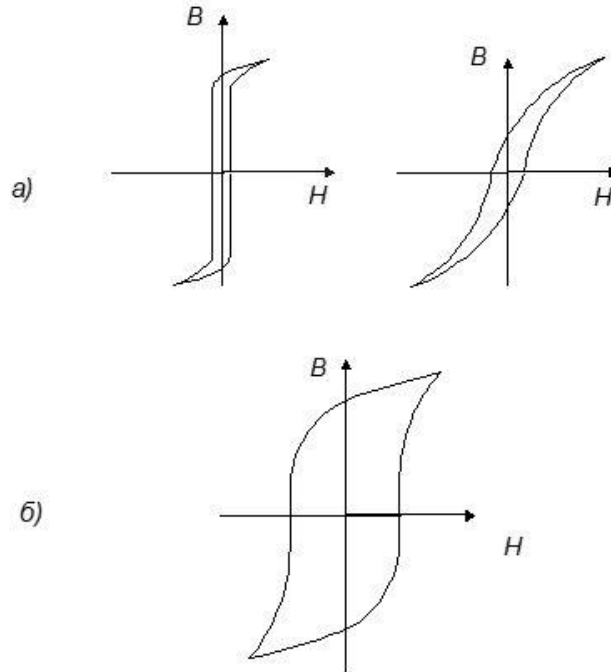
3. Магнитни материали със специално предназначение

Магнитно меките материали се делят на нискочестотни и високочестотни. Вторите са с повишено или високо специфично съпротивление.

Магнитно твърдите се делят на материали за постоянни магнити и за запис и съхранение на информация.

Магнитните материали със специално предназначение са:

- а) с правоъгълен хистерезисен цикъл;
- б) магнитострикционни;
- в) термомагнитни;
- г) материали с голяма магнитна индукция на насищане и др.



Фиг.6.9.

6.5.1. Магнитно меки материали за ниска честота

Магнитно меките материали се характеризират с голяма магнитна проницаемост, малък коерцитивен интензитет и малки загуби от хистерезис.

Към магнитно меките материали се отнасят:

Електролитно желязо – получава се чрез електролиза на разтвор от железен сулфат или железен двухлорид.

Карбонилно желязо – получава се чрез термично разлагане на железен пентакарбонил.

Употребяват се при производството на цели ядра за постоянен магнитен поток. Използват се за високочестотни ядра, които се изработват от пресован железен прах с електроизолационни свързващи вещества.

Електротехническа стомана. Характерно за този вид материал е въвеждането на силиций в състава му. С това се цели повишаване на електричното съпротивление и магнитната проницаемост и намаляване на коерцитивния интензитет и загубите от хистерезис. Количеството на въведения в състава силиций не трябва да надхвърля 4%, тъй като в противен случай се получава много крехък материал.

Електротехническа стомана се употребява за магнитопроводи в електрическите съоръжения. Съдържащата по-голям процент силиций (наречена трансформаторна ламарина) служи за направа на магнитопроводи на трансформатори и дросели, а тази с по-

малък процент (наречена още динамоламарина) – за направа на магнитопроводи в електрическите въртящи се машини.

Необходимо е да се подчертае, че независимо от относително високото електрично съпротивление, което електротехническата стомана притежава, за да се намалят до минимум загубите от вихрови токове, магнитопроводите се събират от отделни листове, изолирани по между си.

Желязно-никелови слави. Сплавите със съдържание на никел от 35 до 85% се наричат пермолой. Те се характеризират с висока начална и максимална относителна магнитна проницаемост, която достига 200000, и малък коерцитивен интензитет – 1,6А/м. Недостатъците на този вид сплави са малкото електрично съпротивление и зависимостта на магнитната проницаемост от честотата (за честоти над 100Hz). Употребяват се главно в съобщителната апаратура, в телефонната и радиопромишлеността за производство на магнитопроводи за релета, индукционни бобини, магнитофонни глави, магнитни екрани и др.

Сплави на желязото със силиций и алуминий. Сплав със състав желязо, силиций - 9,5%, алуминий – 5,6% се нарича *алсифер*. Тя се характеризира с твърдост и крехкост, високи начална и максимална магнитна проницаемост и малък коерцитивен интензитет. Алсиферът се употребява при производството на магнитни екрани и корпуси на уреди. Смятан за фин прах, той се използва при производството на магнитопроводи, които работят при висока честота.

6.5.2. Магнитно меки материали за висока честота

Магнитодиелектрици – двукомпонентни магнитни материали от прах на магнитно мек материал (карбонилно желязо, алсифер, магнетит – $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$) и диелектрик (шеллак, фенолформалдехидна смола, полистирол, течно стъкло, керамика), който изолира една от друга феромагнитните частици и същевременно ги свързва механично. Намират приложение при производството на сърцевини за бобини, работещи при висока честота в слаботоковата техника.

Ферити - голяма група магнитни материали, известни още като магнитни керамики. Получават се по методите на керамичната технология от метални оксиди като изходни материали, които се отнасят към групата на полупроводниковите материали и диелектрици според поведението им в електричното поле. Това означава, че те имат високо специфично съпротивление, с което удовлетворяват едно от изискванията към високочестотните магнитни материали.

Феритите представляват система от един или няколко метални оксиди (по-често на двувалентен и по-рядко на едновалентен метал), които заедно с двужелезния триоксид (Fe_2O_3) участват в сложна кристална структура. Тяхната химична формула в обобщен вид е $\text{MO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, където с М е означен металният йон (Mn, Ni, Cu и др.). Феритите, в които участва само един метален оксид освен Fe_2O_3 , се наричат моноферити, а такива с повече оксиди – полиферити.

Според функцията, която изпълняват феритите се разделят на магнитно меки, с правоъгълен хистерезисен цикъл, СВЧ* - ферити и магнитно твърди. Феритите се разделят на групи и според състава – никел–цинкови (Ni-Zn), манган–цинкови (Mn-Zn), манган-магнезиеви Mn-Mg), манган-медни (Mn-Cu), литий-никелови (Li-Ni) и др.

6.5.3. Магнитно твърди материали

Магнитно твърдите материали се характеризират с голям коерцитивен интензитет и голяма магнитна енергия.

Основната им употреба е за направа на различни видове постоянни магнити. Към тази група спадат следните материали:

- *закалена въглеродна стомана* – най-евтиния магнитно твърд материал с остатъчна магнитна индукция до 0,9Т и коерцитивен интензитет до 4760А/м. Основен недостатък е липсата на стабилност и размагнитване под влияние на механични въздействия.

Лети сплави:

- *ални* – сплав на желязото, никела и алуминия с остатъчна магнитна индукция до 0,55Т и коерцитивен интензитет до 43800А/м;

- *алнису* - сплав на желязо, никел, алуминий и силиций с остатъчна магнитна индукция до 0,4Т и коерцитивен интензитет до 63500А/м;

- *алнико* - сплав на желязото, никела, алуминия, кобалта и медта с остатъчна магнитна индукция до 1,25Т и коерцитивен интензитет до 43800А/м.

Общ недостатък на всички изброени сплави са трудностите при изработването на изделия с точни размери и невъзможността за механично обработване. В качеството на магнитно твърди материали се използват бариеви, стронциеви и кобалтови ферити. Те са известни под наименованието *оксидни магнити*.

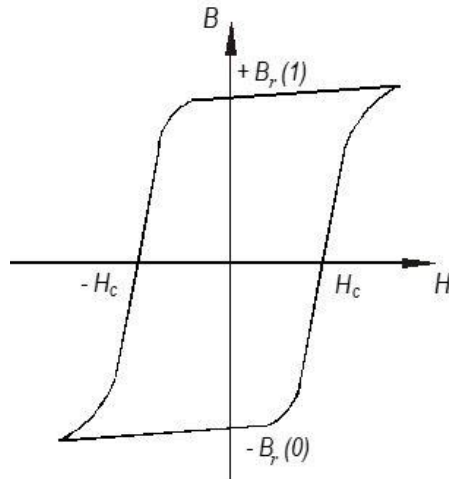
През последните години се появиха достъпни по цена редкоземни метали с достатъчна степен на чистота. Благодарение на големия коерцитивен интензитет и максимална специфична енергия на съединенията от вида RCO_5 - където R е редкоземен елемент (например итрий, церий, самарий и др.) намират приложение за производството на магнити.

6.5.4. Магнитни материали със специално предназначение

А. Материали с правоъгълен хистерезисен цикъл (ПХЦ)

Използват се при разработване на запомнящи и логически устройства в изчислителната техника, автоматиката, в многоканални системи за радиовръзка и др. Магнитопроводът има 2 устойчиви състояния (фиг. 6.10) – намагнитеност до магнитни индукции $+B_r$ и $-B_r$, които съответстват на 1 и 0 от двоичната бройна система.

Превключването от едното състояние в другото се извършва чрез токов импулс, който създава поле с интензитет, по-голям от H_c .



Фиг.6.10

Основен параметър на магнитните материали с ПХЦ е коефициентът на правоъгълност:

$$K_{II} = \frac{B_r}{B_{\max}},$$

Където B_{\max} се определя при интензитет $H_{\max} = 5H_c$. Препоръчително е този коефициент да бъде близък до 1. Обикновено той е в границите $0,85 \div 0,95$.

Най-разпространени материали с ПХЦ са манган-магнезиевите ферити. Използват се също манган-медни и литий-никелови ферити.

Разработени са магнитно меки сплави с ПХЦ: желязо-никелови и желязо-никел-кобалтови, легирани с молибден (Mo), мед (Cu) или други метали. Изработват се във вид на ленти с дебелина $2 \div 10 \mu m$.

Използват се тънки магнитни слоеве, нанесени върху подложки по метода на вакуумно изпарение.

Б. Магнитоотрицателни материали

Като магнитоотрицателни материали се използват матали, сплави и ферити.

Широко приложение има чистият Ni , никел-кобалтови сплави, желязо-алуминиевата сплав алфер. Особено голяма магнитоотрицателна притежава системата желязо-платина ($Fe-Pt$), но рядко се използва поради високата цена.

Магнитоотрицателните метали и сплави се обработват във вид на пластини, които се събират в пакети.

От феритите широко приложение намират: кобалтов ферит, железен ферит (магнетит) ($FeO.Fe_2O_3$), литиев ферит, никел-кобалтов ферит.

Най-важна област на приложение на магнитоотрицателната са магнитоотрицателните преобразуватели.

В. Термомагнитни материали

Характерна особеност на тези материали е силната зависимост на относителната магнитна проницаемост μ_r от температурата θ и съответно резкият ход на зависимостта $B(\theta)$ при $H = const$. От гледна точка на приложение в техниката най – голям интерес представлява температурният интервал от -60 до $+100^{\circ}C$. Използват се за компенсация на температурни грешки, предизвикани от изменения на индукцията на постоянни магнити и/или промяна на съпротивленията на намотки в електроизмервателни уреди. Употребяват се и при решаване на задачи за термосигнализация и термоконтрол.

Рязка температурна зависимост на μ_r и B се наблюдава около точката на Кюри θ_k , затова е желателно тя да е близо до работната температура на термокомпенсиращия елемент.

За тези магнетици θ_k е между 0 и $100^{\circ}C$. Най-често използвани материали от този вид са: сплав $Ni - Cu$ с $30\% Cu$ – компенсира грешки в температурния интервал $20 \div 80^{\circ}C$, сплав $Fe - Ni - Cr$ (компенсатор), използвана в температурния интервал $-70 \div +70^{\circ}C$.

В качеството на термомагнитни материали се използват и ферити с ниска точка на Кюри.

Г. Материали с голяма магнитна индукция на насищане B_s

От феромагнитните метали най-голяма е магнитната индукция на насищане за желязото – $B_s = 2,1 \div 2,2T$.

Когато се изискват намалени размери и тегло на магнитопроводите, се използват материали с повишени стойности на B_s . За тази цел най-подходяща е сплавта пермендюр ($B_s = 2,43 T$). Съдържа Fe , Co ($50 \div 70\%$) и ванадий (V) ($1,5 \div 2\%$).

Прилага се в електроизмервателни уреди, за изработване на телефонни мембрани, полюсни крайници и др.

ДОПЪЛНИТЕЛНА ЛИТЕРАТУРА

- [1] С. Барудов, В. Илиев, Б. Ников. Електроматериалознание в електротехниката и електрониката. ТУ-Варна, 2005.
- [2] М. Василева, М. Иванова, Р. Димитрова. Ръководство за лабораторни упражнения по електротехнически материали, ТУ – Варна, 2016, ISBN: 978-954-20-0753-1.
- [3] М. Василева, М. Иванова, Р. Димитрова. Примерни тестове по електротехнически материали, ТУ – Варна, 2016, ISBN: 978-954-20-0752-4.
- [4] С. Барудов, В. Илиев. Електроматериалознание в електротехниката и електрониката. Ръководство за лабораторни упражнения. ТУ – Варна, 2005.