

materiały pomocnicze



Jolanta PLEWAKO  
Stanisław WYDERKA

Katedra Energoelektroniki  
i Elektroenergetyki

# Inżynieria materiałowa

dla elektryków i elektroników

Rzeszów 2013

Wydano za zgodą Rektora

Materiały pomocnicze nierecenzowane  
do wykładu i ćwiczeń laboratoryjnych  
z przedmiotu „inżynieria materiałowa”  
na I roku studiów, kierunek *elektrotechnika*  
oraz *elektronika i telekomunikacja*

W procesie wydawniczym pominięto  
etap opracowania językowego.  
Wersja elektroniczna materiałów  
została przygotowana przez Autorów.

*Inżynieria materiałowa  
dla elektryków i elektroników  
Struktura i własności materiałów  
Materiały: przewodzące, magnetyczne,  
półprzewodnikowe i izolacyjne  
Badania laboratoryjne materiałów*

ISBN 978-83-7199-857-0

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej  
al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

e-mail: [oficyna1@prz.rzeszow.pl](mailto:oficyna1@prz.rzeszow.pl)

## SPIS TREŚCI

1. WPROWADZENIE .....	5
1.1. Materiały stosowane w elektrotechnice i elektronice .....	5
1.2. Wiązania międzyatomowe .....	6
1.3. Wiązania międzycząsteczkowe .....	7
2. STRUKTURY MATERIAŁÓW .....	9
2.1. Struktury krystaliczne metali i stopów metalicznych .....	9
2.1.1. Podstawowe wiadomości z krytalografii .....	9
2.1.2. Struktura krystaliczna A1 .....	12
2.1.3. Struktura krystaliczna A2 .....	13
2.1.4. Struktura krystaliczna A3 .....	15
2.1.5. Struktury krystaliczne A4 i A9 .....	18
2.1.6. Struktury stopów metalicznych .....	18
2.1.7. Defekty struktur krystalicznych .....	20
2.2. Struktury materiałów ceramicznych i szkła .....	22
2.3. Struktury materiałów organicznych .....	23
3. MATERIAŁY PRZEWODZĄCE .....	25
3.1. Przewodnictwo elektryczne metali i stopów .....	25
3.1.1. Klasyczna teoria przewodnictwa elektrycznego metali .....	25
3.1.2. Pasmowa teoria przewodnictwa elektrycznego .....	27
3.1.3. Zależność rezystywności metali od temperatury .....	28
3.2. Materiały przewodowe .....	29
3.2.1. Metale i stopy metaliczne .....	29
3.2.2. Materiały na przewody i połączenia przewodzące .....	32
3.2.3. Materiały na rezystory .....	34
3.2.4. Materiały na styki elektryczne .....	37
3.2.5. Materiały na termopary .....	39
4. MATERIAŁY MAGNETYCZNE .....	41
4.1. Zjawiska magnetyczne w ośrodkach materialnych .....	41
4.2. Podstawowe własności materiałów magnetycznych .....	43
4.2.1. Procesy magnesowania .....	43
4.2.2. Przenikalność magnetyczna .....	45
4.2.3. Stratność magnetyczna .....	46
4.2.4. Krzywa od magnesowania .....	47
4.3. Materiały magnetyczne stosowane w elektrotechnice .....	48
4.3.1. Wprowadzenie .....	48
4.3.2. Materiały magnetycznie miękkie metaliczne .....	49
4.3.3. Materiały magnetycznie miękkie niemetaliczne .....	52
4.3.4. Materiały magnetycznie twarde metaliczne .....	53
4.3.5. Materiały magnetycznie twarde niemetaliczne .....	54

5. MATERIAŁY PÓŁPRZEWODNIKOWE .....	55
5.1. Budowa i własności półprzewodników .....	55
5.1.1. Wprowadzenie .....	55
5.1.2. Budowa półprzewodników .....	55
5.1.3. Przewodnictwo półprzewodników .....	57
5.2. Krzem jako materiał półprzewodnikowy .....	59
5.2.1. Własności krzemu .....	59
5.2.2. Otrzymywanie .....	60
5.2.3. Oczyszczanie .....	60
5.2.4. Otrzymywanie monokryształów .....	62
5.2.5. Domieszkowanie .....	64
5.3. Wytwarzanie elementów półprzewodnikowych .....	65
5.3.1. Elementy indywidualne i układy scalone .....	65
5.3.2. Półprzewodniki polikrystaliczne .....	66
6. MATERIAŁY IZOLACYJNE .....	67
6.1. Własności materiałów izolacyjnych .....	67
6.1.1. Rezystywność dielektryków .....	67
6.1.2. Przenikalność elektryczna dielektryków .....	68
6.1.3. Stratność elektryczna dielektryków .....	74
6.2. Podział materiałów izolacyjnych .....	74
6.2.1. Dielektryki gazowe .....	74
6.2.2. Dielektryki ciekłe .....	75
6.2.3. Dielektryki stałe nieorganiczne .....	75
6.2.4. Dielektryki stałe organiczne .....	77
7. BADANIE REZYSTYWNOŚCI MATERIAŁÓW PRZEWODZĄCYCH .....	79
7.1. Wprowadzenie .....	79
7.2. Wykonanie pomiarów .....	81
7.3. Opracowanie wyników badań .....	83
8. BADANIE ŁUKOODPORNOŚCI MATERIAŁÓW IZOLACYJNYCH .....	84
8.1. Wprowadzenie .....	84
8.2. Identyfikacja próbek przygotowanych do badań .....	84
8.3. Przeprowadzenie badań .....	85
9. BADANIE STRATNOŚCI I PRZENIKALNOŚCI ELEKTRYCZNEJ DIELEKTRYKÓW .....	86
9.1. Wprowadzenie .....	86
9.2. Przygotowanie do badań .....	88
9.3. Wykonanie pomiarów i obliczeń .....	88
10. BADANIE WŁASNOŚCI MATERIAŁÓW MAGNETYCZNIE MIĘKKICH .....	91
10.1. Wprowadzenie .....	91
10.2. Przygotowanie do badań .....	93
10.3. Przeprowadzenie badań .....	94
10.4. Obliczenia .....	95
Dodatek .....	96
LITERATURA .....	99

# 1. WPROWADZENIE

## 1.1. Materiały stosowane w elektrotechnice i elektronice

Wśród materiałów stosowanych w elektrotechnice i elektronice dominujące znaczenie mają materiały stałe. Stosuje się także materiały ciekłe i gazowe. Stanowią one razem ogromny zbiór różnych materiałów. Od początku rozwoju nauki o materiałach tworzy się ich wielopoziomowe podziały wykorzystując różne kryteria. Ułatwia to poszukiwanie właściwych materiałów do konkretnych zastosowań.

Różnorodność materiałów stałych, a w tym tych stosowanych w elektrotechnice i elektronice, wynika z różnorodności ich własności. Można wymienić cztery podstawowe czynniki decydujące o własnościach materiałów:

- skład chemiczny (określone pierwiastki i związki chemiczne wchodzące w skład materiału),
- rodzaje i siły wiązań między poszczególnymi cząstkami (atomami, jonami, cząsteczkami),
- układ przestrzenny cząstek (określone struktury krystaliczne lub ich brak),
- stan termodynamiczny (zamierzone lub niezamierzone trwałe odstępstwa od stanu równowagi termodynamicznej).

Wiedza na temat wpływu tych czynników na własności materiałów pozwala wytwarzać materiały o własnościach bardziej lub mniej zbliżonych do oczekiwanych. Szczególne znaczenie ma tu znajomość zależności własności materiałów od ich składu chemicznego oraz od uzyskiwanych (przez obróbkę cieplną, plastyczną, napromieniowanie itp.) zamierzonych odstępstw od stanu równowagi termodynamicznej. Obydwa wymienione czynniki mają z kolei istotny wpływ na trzeci czynnik – strukturę materiałów.

Istotny postęp wiedzy w zakresie czterech podstawowych czynników warunkujących własności materiałów oraz szybko postępujące doskonalenie technologii ich przetwórstwa umożliwiają w coraz to większej liczbie przypadków uzyskiwanie nowych materiałów o własnościach wymaganych w konkretnych zastosowaniach w obszarze elektrotechniki i elektroniki.

Obok względów technicznych, jednym z najważniejszych czynników decydujących o wyborze materiału do określonego zastosowania jest jego cena, która z kolei zależy od dostępności materiału i zapotrzebowania na niego. Często wykorzystuje się materiały zastępcze o własnościach mniej korzystnych z punktu widzenia konkretnego zastosowania.

## 1.2. Wiązania międzyatomowe

Istotną własnością materiałów stałych i ciekłych jest ich spójność, rozumiana jako określona wytrzymałość na działanie sił zewnętrznych. Nie można rozdzielić próbki materiału stałego na mniejsze części bez wykonania pracy, potrzebnej do pokonania sił wiążących poszczególne elementy struktury.

Wspólną własnością wszystkich układów materialnych w przyrodzie jest dążenie do osiągnięcia stanu o najmniejszej możliwej energii. Jest to podstawowa przyczyna łączenia się atomów w cząsteczki. Energia cząsteczki jest mniejsza niż suma energii atomów swobodnych, z których się składa. Atomy pierwiastków łączących się w związki dążą do zmniejszenia swojej energii poprzez uzyskanie trwałej konfiguracji walencyjnej, tzn. uzyskanie kompletu elektronów w ostatniej powłoce, charakterystycznego dla gazów szlachetnych. Energia wiązań międzyatomowych jest rzędu setek kilodżuli na mol.

### *Wiązania jonowe*

Wiązaniem jonowymi (heteropolarnymi) łączą się atomy elektrododatnie (atomy pierwiastków metalicznych z grup IA i IIA układu okresowego) z atomami elektroujemnymi (atomami pierwiastków niemetalicznych z grup VIIA i VIA). W takim związku atom elektrododatni uzyskuje oktet elektronowy przez oddanie elektronów walencyjnych, natomiast atom elektroujemny przez przyłączenie tylu elektronów, aby razem z własnymi elektronami walencyjnymi miał ich osiem. Powstałe w ten sposób jony, dodatni i ujemny, wiążą się ze sobą w cząsteczkę (dipol) siłami przyciągania elektrostatycznego.

### *Wiązania kowalencyjne*

Wiązania kowalencyjne (homopolarne) występują w cząsteczkach składających się z dwóch atomów tego samego pierwiastka (cząsteczki homojądrowe). Uzupełnienie liczby elektronów w powłoce walencyjnej następuje przez tworzenie par elektronów przebywających z równym prawdopodobieństwem w powłoce każdego z sąsiadujących ze sobą atomów. Wiązania czysto kowalencyjne mogą występować tylko między atomami (tego samego pierwiastka), które mają co najmniej cztery elektrony walencyjne. Uwspólnienie elektronów powoduje wystąpienie między atomami znacznych sił wymiany, skierowanych wzdłuż osi łączących środki ciężkości atomów.

### *Wiązania kowalencyjne spolaryzowane*

Wiązania jonowe i kowalencyjne są skrajnymi przypadkami wiązań międzyatomowych. W pierwszym z nich można przyjąć, że wspólne pary

elektronów znajdują się tylko w powłoce jednego z atomów (elektroujemnego), natomiast w przypadku drugiego wiązania, pary elektronów przebywają z równym prawdopodobieństwem w powłoce każdego z sąsiadujących ze sobą atomów.

W wiązaniach między atomami różnych pierwiastków wspólne pary elektronów przebywają z różnym prawdopodobieństwem w powłokach sąsiadujących atomów. Prawdopodobieństwo to zależy od elektroujemności pierwiastków, rozumianej jako zdolności atomów w cząsteczce do wiązania własnych i obcych elektronów walencyjnych. Najczęściej atomom różnych pierwiastków przypisuje się elektroujemność wg skali Paulinga, według której najmniejszą elektroujemność ma cez (0,79), a największą fluor (3,98).

W czystym wiązaniu kowalencyjnym elektroujemność sąsiadujących atomów jest taka sama (atomy tego samego pierwiastka). Gdy elektroujemności atomów różnią się, wspólna para elektronów przebywa dłużej w powłoce atomu o większej elektroujemności, który staje się wtedy jonem słabo ujemnym, a pozostały jonem słabo dodatnim. Występuje wtedy wiązanie kowalencyjne spolaryzowane.

### ***Wiązania metaliczne***

Wiązania metaliczne występują w czystych metalach oraz w połączeniach międzymetalicznych (stopach). W powłokach walencyjnych atomów metali jest mniej niż cztery elektrony. Nie mogą więc tworzyć wystarczającej liczby wspólnych par elektronowych z sąsiednimi atomami.

Regularnie rozmieszczone w przestrzeni jony metalu (rdzenie atomów pozbawionych elektronów walencyjnych) tworzą jego strukturę. Elektrony walencyjne wypełniają przestrzeń między jonami, pozostając w bezładnym ruchu cieplnym („gaz elektronowy”). Wzajemne oddziaływanie między rdzeniami atomowymi a gazem quasi-swobodnych elektronów ma charakter nieukierunkowanych sił wiążących całość w układ (ciało stałe).

### **1.3. Wiązania międzycząsteczkowe**

Wiązania międzycząsteczkowe są znacznie (wielokrotnie) słabsze od wiązań międzyatomowych. Nazywane są także wiązaniami siłami van der Waalsa. Występują między cząsteczkami, w których atomy są już związane wiązaniami międzyatomowymi, tzn. wszystkie atomy (dzięki wymianie lub uwspólnieniu) mają stabilną konfigurację elektronów walencyjnych. Inaczej mówiąc, nie ma wolnych wartościowości do wykorzystania w wiązaniach międzycząsteczkowych.

### ***Wiązania wodorowe***

W wiązańach wodorowych istotną rolę odgrywają atomy wodoru. Dzięki niewielkim wymiarom i prawie nieosłoniętemu dodatniemu ładunkowi jądra, atom wodoru łatwo wnika do powłok walencyjnych sąsiadujących ze sobą atomów pierwiastków elektroujemnych takich jak: tlen, węgiel, azot, chlor. Oscylując między tymi atomami, atom wodoru zakłóca równowagę rozkładu ich ładunków dodatnich i ujemnych. Powoduje to powstawanie elektrostatycznych sił przyciągania między tymi sąsiednimi atomami. Energia wiązań wodorowych dochodzi do 20...40 kJ·mol<sup>-1</sup>.

Klasycznym przykładem wiązania wodorowego jest wiązanie między cząsteczkami wody w kryształach lodu. Występuje ono także między makrocząsteczkami materiałów organicznych, np. w materiałach izolacyjnych termoplastycznych (polietylen, polipropylen, polichlorek winylu, itp.).

### ***Wiązania typu dipol-dipol***

Wiązania dipol-dipol dominują w grupie wiązań międzycząsteczkowych. Występują w materiałach zawierających cząsteczki charakteryzujące się wyraźną polaryzacją (będące dipolami elektrycznymi). Występują także między cząsteczkami elektrycznie obojętymi, ale które zostały spolaryzowane przez indukcję. Cząsteczkę obojętną może spolaryzować zbliżający się do niej dipol, co spowoduje wystąpienie między tymi obiektami słabego wiązania międzycząsteczkowego. Energie tego typu wiązań są rzędu pojedynczych kilodżuli na mol.

Typowym przykładem wiązań dipol-dipol są wiązania między sąsiednimi makrocząsteczkami polimerów organicznych. Występują we wszystkich materiałach zawierających wystarczająco blisko siebie położone dipole elektryczne.



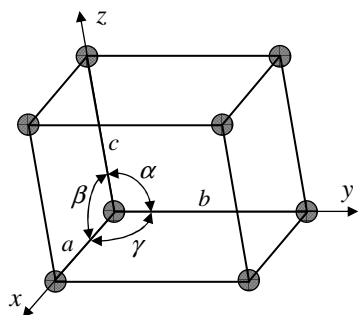
## 2. STRUKTURY MATERIAŁÓW

### 2.1. Struktury krystaliczne metali i stopów metalicznych

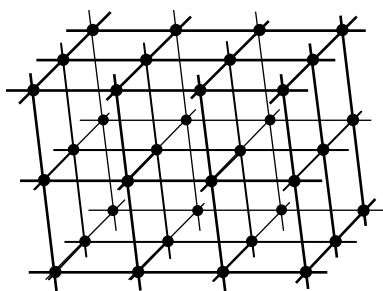
#### 2.1.1. Podstawowe wiadomości z krystalografii

Ciała krystaliczne to takie ciała stałe, których cząstki (atomy, jony lub cząsteczki) ułożone są względem siebie w sposób regularny, tzn. periodycznie powtarzalny w przestrzeni. Strukturę ciała krystalicznego można opisać zbiorem elementów symetrii umożliwiającym zaliczenie jej do jednego z siedmiu układów krystalograficznych wymienionych w tabeli 2.1. Układ krystalograficzny opisywany jest parametrami tzw. komórki elementarnej przestrzennej sieci krystalograficznej. Parametrami tymi są długości krawędzi komórki elementarnej ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ) oraz kąty między nimi ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ), rys. 2.1. Komórka elementarna jest najmniejszym powtarzalnym przestrzennie elementem sieci krystalograficznej. Naroża każdej komórki elementarnej pokrywają się z węzłami tej sieci. Sieć krystalograficzna jest tworem abstrakcyjnym (rys. 2.2) służącym do opisu ciała krystalicznego, którego obraz uzyskuje się przez przyporządkowanie węzłom sieci cząstek tego ciała.

W roku 1845 krystalograf francuski A. Bravais wykazał, że do odwzorowania struktury wszystkich ciał krystalicznych potrzeba czternaście różnych sieci przestrzennych. Sieci te uzyskuje się w oparciu o podstawowe (prymitywne) komórki siedmiu układów krystalograficznych oraz w oparciu o ich modyfikacje uzyskane przez centrowanie, tzn. o komórki, do których wprowadzono dodatkowe węzły: w środku komórki (centrowanie przestrzenne), w środkach wszystkich ścian (centrowanie ścienne) lub w środkach jednej pary ścian równoległych (centrowanie na podstawach).



Rys. 2.1. Parametry określające wielkość i kształt elementarnej komórki struktury krystalicznej



Rys. 2.2. Fragment idealnej sieci krystalograficznej

Na przedstawionych, na rys. 2.1 i w tabeli 2.1, szkicach komórek elementarnych zaznaczono niewielkimi kółkami rozmieszczenie cząstek materialnych. W stosowanych w krystalografii modelach ciał krystalicznych zastępuje się atomy lub jony kulkami o średnicach proporcjonalnych do tych, jakie mają te cząstki. Jest to oczywiście daleko idące uproszczenie. Ponadto, przyjmuje się, że najbliższe sobie położone kulki stykają się ze sobą.

Obok parametrów przedstawionych na rys. 2.1 i określenia rodzaju sieci Bravais'go, przy opisie komórki elementarnej podaje się jeszcze:

– liczbę cząstek przypadających na każdą komórkę, wyznaczoną z zależności:

$$N = \frac{1}{8}N_N + \frac{1}{4}N_K + \frac{1}{2}N_S + N_W \quad (2.1)$$

gdzie poszczególne składniki oznaczają liczby cząstek:  $N_N$  - w narożach,  $N_K$  - na krawędziach,  $N_S$  - na ścianach oraz  $N_W$  - wewnątrz komórki;

- płaszczyzny i kierunki sieci krystalicznej o najgęstszym ułożeniu cząstek;
- współczynnik wypełnienia komórki, równy stosunkowi sumy objętości wszystkich kulek (modeli cząstek) do objętości całego ciała krystalicznego;
- liczbę koordynacyjną, określającą liczbę cząstek znajdujących się w najbliższej (tej samej) odległości od dowolnej cząstki w sieci krystalicznej;
- rodzaj i rozmiar luk między cząstkami (kulkami) w sieci krystalicznej.

Niezależnie od możliwości przypisania każdemu ciału krystalicznemu jednego z siedmiu układów krystalicznych i jednej z czternastu sieci Bravais'go, ciała te można sklasyfikować w zależności od składu chemicznego, przez podzielenie ich na grupy oznaczone literami. Pierwiastki mają oznaczenie A, proste związki chemiczne B, C lub D zależnie od proporcji stechiometrycznych, związki złożone i zawierające kompleksy oznacza się literami od E do K, stopy literą L, krzemiany S, związki organiczne O.

W ramach grupy wyróżnia się typy struktur oznaczane kolejnymi cyframi. Na przykład, oznaczenie A1 odnosi się do grupy pierwiastków krystalizujących zgodnie z siecią regularną ściennie centrowaną, oznaczenie A9 przyporządkowane jest strukturze grafitu, a B1 strukturze chlorku sodu.

Tabela 2.1. Układy krystalograficzne i sieci Bravais'go

Układ krystalograficzny	Rodzaj sieci Bravais'go	Komórka elementarna
Trójskośny $a \neq b \neq c$ $\alpha \neq \beta \neq \gamma$	$P$ – prymitywna	$P$ 
Jednoskośny $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ \neq \gamma$	$P$ – prymitywna, $C$ – centrowana na podstawach	$P$ $C$
Rombowy $a \neq b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$P$ – prymitywna, $I$ – przestrzennie centrowana, $F$ – ściennie centrowana, $C$ – centrowana na podstawach	$P$ $I$ $F$ $C$
Tetragonalny $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$P$ – prymitywna, $I$ – przestrzennie centrowana	$P$ $I$
Heksagonalny $a = b \neq c$ $\alpha = \beta = 90^\circ$ , $\gamma = 120^\circ$	$P$ – prymitywna	$P$
Romboedryczny $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma \neq 90^\circ$	$P$ – prymitywna	$P$
Regularny $a = b = c$ $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$	$P$ – prymitywna, $I$ – przestrzennie centrowana, $F$ – ściennie centrowana	$P$ $I$ $F$

Struktury krystaliczne zdecydowanej większości pierwiastków metalicznych są zgodne z trzema typami sieci krystalograficznych: A1 – sieć

regularna ściennie centrowana, A2 – sieć regularna przestrzennie centrowana i A3 – sieć heksagonalna zwarta.

### 2.1.2. Struktura krystaliczna A1

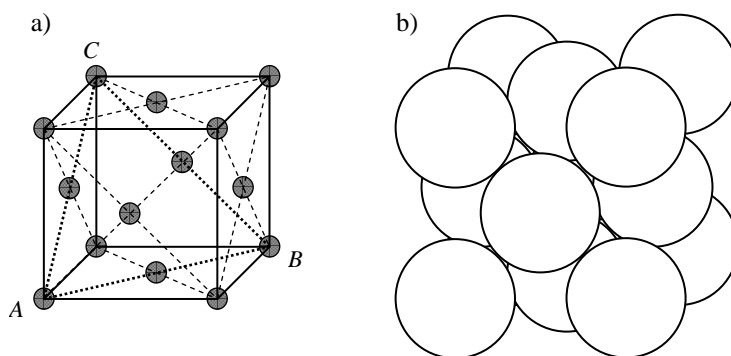
Strukturę sieci regularnej ściennie centrowanej (rys. 2.3) mają metale: Ag, Al, Au, Co, Cu, Fe $\gamma$ , Ir, Ni, Pb, Pd, Pt, Rh, oraz gazy szlachetne w stanie stałym. Liczba atomów przypadających na jedną komórkę wynosi 4.

Płaszczyzna najgęstszego ułożenia atomów przecina komórkę elementarną A1 ukośnie (trójkąt ABC na rys. 2.3a). Rozmieszczenie atomów w warstwie wyznaczonej przez tę płaszczyznę przedstawiono na rys. 2.4. Rozmieszczenie atomów w sąsiednich równoległych płaszczyznach najgęstszego ułożenia w strukturze A1 zaznaczono krzyżykami i małymi kółkami. Atomy kolejnych warstw najgęstszego ułożenia znajdują się nad co drugą luką warstwy poprzedniej i pod co drugą luką warstwy następnej.

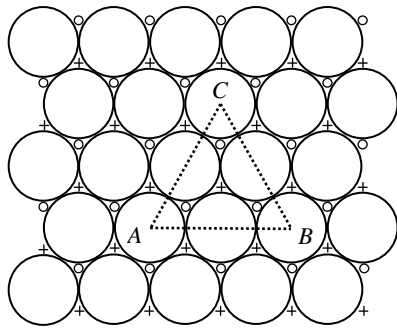
Krzyżyki wyznaczają środki atomów w warstwie znajdującej się pod warstwą wyróżnioną, małe kółka wyznaczają środki atomów w warstwie usytuowanej nad warstwą wyróżnioną. Krzyżyki i kółka nie pokrywają się (rys. 2.4). Oznaczając te trzy warstwy kolejno literami *R, S i T* można zapisać kolejność ułożenia większej liczby takich warstw, np. *RSTRSTRST*.

Współczynnik wypełnienia atomami struktury A1 jest największy z możliwych, wynosi 74 %. Liczba koordynacyjna dla A1 wynosi 12, to znaczy, że z dowolnym atomem (rys. 2.4) styka się bezpośrednio 12 atomów: 6 w warstwie narysowanej, 3 w warstwie usytuowanej pod warstwą narysowaną (krzyżyki) i 3 w warstwie usytuowanej nad warstwą narysowaną (małe kółka).

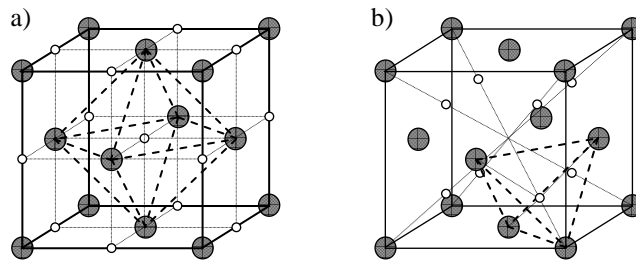
W sieci regularnej ściennie centrowanej występują dwa rodzaje luk, rys. 2.5. Luki ośmiościenne (oktaedryczne) znajdują się w środku komórki



Rys. 2.3. Komórka elementarna sieci regularnej ściennie centrowanej: a) kształt i zawartość komórki, b) model komórki z kulistymi atomami; ABC - trójkąt wyznaczający płaszczyznę najgęstszego ułożenia atomów



Rys. 2.4. Rozmieszczenie atomów kulistych w płaszczyźnie najgęstszego ułożenia struktury A1



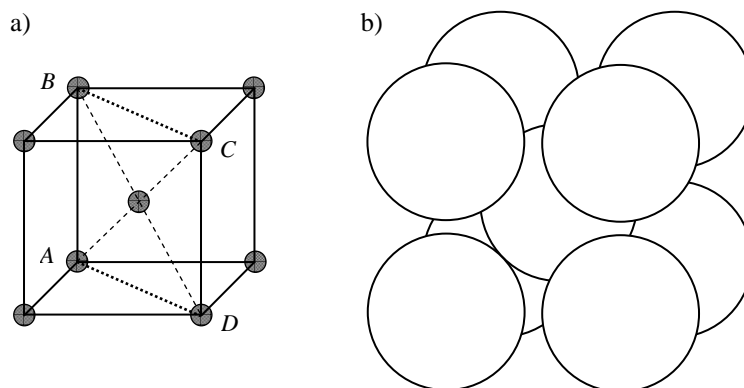
Rys. 2.5. Luki w sieci regularnej ściennie centrowanej:  
 ● - atomy, ○ - luki; a) rozmieszczenie luk ośmiościennych, b) rozmieszczenie luk czterościennych

i w połowie każdej krawędzi (rys. 2.5a). Sześć najbliższych atomów wyznacza wierzchołki ośmiościanu foremnego. Promień tych luk wynosi 0,414 promienia atomów w węzłach sieci A1. Luki czterościenne (tetraedryczne) znajdują się na przekątnych sześcianu komórki w odległości 0,25 długości przekątnej od każdego wierzchołka (rys. 2.5b). Cztery najbliższe atomy (atom w wierzchołku i atomy na środkach trzech stykających się ścian w tym wierzchołku) wyznaczają wierzchołki czworościanu foremnego. Promień tych luk wynosi 0,225 promienia atomów w węzłach sieci.

### 2.1.3. Struktura krystaliczna A2

Strukturę sieci regularnej przestrzennie centrowanej A2 (rys. 2.6) mają metale: Cr, Cs, Fe<sub>α</sub>, K, Li, Mo, Na, Nb, Rb, Ta, Ti, V i W. Liczba atomów przypadających na jedną komórkę, wyliczona zgodnie z (2.1), wynosi 2.

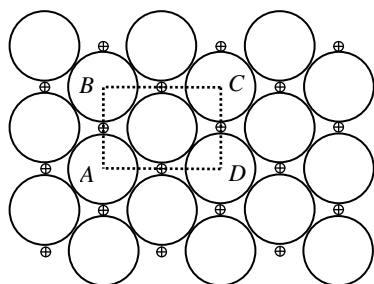
Płaszczyzna najgęstszego ułożenia atomów przecina komórkę elementarną A2 przechodząc przez przekątne dwóch ścian równoległych i przez dwie prostopadłe do nich krawędzie (prostokąt ABCD na rys. 2.6). Rozmieszczenie atomów w tej płaszczyźnie przedstawiono na rys. 2.7. Rozmieszczenie atomów w sąsiednich równoległych płaszczyznach



Rys. 2.6. Komórka elementarna sieci regularnej przestrzennie centrowanej:  
 a) kształt i zawartość komórki, b) model komórki z kulistymi atomami;  
 ABCD – prostokąt wyznaczający płaszczyznę najbliższego ułożenia atomów

najbliższego ułożenia w strukturze A2 zaznaczono krzyżykami i małymi kółkami. Atomy kolejnych warstw najbliższego ułożenia znajdują się nad każdą luką warstwy poprzedniej i jednocześnie pod każdą luką warstwy następnej.

Krzyżyki wyznaczają środki atomów w warstwie znajdującej się bezpośrednio pod warstwą narysowaną, małe kółka wyznaczają środki atomów w warstwie usytuowanej nad warstwą narysowaną. Odmienne niż w strukturze A1, krzyżyki i kółka pokrywają się (rys. 2.7), to znaczy, że co druga warstwa ma takie samo położenie. Oznaczając dwie sąsiednie warstwy literami *R* i *S* można zapisać kolejność ułożenia większej liczby takich warstw, np. *RSRSRS*.



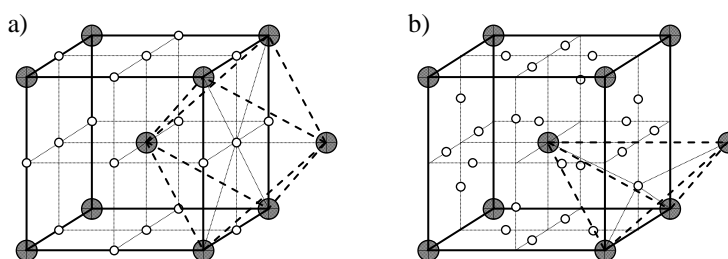
Rys. 2.7. Rozmieszczenie atomów kulistych w płaszczyźnie najbliższego ułożenia struktury A2

Współczynnik wypełnienia atomami struktury A2 jest mniejszy niż struktury A1 i wynosi 68 %. Różnica ta wiąże się z konfiguracją atomów w płaszczyznach najbliższego ułożenia, rys. 2.4 i rys. 2.7.

Liczba koordynacyjna dla struktury A2 wynosi 8, to znaczy, że z dowolnym atomem w tej sieci (rys. 2.7) styka się 8 otaczających go atomów: 4 w warstwie narysowanej, 2 w warstwie usytuowanej pod i 2 w warstwie usytuowanej nad warstwą wyróżnioną. W przypadku dwóch ostatnich warstw są

to atomy, których położenie jest wyznaczone przez krzyżyki i małe kółka na rys. 2.7, leżące w płaszczyźnie pionowej przechodzącej przez środek danego atomu, prostopadłej do płaszczyzny rysunku.

W sieci regularnej przestrzennie centrowanej występują dwa rodzaje luk, rys. 2.8. Luki ośmiościenne (oktaedryczne) znajdują się w środku każdej ściany i w połowie każdej krawędzi (rys. 2.8a). Sześć najbliższych atomów wyznacza wierzchołki ośmiościanu foremnego. Promień tych luk wynosi 0,154 promienia atomów w węzłach sieci A2. Luki czterościenne (tetraedryczne) są rozmieszczone po cztery na każdej ścianie, ich środki leżą na dwóch prostych prostopadłych dzielących ścianę na cztery równe kwadraty. Odległość tych luk od krawędzi komórki wynosi 0,25 długości krawędzi (rys. 2.8b). Cztery najbliższe atomy (2 atomy wierzchołkowe i 2 atomy centrujące) wyznaczają wierzchołki czworościanu foremnego. Promień tych luk wynosi 0,291 promienia atomów w węzłach sieci.



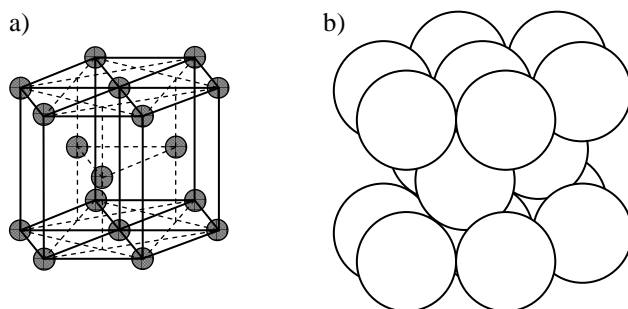
Rys. 2.8. Luki w sieci regularnej przestrzennie centrowanej:  
 ● - atomy, ○ - luki; a) rozmieszczenie luk ośmiościennych,  
 b) rozmieszczenie luk czterościennych

#### 2.1.4. Struktura krystaliczna A3

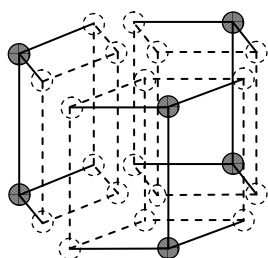
Strukturę sieci heksagonalnej zwartej mają metale: Be<sub>α</sub>, Cd, Co, Mg, Re, Sc, Ti<sub>α</sub>, Y, Zn, Zr<sub>α</sub>. Komórka elementarna tej sieci (rys. 2.9), obrazująca jej charakterystyczną symetrię, składa się z trzech komórek prymitywnych (rys. 2.10) i trzech dodatkowych węzłów wewnętrznych, każdy w innej komórce prymitywnej. Ścisłe rzecz ujmując, sieć heksagonalną można nazwać zwartą, kiedy jej wysokość jest  $\sqrt{8/3}$  razy większa od długości boku jej podstawy ( $c/a = \sqrt{8/3} \cong 1,633$ ). Najbliższy spełnienia tego warunku jest kobalt ( $c/a = 1,628$ ). Kadm i cynk mają nieco większą wartość tego stosunku a pozostałe wymienione pierwiastki nieco mniejszą.

Komórka prymitywna sieci heksagonalnej (rys. 2.10) jest graniastoslupem prostym o podstawie w kształcie rombu, którego dwa kąty wewnętrzne wynoszą po 120° a dwa pozostałe po 60°.

Liczba atomów przypadających na jedną komórkę prymitywną, uzupełnioną dodatkowym węzłem (atomem) wewnętrznym wynosi 2.

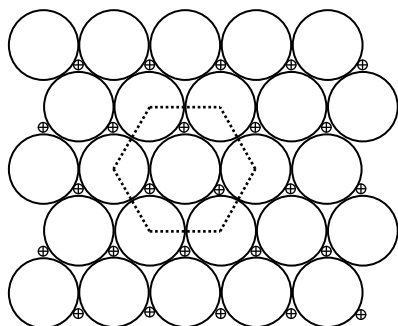


Rys. 2.9. Komórka elementarna sieci heksagonalnej zwartej: a) kształt i zawartość komórki, b) model komórki z kulistymi atomami



Rys. 2.10. Trzy komórki prymitywne sieci heksagonalnej składające się na komórkę elementarną (bez dodatkowych węzłów wewnętrznych)

Przez komórkę sieci heksagonalnej zwartej (rys. 2.9) przechodzą trzy równoodległe płaszczyzny najgęstsze ułożenia atomów: przez podstawę dolną, przez trzy węzły wewnętrzne i przez podstawę górną. Rozmieszczenie atomów w warstwie wyznaczonej przez płaszczyznę najgęstsze ułożenia (rys. 2.11) jest identyczne jak w strukturze A1. Natomiast wzajemne przesunięcie kolejnych sąsiednich płaszczyzn w strukturze A3 jest inne niż w strukturze A1.



Rys. 2.11. Rozmieszczenie atomów kulistych w płaszczyźnie najgęstsze ułożenia struktury A3

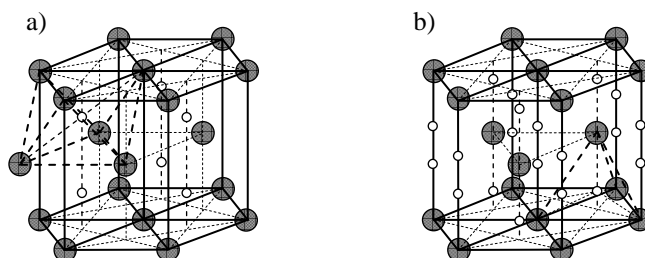


Rozmieszczenie atomów w sąsiednich równoległych płaszczyznach najgęstszego ułożenia w strukturze A3 zaznaczono krzyżykami i małymi kółkami. Krzyżyki wyznaczają środki atomów w warstwie znajdującej się bezpośrednio pod warstwą narysowaną, małe kółka wyznaczają środki atomów w warstwie usytuowanej nad warstwą narysowaną. Atomy kolejnych warstw najgęstszego ułożenia znajdują się nad co drugą luką warstwy poprzedniej i pod co drugą luką warstwy następnej. Z tym, że atomy co drugiej warstwy leżą dokładnie nad sobą. Oznaczając dwie sąsiednie warstwy literami *R* i *S* można zapisać kolejność ułożenia większej ich liczby, np. *RSRSRS*.

Współczynnik wypełnienia atomami struktury heksagonalnej zwartej A3, podobnie jak A1, wynosi 74 %. Liczba koordynacyjna dla A3 (tak jak dla A1) wynosi 12. Z dowolnym atomem w tej sieci (rys. 2.11) styka się bezpośrednio 12 otaczających go atomów: 6 w warstwie najgęstszego ułożenia, 3 należące do warstwy usytuowanej pod warstwą narysowaną (krzyżyki) i 3 należące do warstwy usytuowanej nad warstwą narysowaną (małe kółka).

Opisana sytuacja ma miejsce, kiedy komórka heksagonalna spełnia warunek:  $c/a = \sqrt{8/3}$ . To znaczy, że ciała krystaliczne, którym przypisuje się strukturę heksagonalną zwartą, mają sieć krystaliczną tylko bardzo zbliżoną do tej struktury. Zarówno przy większych jak i mniejszych od 1,633 wartościach  $c/a$  liczba koordynacyjna wynosi 6. Przy większych  $c/a$  sąsiednie warstwy atomów w płaszczyznach najgęstszego ułożenia nie stykają się ze sobą, a przy większych  $c/a$  atomy jednej warstwy są wciśnięte głębiej w luki warstwy sąsiedniej rozsuwając jej atomy na większe odległości.

W sieci heksagonalnej zwartej występują dwa rodzaje luk, rys. 2.12. Wewnątrz komórki elementarnej znajduje się 6 luk ośmiościennych (oktaedrycznych). Dla  $c/a = \sqrt{8/3}$  promień tych luk wynosi 0,414 promienia atomów w węzłach sieci. Luki czterościenne (tetraedryczne) znajdują się po 2 na krawędziach bocznych i na osi pionowej komórki oraz po jednej pod i nad każdym węzłem wewnętrznym komórki. Dla  $c/a = \sqrt{8/3}$  promień tych luk wynosi 0,225 promienia atomu.



Rys. 2.12. Luki w sieci heksagonalnej zwartej; ● - atomy, ○ - luki; rozmieszczenie luk: a) ośmiościennych, b) czterościenne

### 2.1.5. Struktury krystaliczne A4 i A9

Kolejną strukturą krystaliczną przyjętą dla czystych pierwiastków jest struktura A4. Jest to sieć regularna ściennie centrowana, jak w strukturze A1. Z tym jednak, że jej komórka elementarna ma 4 dodatkowe węzły wewnętrzne. Przechodząc od struktury A1 do A4 należy w co drugiej luce czterościennej (rys. 2.5b) umieścić atom pierwiastka macierzystego rozpychając sąsiednie atomy na odpowiednią odległość. Strukturę A4 ma diament (najtwardszy minerał) oraz należące też do czwartej grupy układu okresowego: Si, Ge i  $\text{Sn}_\alpha$ .

Na każdą komórkę struktury diamentu przypada aż 8 atomów węgla. Natomiast, współczynnik wypełnienia jej atomami wynosi zaledwie 34 %, a liczba koordynacyjna tylko 4. To znaczy, że z dowolnym atomem w tej sieci styka się bezpośrednio 4 otaczające go atomy.

Węgiel występuje także w innej odmianie krystalicznej, to znaczy w postaci grafitu. Jest to struktura heksagonalna oznaczona symbolem A9, znacznie odbiegająca od struktury heksagonalnej zwartej. Sąsiednie warstwy atomów są znacznie od siebie oddalone,  $c/a = 2,717$ .

Liczba koordynacyjna w tej strukturze wynosi 3. Każdy atom węgla jest związany wiązaniami kowalencyjnymi z 3 atomami w tej samej warstwie. Pozostaje po jednym swobodnym elektronie na atom. Przewodność elektryczna grafitu ma więc charakter elektronowy, tak jak metali. Sąsiednie warstwy w tej strukturze są powiązane między sobą wiązaniami van der Waalsa.

### 2.1.6. Struktury stopów metalicznych

Stopy metaliczne to połączenia dwóch lub więcej składników, będące spójnymi makroskopowo jednorodnymi ciałami krystalicznymi o własnościach metalicznych. Do stopów metalicznych zalicza się materiały uzyskane przez:

- stopienie składników i zmieszanie ich w stanie ciekłym,
- zmieszanie sproszkowanych składników oraz ich sprasowanie i spiekanie,
- jednoczesną redukcję jonów różnych pierwiastków na katodzie.

Stopy w stanie stałym mogą być niejednorodne, tzn. mogą składać się z dwóch lub więcej faz. Fazy krystaliczne wypełniające wzajemnie uzupełniające się części przestrzeni wewnętrznej stopu różnią się własnościami wynikającymi z odmiennego składu lub struktury. Podstawowe fazy stopu metalicznego powinny charakteryzować się wiązaniem metalicznym lub częściowo metalicznym. W stopach metalicznych mogą występować jako składniki następujące pierwiastki: C, Si, Ge, N, P, Se, Te, O i S.

Struktura stopu może powstać przez zastąpienie atomów tworzących sieć przestrzenną atomami innych pierwiastków lub przez wprowadzenie atomów innych pierwiastków do luk sieci podstawowej. Jeżeli na skutek tych procesów nie ulegnie zmianie struktura określona przez składnik podstawowy,

to powstanie tzw. roztwór stały podstawowy. O rodzaju roztworu i zakresie rozpuszczalności składników decydują ich własności:

- wielkość atomu,
- struktura krystaliczna,
- powinowactwo elektronowe,
- wartościowość.

Rozróżnia się dwa rodzaje roztworów stałych podstawowych:

- różnowęzłowe,
- międzywęzłowe.

### ***Roztwory stałe podstawowe***

*Roztwór stały różnowęzłowy* powstaje przez wzajemne podstawianie (zamianę) atomów różnych pierwiastków w węzłach sieci krystalicznej. Czynniki (warunki) ułatwiającymi powstanie takiego roztworu są: zbliżone promienie atomowe pierwiastków, jednakowa ich struktura krystaliczna oraz zbliżone wartości powinowactwa elektronowego.

Kiedy spełnione są te warunki, przy czym różnica promieni atomowych nie przekracza 15 %, występuje tzw. nieograniczona wzajemna rozpuszczalność pierwiastków, tzn. roztwór różnowęzłowy stały ma charakter ciągły. Przykładem takich roztworów są stopy dwuskładnikowe: Au-Cu, Au-Ag, Cu-Ni, Sb-Bi, Mo-W. Rola wszystkich składników takiego roztworu jest taka sama, dowolny z nich może być traktowany jako rozpuszczalnik. Przy większej różnicy promieni atomowych roztwór różnowęzłowy jest ograniczony. Podobnie wpływa niespełnienie warunku tej samej struktury krystalicznej.

*Roztwór stały międzywęzłowy* może być utworzony przez pierwiastek metaliczny, który pełni wtedy rolę rozpuszczalnika, oraz pierwiastek (lub pierwiastki) o odpowiednio małych promieniach atomów, aby mieściły się w lukach pierwiastka podstawowego. Te ograniczenia powodują, że roztwory stałe międzywęzłowe tworzą metale, których komórki elementarne mają duże wymiary (Co, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Pd, Ti, V, W), z takimi niemetalami jak: B, C, H, N. Atomy domieszki nie są jednak dopasowane do rozmiarów luk, co powoduje zniekształcenie struktury rozpuszczalnika proporcjonalnie do stężenia domieszki. Z tego powodu, żeby uzyskany stop mógł być traktowany jako roztwór stały międzywęzłowy podstawowy, tylko luki stanowiące niewielki procent całkowitej ich liczby mogą być obsadzone.

### ***Roztwory stałe wtórne***

Materiały wieloskładnikowe (stopy metaliczne) mogą mieć także fazy o strukturach innych niż ich składniki podstawowe. Nazywa się je często fazami pośrednimi lub roztworami stałymi wtórnymi w odróżnieniu od omówionych wyżej roztworów stałych podstawowych.

Fazy pośrednie (roztwory wtórne) występują w wielu stopach metali i są nazywane także związkami międzymetalicznymi lub fazami międzymetalicznymi. Fazy pośrednie dzielą się na trzy grupy:

- fazy o gęstym wypełnieniu przestrzeni,
- fazy elektronowe,
- fazy o wiązaniach metaliczno-jonowych lub metaliczno-kowalencyjnych.

Jako pewnego rodzaju odmianę faz elektronowych należy wyróżnić fazy pośrednie, które tworzą się podobnie jak roztwory stałe międzywęzłowe z tym, że udział składników dodatkowych jest porównywalny z udziałem składnika podstawowego, tzn. tworzą się borki, węgliki, wodorki i azotki takich metali, jak: Co, Cr, Fe, Mn, Mo, Ni, Pd, Ti, V, W.

### **2.1.7. Defekty struktur krystalicznych**

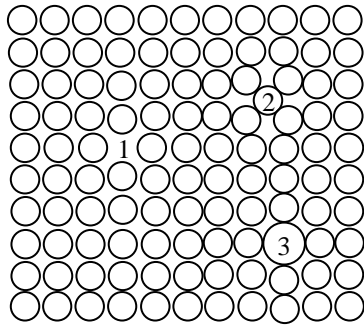
Omówione wyżej modele struktur krystalicznych przedstawiają obraz idealnego uporządkowania przestrzennego cząstek materialnych. Opis jednej komórki zawiera informacje o całym kryształ. Znając konfigurację, charakter i energię wiązań międzyatomowych w idealnym kryształ można przeprowadzić obliczenia, które pozwolą określić jego własności mechaniczne, cieplne i elektryczne. W oparciu o takie obliczenia stwierdzono istotne rozbieżności pomiędzy wytrzymałością na rozciąganie kryształów o idealnej strukturze i kryształów rzeczywistych (o możliwie wysokim stopniu regularności struktury) tych samych materiałów. Na przykład, rzeczywista wytrzymałość na rozciąganie miedzi, żelaza, wolframu, jest co najmniej kilkanaście razy mniejsza od ich wytrzymałości obliczonej przy założeniu, że mają idealną strukturę krystaliczną. W przypadku krzemu wytrzymałość rzeczywista jest około 100 razy mniejsza od teoretycznej.

Przyczyną tych rozbieżności jest fakt, że struktura ciał krystalicznych rzeczywistych jest odległa od idealnej. Zaburzenia struktury są nazywane defektami. Rozróżnia się trzy rodzaje defektów:

- punktowe,
- liniowe,
- powierzchniowe.

#### ***Defekty punktowe***

Defekty tego rodzaju mają niewielkie wymiary, najwyżej kilkakrotnie przekraczające wymiary cząstek, z których zbudowany jest kryształ. Należą do nich między innymi: wakanse - nieobsadzone węzły sieci krystalicznej, atomy ulokowane w lukach międzywęzłowych zamiast w węzłach, atomy obcych pierwiastków ulokowane w węzłach lub lukach międzywęzłowych. Przykładowe defekty punktowe przedstawiono na rys. 2.13.



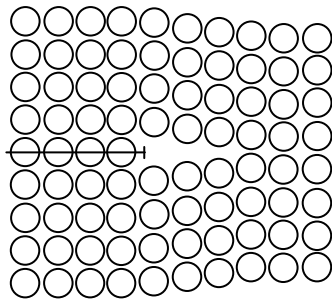
Rys. 2.13. Defekty punktowe sieci krystalicznej; 1 - wakans, 2 - atom w luce międzywęzłowej, 3 - atom domieszki

### **Defekty liniowe**

Defekty liniowe, inaczej zwane dyslokacjami, mają znaczne wymiary wzdłuż określonej linii oraz niewielkie wymiary w kierunku poprzecznym do tej linii. Podstawowe defekty liniowe to:

- dyslokacje krawędziowe,
- dyslokacje śrubowe.

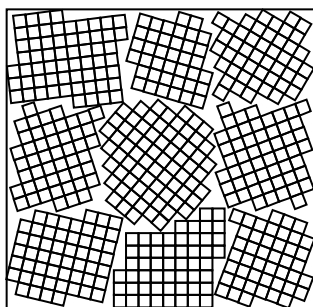
Pierwsze z nich wiążą się z brakiem ciągłości określonej warstwy cząstek wewnątrz kryształu, rys. 2.14. Natomiast, drugie charakteryzują się regularnym brakiem ciągłości warstw kolejno po sobie następujących tak, że krawędź nieciągłości ma kształt przypominający linię śrubową. Gęstość linii dyslokacji w zwykłych kryształach czystych metali jest bardzo duża, ok.  $10^7 \dots 10^8$  na  $1 \text{ cm}^2$  przekroju kryształu. Po obróbce mechanicznej próbki metalu, np. przez zgniatanie na zimno, gęstość ta może wzrosnąć do  $10^{10} \dots 10^{12}$  na  $1 \text{ cm}^2$ .



Rys. 2.14. Zniekształcenie sieci krystalicznej przez dyslokację krawędziową

### **Defekty powierzchniowe**

Defekty powierzchniowe to wewnętrzne powierzchnie graniczne oddzielające sąsiednie ziarna krystaliczne, rys. 2.15. Metale i stopy metaliczne mają budowę ziarnistą. Wymiary ziaren krystalicznych zależą od wielu czynników i często mieszczą się w zakresie mikrometrów i milimetrów.



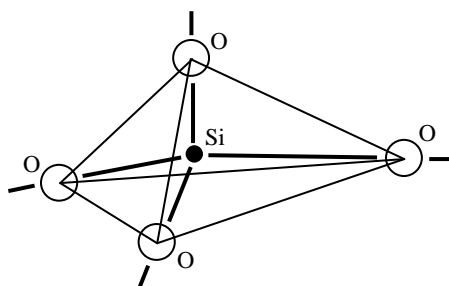
Rys. 2.15. Defekty powierzchniowe jako skutek ziarnistej budowy kryształów

Wraz ze wzrostem liczby defektów (głównie dyslokacji) maleje przewodność elektryczna metali i ich plastyczność, maleje także ich wytrzymałość mechaniczna, ale do pewnej granicy zwanej krytyczną gęstością dyslokacji, powyżej której wytrzymałość ta wzrasta. Własność tę wykorzystuje się do uzyskiwania materiałów o większej wytrzymałości. Liczbę defektów zwiększa się przez obróbkę plastyczną na zimno (zgniot) lub przez dodanie do metalu innych składników - wytwarzanie stopów.

## 2.2. Struktury materiałów ceramicznych i szkieł

Ceramika i szkło to materiały o wiązaniach jonowych. W materiałach ceramicznych występują związki zawierające kompleksy  $(\text{SiO}_4)^{4-}$  i  $(\text{AlO}_4)^{5-}$  odpowiadające tlenkom  $\text{SiO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz tlenki:  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{BaO}$ . Ceramiki specjalne zawierają tlenki:  $\text{CaO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ .

Wydzielone kompleksy, np.  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ , charakteryzują się tym, że siły wiązania anionów  $\text{O}^{2-}$  z należącym do tego samego kompleksu kationem  $\text{Si}^{4+}$ , są większe niż z innym kationem. Aniony  $\text{O}^{2-}$  znajdują się w wierzchołkach czterościanu foremnego, a kation  $\text{Si}^{4+}$  w środku tej bryły, rys. 2.16. Wolne wiązania anionów umożliwiają łączenie się kompleksów w łańcuchy, szkielety, warstwy, tworząc namiastkę struktury. Część miejsc krzemu może być zajętych przez glin, tworząc glinokrzemiany, typowe dla materiałów ceramicznych.



Rys. 2.16. Szkic przestrzennego rozłożenia elementów kompleksu  $(\text{SiO}_4)^{4-}$

W przypadku, gdy siły wiązania anionu z wszystkimi otaczającymi go kationami są takie same, nie powstają wydzielone kompleksy. Taką strukturę mają kryształy NaCl. Kompleksy (nie wydzielone)  $\text{NaCl}_6$  i  $\text{Na}_6\text{Cl}$  przenikają się wzajemnie. Kryształ jest jedną wielką cząsteczką o wiązaniu jonowym. Taką strukturą charakteryzują się tlenki, między innymi: CaO, MgO, BaO,  $\text{TiO}_2$ , wchodzące w skład różnych materiałów ceramicznych.

Podobnie jak większość materiałów ceramicznych stosowanych w elektrotechnice, szkła składają się z dwóch rodzajów związków chemicznych. Pierwszy rodzaj to tzw. składniki szkłotwórcze, do których należą tlenki:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$ ,  $\text{GeO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , tworzące kompleksy wydzielone:  $(\text{SiO}_4)^{4-}$ ,  $(\text{BO}_3)^{3-}$ ,  $(\text{GeO}_4)^{4-}$  i  $(\text{AlO}_4)^{5-}$ . Drugi rodzaj to tzw. składniki modyfikujące, do których należą tlenki, między innymi:  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ,  $\text{PbO}$ ,  $\text{CaO}$ .

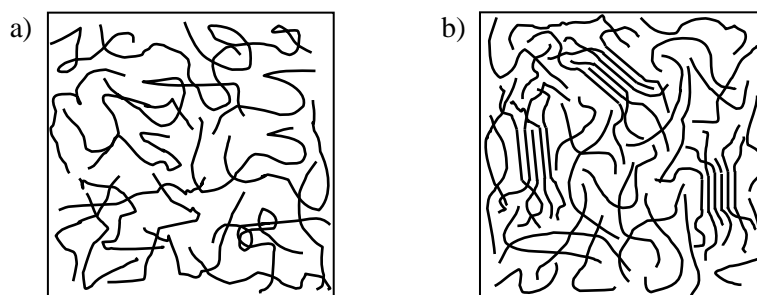
Najczęściej stosowane w elektrotechnice szkła mają nieregularny szkielet przestrzenny złożony z kompleksów szkłotwórczych. Struktura szkieletu jest dość luźna z powodu połączenia części sąsiadujących ze sobą kompleksów za pośrednictwem anionów tlenowych pochodzących z tlenków modyfikujących. Kationy tych tlenków (np.  $\text{K}^+$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ) zajmują wolne miejsca w tej strukturze. Wynika z tego, że szkła są materiałami bezpostaciowymi, nie występuje w nich uporządkowanie dalekiego zasięgu.

### 2.3. Struktury materiałów organicznych

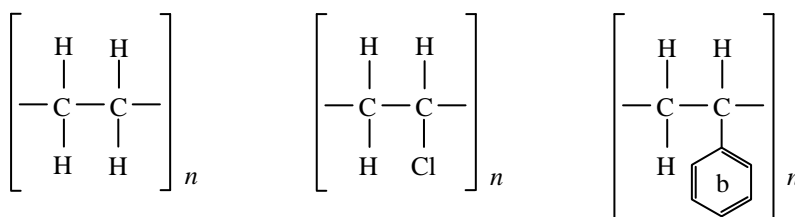
Wielkocząsteczkowe materiały organiczne, mające zastosowanie w elektrotechnice jako materiały izolacyjne, nie wykazują w zasadzie uporządkowania przestrzennego dalekiego zasięgu. Długie łańcuchy węglowe polimerów organicznych (100...10000 monomerów w łańcuchu), proste lub rozgałęzione, z dołączonymi bocznie atomami wodoru, grupami atomów lub pierścieniami węglowymi, ułożone są w przestrzeni zupełnie przypadkowo, rys. 2.17a.

W określonych warunkach ciśnienia i temperatury lub na skutek specjalnej obróbki, w materiałach wielkocząsteczkowych może powstać tzw. struktura mikrokryształiczna, charakteryzująca się uporządkowanym (równoległym) ułożeniem makrocząsteczek w niewielkich przestrzeniach wewnątrz materiału, rys. 2.17b.

Własności polimerów organicznych zależą od składu i budowy makrocząsteczek. Jest to wyraźnie widoczne w przypadku własności mechanicznych. Materiały składające się z makrocząsteczek nie powiązanych ze sobą wiązaniami międzyatomowymi (nie usieciowane) charakteryzują się znaczną plastycznością (małą twardością). Ich twardość zależy jednak od budowy makrocząsteczek, rys. 2.18.



Rys. 2.17. Szyk przekroju próbki polimeru organicznego z zaznaczeniem położenia wybranych makrocząstek: a) rozmieszczonych przypadkowo, b) z widocznymi obszarami mikrokrystalicznymi



Rys. 2.18. Wzory strukturalne monomerów (od lewej): polietylenu, polichlorku winylu i polistyrenu; b - benzen;  $n = 100 \dots 10000$

Większą twardością charakteryzuje się polichlorek winylu, w którego makrocząsteczkach jako obiekty boczne, obok atomów wodoru, występują wielokrotnie większe od nich atomy chloru. Na każde trzy atomy wodoru przypada jeden atom chloru. Jeszcze większą twardość ma polistyren, gdzie co czwarty atom wodoru łańcucha węglowego jest zastąpiony pierścieniem złożonym z sześciu atomów węgla (pierścieniem benzenowym). Dodatkowo, do pięciu atomów węgla w pierścieniu benzenu są dołączone atomy wodoru.

Twardość wymienionych wyżej materiałów (termoplastów) zmniejsza się wraz ze wzrostem ich temperatury. Rosnąca energia drgań poszczególnych atomów w makrocząsteczkach ułatwia ich przemieszczanie się i zmianę konfiguracji.

W przypadku polimerów organicznych usieciowanych, duża ich twardość jest zapewniona silnymi wiązaniami międzyatomowymi łączącymi poprzecznie sąsiednie makrocząsteczki. Przykładami takich materiałów (duropplastów) są: żywica fenolowo-formaldehydowa i żywica epoksydowa. Elementy izolacyjno-konstrukcyjne z tych materiałów uzyskuje się przez ich termiczne lub chemiczne utwardzenie. W czasie utwardzania tworzą się poprzeczne wiązania między makrocząsteczkami.



### 3. MATERIAŁY PRZEWODZĄCE

#### 3.1. Przewodnictwo elektryczne metali i stopów

##### 3.1.1. Klasyczna teoria przewodnictwa elektrycznego metali

Przewodnictwo elektryczne metali polega na ruchu znajdujących się w nich elektronów swobodnych. Dotyczy to także stopów metalicznych i pierwiastków częściowo metalicznych. W węzłach sieci krystalicznej materiałów o wiązaniach metalicznych znajdują się atomy pozbawione części lub wszystkich elektronów walencyjnych. W przestrzeni między tymi atomami poruszają się elektrony swobodne. Można je traktować jako szczególnego rodzaju gaz (każdy elektron posiada taki sam ładunek elektryczny) znajdujący się w szczególnego rodzaju zbiorniku, jakim jest przestrzeń wewnętrzna metalu.

Traktując elektrony, zgodnie z zasadami fizyki klasycznej, jako cząstki o określonej masie i objętości, obdarzone ładunkiem elektrycznym ujemnym, można w prosty sposób opisać ich zachowanie w obecności pola elektrycznego, spowodowanego np. przyłożeniem napięcia między końcami przewodnika. Na elektrony działa siła  $F$  powodująca ich ruch jednostajnie przyspieszony. Wartość tej siły zależy od wartości ładunku  $e$  elektronu i natężenia pola elektrycznego  $E$ , zgodnie z zależnością:

$$F = eE \quad (3.1)$$

Rozpędzone w polu elektrycznym elektrony zderzają się co pewien odcinek drogi ( $\nu$  razy na sekundę) z rdzeniami atomowymi (jonami) w węzłach sieci krystalicznej tracąc za każdym razem swój pęd. Posługując się masą  $m$  i średnią prędkością elektronu  $\nu$ , można zdefiniować siłę  $T$  hamującą jego ruch. Siła ta jest równa średniemu pędowi traconemu przez elektron w czasie jednej sekundy:

$$T = m\nu\nu \quad (3.2)$$

W stanie ustalonym (stała prędkość średnia elektronu) siły  $F$  i  $T$  równoważą się:

$$eE = m\nu\nu \quad (3.3)$$

Średnia prędkość elektronu wynosi więc:

$$v = \frac{e}{m\nu} E \quad (3.4)$$

Znając ładunek  $e$  elektronu oraz liczbę  $n$  swobodnych elektronów w jednostce objętości przewodnika, a także ich średnią prędkość  $v$ , można obliczyć gęstość prądu przepływającego przez ten przewodnik:

$$j = nev \quad (3.5)$$

Po uwzględnieniu zależności (3.4), wzór na gęstość prądu przyjmuje postać:

$$j = \frac{ne^2}{m\nu} E \quad (3.6)$$

Zamiast częstością zderzeń elektronów  $\nu$  można posługiwać się jej odwrotnością, tzn. średnim czasem między zderzeniami  $\tau$ . Zależność (3.6) przyjmie wtedy postać:

$$j = \frac{ne^2\tau}{m} E \quad (3.7)$$

Po podzieleniu obu stron zależności (3.6) przez  $E$ , otrzymuje się wzór na konduktywność (elektryczną przewodność właściwą) metalu:

$$\gamma = \frac{ne^2\tau}{m} \quad (3.8)$$

Jednostką konduktywności jest  $1 \text{ S}\cdot\text{m}^{-1}$ , gdzie  $1 \text{ S} = 1 \text{ }\Omega^{-1}$ . Dla przewodów elektrycznych, których długość wyraża się zwykle w metrach a powierzchnię przekroju poprzecznego w milimetrach, używa się często jednostki milion razy większej:

$$1 \frac{\text{m}}{\Omega\text{mm}^2} = 10^6 \frac{\text{S}}{\text{m}} = 1 \frac{\text{MS}}{\text{m}}$$

Odwrotnością konduktywności jest rezystywność (elektryczna oporność właściwa) metalu:

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{m}{ne^2\tau} \quad (3.9)$$

Jednostką rezystywności jest  $1 \text{ }\Omega\text{m}$ . Podobnie, jak w przypadku konduktywności, używa się często jednostki tradycyjnej milion razy mniejszej:

$$1 \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}} = 10^{-6}\Omega\text{m} = 1\mu\Omega\text{m}$$

Dla miedzi stosowanej na przewody elektryczne przyjmuje się wartości konduktywności i odpowiadającej jej rezystywności, wyrażone podanymi niżej liczbami lub zbliżonymi do nich.

$$\gamma_{\text{Cu}} = 58 \frac{\text{MS}}{\text{m}} = 58 \frac{\text{m}}{\Omega\text{mm}^2}$$

$$\rho_{\text{Cu}} = 0,01724 \mu\Omega\text{m} = 0,01724 \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$$

### 3.1.2. Pasmowa teoria przewodnictwa elektrycznego

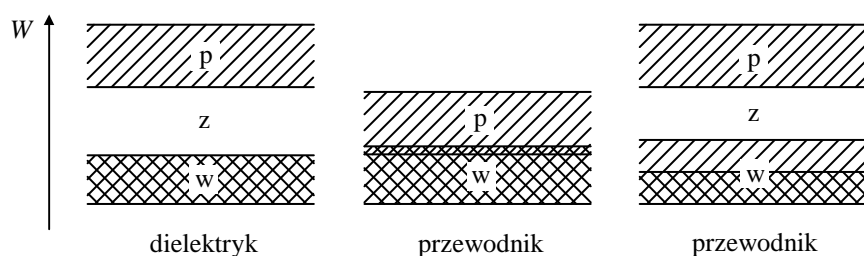
Zgodnie z kwantową teorią ciała stałego, krążące wokół jądra elektrony mogą zajmować dyskretne poziomy energetyczne, z których składają się pasma energetyczne dozwolone. Dwa najbardziej oddalone od jądra atomu pasma energetyczne dozwolone dla elektronów to kolejno pasmo walencyjne i pasmo przewodnictwa. W przypadku dielektryków i półprzewodników te dwa pasma są rozdzielone pasmem zabronionym. Szerokość energetyczna każdego z tych trzech pasm jest rzędu kilku elektronowoltów (pasma zabronione półprzewodników jest zwykle węższe od 2 eV).

Każdy dozwolony, dyskretny poziom energetyczny w paśmie walencyjnym lub paśmie przewodnictwa jest wynikiem oddziaływania jednego z atomów znajdujących się w ciele stałym o określonej objętości. Przyjmując, że dotyczy to np. ciała stałego o objętości równej  $1 \text{ cm}^3$ , liczba poziomów energetycznych w każdym z tych pasm będzie równa liczbie atomów znajdujących się w tym ciele, tj. rzędu  $10^{22} \dots 10^{23}$ .

W ciałach o budowie krystalicznej stany energetyczne elektronów w powłokach zewnętrznych zależą nie tylko od oddziaływania ich macierzystego jądra, ale także od oddziaływania pozostałych atomów. To znaczy, że elektrony te należą do całego kryształu. Z kolei zasada Pauliego mówi, że dany poziom energetyczny w kryształce może być obsadzony najwyżej przez dwa elektrony różniące się momentem magnetycznym spinowym.

Z powyższego wynika, że wszystkie poziomy energetyczne w paśmie walencyjnym w kryształce mogą być zajęte przez elektrony. Brak wolnych poziomów energetycznych oznacza brak możliwości przemieszczania się elektronów w kryształce. Wprawdzie wolne poziomy energetyczne są w paśmie przewodnictwa, rys. 3.1, ale w przypadku np. materiałów izolacyjnych szerokie pasmo zabronione (ponad 5 eV) stanowi istotną przeszkodę dla przejścia elektronów do pasma przewodnictwa.

Inaczej jest w przewodnikach, w których pasmo zabronione nie istnieje, gdyż dolna część pasma przewodnictwa pokrywa się z górną częścią pasma walencyjnego, rys. 3.1. Przewodnikami są także metale, których pasma walencyjne są obsadzone tylko częściowo. W takim przypadku górna część pasma walencyjnego pełni rolę pasma przewodnictwa.



Rys. 3.1. Pasma energetyczne (w - walencyjne, z - zabronione, p - przewodnictwa) typowe dla materiałów izolacyjnych i przewodzących w temperaturze 0 K; kreskowanie podwójne - poziomy energetyczne zajęte; kreskowanie pojedyncze - poziomy energetyczne wolne; W - energia

W przewodniku przemieszczanie się elektronów (należących do najbardziej zewnętrznego pasma energetycznego) jest możliwe w całej jego objętości. Energia rzędu  $10^{-22}$  eV potrzebna do przejścia między sąsiednimi poziomami dyskretnymi może być z łatwością dostarczona ze źródła napięcia.

### 3.1.3. Zależność rezystywności metali od temperatury

Zgodnie z klasyczną teorią przewodnictwa elektrycznego metali, zderzenia elektronów z jonami w węzłach sieci krystalicznej następują średnio co 40 nm ich drogi do bieguna źródła napięcia o wyższym potencjale. Dotyczy to metali stosowanych najczęściej na przewody i elementy przewodzące urządzeń elektrycznych, których temperatura jest w pobliżu 293 K.

Ze wzrostem temperatury rośnie amplituda drgań jonów w węzłach sieci krystalicznej, co powoduje wzrost częstości zderzeń elektronów z tymi jonami. Droga między kolejnymi zderzeniami skraca się, rośnie rezystywność metalu.

Na rezystywność metali  $\rho$  składają się dwie rezystywności:

- rezystywność idealna  $\rho_i$ , zależna tylko od drgań cieplnych jonów w węzłach sieci krystalicznej,
- rezystywność reszkowa  $\rho_r$ , zależna od defektów sieci krystalicznej i zanieczyszczeń.

Pierwsza z nich zależy od temperatury. W zakresie temperatur różniących się nie więcej niż o kilkadziesiąt kelwinów od temperatury 293 K, rezystywność idealna jest w przybliżeniu liniową funkcją temperatury:

$$\rho_i = f(T) \quad (3.10)$$

Natomiast w zakresie temperatur poniżej 100...50 K, rezystywność ta zależy od temperatury w piątej potęgze:

$$\rho_i = f(T^5) \quad (3.11)$$

Liczba defektów struktury krystalicznej nie zależy od temperatury poniżej temperatury mięknięcia metali. Stąd też rezystywność resztkowa  $\rho_r$  praktycznie nie zależy od temperatury.

Z powyższych rozważań wynika, że całkowita rezystywność:

$$\rho = \rho_i + \rho_r \quad (3.12)$$

zależy od temperatury.

Dla celów technicznych, w zakresie temperatur, w których pracują elementy przewodzące urządzeń elektrycznych, tj. od  $-30^\circ\text{C}$  do  $+200^\circ\text{C}$  (243...473 K), zależność rezystywności metali od temperatury można wystarczająco dokładnie aproksymować wzorem:

$$\rho = \rho_{293}(1 + \alpha \cdot \Delta T) \quad (3.13)$$

Podobnie, jak wartości rezystywności metali zmierzone w określonych temperaturach, np. 293 K, można znaleźć w tablicach materiałowych wartości temperaturowego współczynnika rezystywności  $\alpha$  (dla określonych zakresów temperatury), oznaczanego także akronimem *TWR*. Dla metali współczynnik ten jest dodatni - wraz ze wzrostem temperatury metalu jego rezystywność rośnie.

Temperaturowy współczynnik rezystywności dobrych przewodników prądu elektrycznego, srebra Ag, miedzi Cu, aluminium Al, jest bardzo zbliżony i wynosi prawie dokładnie  $0,004 \text{ K}^{-1}$ .

## 3.2. Materiały przewodowe

### 3.2.1. Metale i stopy metaliczne

#### *Miedź i jej stopy*

Gęstość miedzi wynosi  $8,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ . Konduktywność chemicznie czystej miedzi wynosi  $59,77 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ , a miedzi o czystości 99,9 %, na przewody -  $58 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ . Czysta miedź charakteryzuje się znaczną wytrzymałością na rozciąganie (200...400 MPa), zależnie od stopnia utwardzenia. Miedź wykazuje

znaczną odporność na korozję w normalnej atmosferze, w obecności dwutlenku węgla i wilgoci pokrywa się związkami węglanu i wodorotlenku miedzi, tzw. patyną, chroniącą ją przed dalszą korozją.

Do najczęściej spotykanych półwyrobów z miedzi należą: druty, pręty, rury, blachy, taśmy. Druty i pręty są najczęściej prasowane wypływowo (wyciskane). Wlewki podgrzany do temperatury ok. 900 °C umieszcza się w grubościennym zbiorniku, zamkniętym z jednej strony matrycą, a z drugiej tłokiem napędzanym prasą hydrauliczną. Cienkie druty wykonuje się z pręta o średnicy najczęściej około 6 mm, przeciągając go na zimno przez kalibrowane oczka o coraz mniejszych średnicach (ze stali, węgla wolframu i diamentu). Przy przeciąganiu drutu na zimno miedź się utwardza, rośnie jej wytrzymałość na rozciąganie i twardość, maleje wydłużalność i przewodność. Wyżarzając miedź twardą w temperaturze około 500 °C otrzymuje się w wyniku rekryształizacji miedź miękką.

Stopy miedzi dzielą się na dwa podstawowe rodzaje: mosiądze i brązy. Zawartość miedzi w tych stopach przekracza 50 %. Główną domieszką w mosiَادzach jest cynk. Natomiast w brązach zawartość cynku jest mniejsza od zawartości innych składników stopowych. Konduktywność stopów miedzi jest mniejsza od konduktywności samej miedzi.

Mosiądz CuZn40Pb2 jest podstawowym stopem do obróbki skrawaniem, można go również poddawać obróbce plastycznej na zimno, tłoczeniu, a przede wszystkim obróbce na gorąco. Wyrabia się z niego śruby toczone, sworznie, nakrętki i tym podobne elementy przewodzące maszyn i aparatów elektrycznych. Inny rodzaj mosiądzu CuZn37 to podstawowy stop do obróbki plastycznej na zimno, jest podatny na głębokie tłoczenie. Używany jest do wyrobu elementów przewodzących osprzętu instalacyjnego (łączników, opraw źródeł światła, bezpieczników, itp.).

Brązy mają zwykle zabarwienie ciemnoróżowe. W elektrotechnice najczęściej stosowane są brązy: kadmowy, berylowy, krzemowy, tellurowy oraz aluminiowy. Brązy, w stosunku do mosiądzu, mają większą wytrzymałość mechaniczną, lepszą odporność na korozję, wyższą odporność na ścieranie i lepsze własności ślizgowe.

### ***Aluminium i jego stopy***

Aluminium (glin) ma gęstość 2,7 g·cm<sup>-3</sup>. Konduktywność chemicznie czystego Al wynosi 38,2 MS·m<sup>-1</sup>, a aluminium elektrolitycznego o czystości 99,5 %, stosowanego na przewody elektryczne, 35 MS·m<sup>-1</sup>. Czyste aluminium charakteryzuje się niewielką wytrzymałością na rozciąganie (70...170 MPa, zależną od stopnia utwardzenia). Aluminium wykazuje dużą odporność na korozję, w powietrzu atmosferycznym pokrywa się samorzutnie spoistą warstwą izolacyjną AlOOH i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o grubości ok. 0,5 μm.

Druty aluminiowe wytwarza się przez przeciąganie na zimno. Powstałe przy tym utwardzenie można usunąć przez wyżarzanie w temperaturze 300 - 350 °C. Obróbka plastyczna na zimno pogarsza nieco przewodność aluminium. Aluminium stosowane jest, jako materiał przewodowy we wszystkich tych przypadkach, w których zastosowanie droższej miedzi nie jest konieczne. Z aluminium wytwarza się cienkie folie stosowane w kondensatorach. Wykonuje się je z aluminium o czystości co najmniej 99,9 %.

W elektrotechnice stopy aluminium znajdują zastosowanie jedynie na elementy konstrukcyjne aparatów i urządzeń elektrycznych. Cechują się większą wytrzymałością mechaniczną od czystego Al, np. często stosowany duralumin (AlCu3Mg1). Przy wykonywaniu odlewów aluminiowych używa się stopu aluminium z krzemem, zwanego siluminem (AlSi9), charakteryzującego się znaczną wytrzymałością.

### ***Cyna i cynk***

Cyna ma barwę srebrzystobiałą o trwałym połysku w powietrzu. Jej gęstość wynosi  $7,28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , a temperatura topnienia 232 °C - najniższa spośród metali stosowanych w elektrotechnice. Cyna ma niewielką wytrzymałość mechaniczną, jest odporna na działanie powietrza, wody, słabych kwasów i zasad. Cynę stosuje się jako dodatek stopowy i jako składnik lutów miękkich.

Cynk ma barwę srebrzystą o niebieskawym odcieniu. Jego gęstość wynosi  $7,14 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  a temperatura topnienia 419,5 °C. Zaletą cynku jest odporność na działanie czynników atmosferycznych dzięki powstawaniu na jego powierzchni cienkiej warstwy zasadowego węglanu  $\text{Zn}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ . Z tego powodu cynk stosuje się na pokrycia antykorozyjne m.in. stalowych elementów urządzeń elektrycznych. Jest stosowany jako składnik stopów.

### ***Wolfram i molibden***

Wolfram ma gęstość  $19,29 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$  i temperaturę topnienia 3410 °C. Jest bardzo twardy i trudno obrabialny. Jego wytrzymałość na rozciąganie wynosi od 1200 do 4200 MPa, zależnie od stopnia utwardzenia. Pręty do dalszej przeróbki i niektóre elementy z wolframu wytwarza się przez spiekanie jego proszków w atmosferze ochronnej i temperaturze niższej od temperatury topnienia. Z wolframu wytwarza się żarniki żarówek, elektrody lamp fluorescencyjnych, rezystory grzejne, styki łączników dużych mocy itp.

Molibden ma własności zbliżone do wolframu. Jest miększy, ma mniejszą gęstość ( $10,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ) i niższą temperaturę topnienia (2622 °C). Molibden znajduje zastosowanie głównie jako składnik stopów, a właściwie spieków. W elektrotechnice wykonuje się z niego m.in. elementy żaroodporne i styki łukoodporne.

### ***Stal miękka***

Chemicznie czyste żelazo ma stosunkowo niewielką przewodność 10,3 MS/m, a każdy dodatek znacznie ją obniża. W związku z tym przewodność stali jest wielokrotnie niższa od przewodności miedzi i aluminium. Jednakże jej dostępność, niska cena, duża wytrzymałość mechaniczna oraz odporność na korozję, po pokryciu warstwą cynku, umożliwia zastosowanie tego materiału do wyrobu przewodów ochronnych, odgromowych, rdzeni przewodów aluminiowych. Ze stali wykonuje się także zwody, przewody odprowadzające i uziomy urządzeń piorunochronnych.

### **3.2.2. Materiały na przewody i połączenia przewodzące**

Do grupy materiałów, z których wytwarza się przewody (żyły przewodzące w przypadku przewodów izolowanych) oraz połączenia przewodzące prąd elektryczny, zalicza się zwykle materiały charakteryzujące się możliwie małą wartością rezystywności, dużą wytrzymałością mechaniczną i odpowiednimi własnościami cieplnymi (duże wartości przewodności cieplnej i dopuszczalnej temperatury pracy). Obok przewodzenia prądu elektrycznego, materiały przewodowe mogą pełnić rolę okładzin kondensatorów oraz rolę elementu kontaktowego (połączenia nierozłączalne).

#### ***Materiały na przewody elektroenergetyczne gołe***

Przewody gołe stosuje się głównie w liniach napowietrznych wysokiego napięcia, to znaczy o napięciu wyższym od 1000 V. Obecnie do budowy linii napowietrznych niskiego napięcia stosuje się przewody izolowane.

Podstawowym materiałem na przewody elektroenergetyczne gołe jest aluminium. W liniach wysokiego napięcia stosuje się linki stalowo-aluminiowe. Rdzeń takiego przewodu jest linką wykonaną z drutów stalowych ocynkowanych i jest opleciony kilkoma warstwami drutów z Al twardego. Rdzeń stalowy ( $\gamma \cong 10 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$ ) gwarantuje odpowiednią wytrzymałość na rozciąganie. Alternatywnym rozwiązaniem są linki z tzw. aldreju, stopu aluminium z magnezem (ok. 0,4 %), krzemem (ok. 0,5 %) i żelazem (około 0,3 %). Aldrej ma porównywalną przewodność ( $30 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$ ) z Al twardym i ponad dwukrotnie większą od niego wytrzymałość na rozciąganie (350 MPa).

Jednym z nowszych rozwiązań przewodów gołych do linii napowietrznych są linki wykonane z drutów stalowych, na których wytłoczono grubą, hermetyczną warstwę aluminium (technologia japońska).

#### ***Materiały na żyły przewodów elektroenergetycznych izolowanych***

W bogatym zbiorze przewodów izolowanych służących do przesyłania energii elektrycznej można wyróżnić przewody jednożyłowe i wielożyłowe,



przewody kablkowe i kable elektroenergetyczne. Żyły tych przewodów wykonuje się najczęściej z miedzi miękkiej, rzadziej z aluminium półtwardego, a tylko w nielicznych przypadkach ze stopów miedzi. Żyły mogą mieć postać drutu okrągłego, linki z drutów okrągłych lub linki wykonanej z drutów profilowanych. Zaletą ostatniego rozwiązania jest lepsze wypełnienie przekroju żyły materiałem przewodowym oraz zbliżenie jego kształtu do kołowego.

#### ***Materiały na druty nawojowe***

Do wykonania uzwojeń transformatorów, maszyn elektrycznych, dławików i elektromagnesów stosuje się druty nawojowe miedziane pokryte zwykle cienką warstwą izolacji. Druty o małych średnicach (setne części milimetra) wykonuje się z miedzi półtwardej, dla zapewnienia odpowiedniej wytrzymałości. Druty o większych średnicach wykonuje się z miedzi miękkiej. Cienkie druty nawojowe są zwykle okrągłe. W przypadku uzwojeń urządzeń elektrycznych dużej mocy dominują przekroje prostokątne.

#### ***Materiały na połączenia między elementami, układami scalonymi i podzespołami urządzeń elektronicznych***

Elementy indywidualne, układy i podzespoły elektroniczne są łączone najczęściej przewodami drutowymi i foliowymi (folia przewodząca na laminacie izolacyjnym – obwody drukowane). Najlepszym materiałem na takie połączenia jest miedź o czystości co najmniej 99,9 % Cu. Dla ochrony przed utlenianiem stosuje się powlekanie przewodów miedzianych cyną, srebrem lub niklem, co pozwala uzyskać dopuszczalne temperatury pracy odpowiednio: 150 °C, 200 °C i 260 °C. Z kolei dla zwiększenia wytrzymałości mechanicznej dodaje się do miedzi srebro, kadm albo chrom, zwykle w ilości do 1 %.

#### ***Materiały na połączenia w układach elektronicznych scalonych hybrydowych grubowarstwowych***

Technologia układów scalonych grubowarstwowych polega na wykonywaniu kolejnych warstw przez nanoszenie past, które zawierają drobnoziarniste proszki metali lub tlenków metali oraz szkliwa niskotopliwego, na płytce z ceramiki alundowej (zawartość  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powyżej 96 %). Jako podstawowe materiały do wytwarzania warstw przewodzących stosuje się: srebro, stop Ag-Pd, złoto, platynę i stop Au-Pt. Do nakładania warstw stosuje się technikę sitodruku. Po nałożeniu kolejnej warstwy, układ poddaje się wypalaniu w temperaturze od 500 do 1400 °C, zależnie od rodzaju warstwy. Szkliwo jest składnikiem wiążącym w czasie wypalania. Po wykonaniu układu scalonego grubowarstwowego dołącza się do niego indywidualne elementy półprzewodnikowe niezbędne ze względu na funkcję, jaką ma spełniać układ.

### ***Materiały na połączenia w układach elektronicznych scalonych monolitycznych***

Układy monolityczne, całkowicie scalone, zawierają wszystkie elementy potrzebne do realizacji określonej funkcji (wzmacniacz, generator, układ logiczny, procesor, pamięć elektroniczna itp.). Jako podłoże takich układów stosuje się głównie monokrystaliczne płytki krzemowe, w których wytwarza się potrzebne złącza  $p-n$ . Do wykonania połączeń przewodzących warstw złącza z innymi elementami układu scalonego stosuje się najczęściej aluminium. Metal ten jest domieszką akceptorową, więc użycie go do wyprowadzenia obwodu z warstwy typu  $p$  jest właściwe. Wyprowadzenie obwodu ścieżką przewodzącą Al może powodować problemy polegające na powstaniu złącza odwrotnego na granicy warstwa  $n$  - Al, na skutek penetracji jonów krzemu do aluminium. Zapobiega się temu zapewniając nadmiar domieszki donorowej w warstwie  $n$ .

Wykonywanie ścieżek przewodzących na płytkach krzemowych (po wykonaniu wcześniej złączy  $p-n$ ) polega na naporowaniu w próżni warstwy aluminium na utlenioną powierzchniowo płytkę Si. Warstwa  $SiO_2$  izoluje Al od krzemu, z wyjątkiem połączeń ze złączami  $p-n$ . Aluminium jest jedynym metalem o dużej przewodności elektrycznej charakteryzującym się dużą przyczepnością do warstwy izolacyjnej  $SiO_2$ . Z powierzchni kontaktowych Al układu scalonego wyprowadza się połączenia do jego styków za pomocą drutów o średnicy rzędu  $20\ \mu m$  ze złota lub aluminium. W pierwszym przypadku pewne trudności sprawia tworzenie się warstw porowatych na granicy Au-Al.

#### **3.2.3. Materiały na rezystory**

Rezystory wytwarza się z materiałów oporowych metalicznych i niemetalicznych. Do pożądanych własności materiałów oporowych należy zaliczyć: dużą rezystywność, mały współczynnik temperaturowy rezystancji (TWR), wysoką dopuszczalną temperaturę pracy, odporność na utlenianie, dużą wytrzymałość mechaniczną. Pożądana jest także stałość własności w czasie.

Ze względu na przeznaczenie rezystory dzielą się na:

- rezystory precyzyjne (pomiarowe),
- rezystory techniczne (regulacyjne),
- rezystory grzejne.

Ze względu na specyfikę wykonania należy oddzielnie rozpatrywać rezystory w układach scalonych.

#### ***Materiały na rezystory precyzyjne***

Od materiałów na rezystory precyzyjne (wzorce rezystancji, rezystory w mostkach i przyrządach pomiarowych) wymaga się możliwie słabej zależności rezystywności od temperatury i czasu eksploatacji. Istotnym wymogiem jest

mała wartość jednostkowej siły termoelektrycznej (STE) materiału oporowego w odniesieniu do materiału połączanego z nim przewodu. Generowana w złączu przewodu z rezystorem siła termoelektryczna, dodając lub odejmując się od spadku napięcia na rezystorze, może powodować błędy pomiarowe.

Materiały na rezystory precyzyjne to głównie stopy miedzi z kilkoma innymi metalami kolorowymi i żelazem. Używając nazw handlowych klasyczne materiały to: manganin  $\text{Cu}_{86}\text{Mn}_{12}\text{Ni}_2$ , izabelin  $\text{Cu}_{84}\text{Mn}_{13}\text{Al}_3$ , inmet  $\text{Cu}_{82,5}\text{Mn}_{12}\text{Al}_{14}\text{Fe}_{1,5}$ , konstantan  $\text{Cu}_{55}\text{Ni}_{45}$ . Liczby po symbolach pierwiastków oznaczają ich zawartość procentową w stopie.

Wartości rezystywności i temperaturowego współczynnika rezystancji są prawie takie same dla wymienionych materiałów i wynoszą odpowiednio:  $\rho = 0,5 \mu\Omega\text{m}$ ,  $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$ . Wartość bezwzględna jednostkowej STE nie przekracza  $1 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$  dla manganinu, izabelinu i inmetu, a dla konstantanu wynosi  $-42,6 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ . Dopuszczalne temperatury pracy zawierają się w zakresie od  $250^\circ\text{C}$  (manganin) do  $400^\circ\text{C}$  (konstantan).

### ***Materiały na rezystory techniczne***

Przykładowe rezystory techniczne to rezystory rozruchowe i regulacyjne do silników, rezystory ograniczające prąd w układach z kondensatorami, cewkami i elementami półprzewodnikowymi.

Klasyczne materiały na rezystory techniczne to (wymieniając w kolejności coraz większych możliwych obciążeń prądowych): konstantan, nikielina  $\text{Cu}_{54}\text{Ni}_{26}\text{Zn}_{20}$  i żeliwo stopowe  $\text{Fe}_{93,9}\text{Zn}_{3,6}\text{Si}_{1,7}\text{Mn}_{0,8}$ . Wartości rezystywności tych materiałów są w przybliżeniu takie, jak dla materiałów na rezystory precyzyjne. Natomiast wartości TWR nikieliny i żeliwa stopowego wynoszą odpowiednio  $2,3 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$  i  $1 \cdot 10^{-3} \text{K}^{-1}$ . Dopuszczalne temperatury pracy tych dwóch materiałów wynoszą odpowiednio  $300^\circ\text{C}$  i  $400^\circ\text{C}$ .

### ***Materiały metaliczne na rezystory grzejne***

Rezystory grzejne stosuje się we wszelkiego rodzaju urządzeniach elektrotermicznych (piece, suszarki, grzałki, grzejniki, żelazka, kuchnie elektryczne, lutownice). Szczególnie ważnym wymaganiem podstawowym w tym przypadku jest możliwie wysoka dopuszczalna temperatura pracy ciągłej.

Materiały metaliczne na rezystory grzejne dzielą się na: nichromy, ferronichromy i ferrochromale. Do pierwszej grupy należy chromonikielina bezżelazowa  $\text{Ni}_{80}\text{Cr}_{20}$ , a do drugiej chromonikielina żelazowa  $\text{Fe}_{20}\text{Ni}_{65}\text{Cr}_{15}$ . Obydwa te stopy mają rezystywność równą  $1 \dots 1,1 \mu\Omega\text{m}$  oraz dopuszczalną temperaturę pracy ciągłej równą  $1150^\circ\text{C}$ . Najlepszym materiałem trzeciej grupy jest kanthal  $\text{Fe}_{68}\text{Cr}_{24}\text{Al}_{11,5}\text{Co}_{1,5}$ . Jego rezystywność wynosi  $1,45 \mu\Omega\text{m}$ , a dopuszczalna temperatura pracy ciągłej osiąga  $1375^\circ\text{C}$ .

Wyższe temperatury pracy uzyskuje się stosując na elementy grzejne czysty molibden lub wolfram, które mogą pracować w temperaturach dochodzących do 1500...3000 °C, ale wymagają atmosfery beztlenowej.

### ***Materiały niemetaliczne na rezystory grzejne***

Popularnym materiałem grzejnym niemetalicznym jest węgiel krzemu SiC o dopuszczalnej temperaturze pracy dochodzącej do 1650 °C. Pręty grzejne wykonywane z SiC znane są pod nazwami silit i globar. Wyższą dopuszczalną temperaturą pracy (do 1900 °C) charakteryzuje się krzemek molibdenu MoSi<sub>2</sub>, z którego wytwarza się elementy grzejne o nazwach: superkanthal, mosilit. Do nowszych materiałów na elementy grzejne można zaliczyć węgiel niobu NbC. Materiały grzejne z czystego węgla bezpostaciowego lub grafitu mogą pracować w temperaturze do 3000 °C, ale wymagają atmosfery ochronnej.

### ***Materiały na rezystory w układach elektronicznych scalonych***

Rezystory w układach elektronicznych scalonych wykonuje się z materiałów metalicznych i niemetalicznych. Spośród materiałów metalicznych na wymienienie zasługuje stop Cr-Ni (chromonikielina), cechujący się małym TWR ( $10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ ), stabilnością i powtarzalnością parametrów oraz dobrą przyczepnością do podłoża układów scalonych. Chromonikielina przewyższa swoimi własnościami inne znane materiały oporowe. Rezystancja oporników z Cr-Ni liczona na kwadrat powierzchni warstwy (tzn. zmierzona na warstwie o kształcie kwadratu) może zawierać się w granicach od 30 do 400 Ω, zależnie od składu stopu.

Rezystory warstwowe w układach elektronicznych scalonych wykonuje się również z innych stopów, np. Cr-Ti, Ta-Au, a także z czystych metali, np. Ti, Cr, Ta, W.

Do materiałów niemetalicznych stosowanych na rezystory w układach elektronicznych scalonych można zaliczyć tlenki niektórych metali oraz węgiel, a także materiały złożone ze sproszkowanych metali, stopów lub tlenków, związane materiałem ceramicznym (materiały cermetowe), szkliwem (materiały wypalane) lub tworzywem organicznym (materiały kompozytowe).

Rezystory warstwowe tlenkowe wykonywane są najczęściej z tlenku cyny SnO<sub>2</sub> z domieszkami tlenków antymonu i indu. Rezystory tlenkowe mają grubość ok. 1 μm i rezystancję na kwadrat do 500 Ω. Są odporne na narażenia mechaniczne i wysokie temperatury pracy (do 240 °C).

Rezystory warstwowe są wytwarzane także z węgla uzyskiwanego w procesie pirolizy, tzn. cieplnego rozkładu węglowodorów (np. metanu, benzenu) w temperaturze ok. 1000 °C. Na podłożu (zwykle ceramicznym) osadza się węgiel polikrystaliczny o strukturze ziaren zbliżonej do struktury grafitu. Uzyskuje się warstwy o grubości od kilkudziesięciu nanometrów do

kilku mikrometrów i rezystancji na kwadrat od kilku do kilkuset omów. Ujemny współczynnik rezystancji warstw węglowych i wynosi około  $10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

Rezystory cermetowe wytwarza się w układach scalonych cienkowarstwowych i monolitycznych przez jednoczesne naporowanie lub napyłanie katodowe na podłoże metalu (np. Cr) lub stopu (np. Ni-Cr) i składników ceramicznych (np. SiO, SiO<sub>2</sub>).

W uzyskiwanych techniką wypalania, układach scalonych grubowarstwowych, rezystory wytwarza się z drobnoziarnistych proszków metali i szkliwa. Najczęściej stosowane są pallad i srebro o wymiarach ziaren do  $0,5 \mu\text{m}$  i szkło ołowiowo-borowo-krzemowe gruboziarniste (ziarna o wymiarach ok.  $5 \mu\text{m}$ ). Rezystancja na kwadrat tak uzyskanych rezystorów zawiera się w zakresie od 1 do  $25 \text{ k}\Omega$ . Wartość TWR jest rzędu  $10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Średnia grubość warstwy wynosi  $25 \mu\text{m}$ .

W rezystorach kompozytowych składnikiem przewodzącym jest często węgiel w postaci sadzy lub grafitu, a składnikiem wiążącym żywice termoutwardzalne (silikonowe, epoksydowe). Trzecim składnikiem jest wypełniacz (talk, mączka mikowa, dwutlenek tytanu) polepszający rozmieszczenie ziaren węglowych w żywicy. Jedynie ta technologia umożliwia uzyskanie bardzo dużych wartości rezystancji, do  $10^{12} \Omega$ .

### 3.2.4. Materiały na styki elektryczne

Zespół dwóch (niekiedy więcej niż dwóch) styków tworzy tzw. zestyk. Zestyk jest zwykle elementem szeregowym toru prądowego. Zestyki dzieli się ze względu na rodzaj pracy i przeznaczenie. Z punktu widzenia wymagań dotyczących własności materiałów, z których styki są wykonywane, istotne znaczenie mają zestyki ruchome. Styki nieruchome, będące elementami tzw. zacisków, powinny zapewniać w zasadzie tylko małą rezystancję przejścia.

Zestyki ruchome dzielą się na dwie podstawowe grupy:

- zestyki ruchome rozłączne,
- zestyki ruchome nierozłączne.

Pierwsze z nich są podstawowymi elementami łączników elektrycznych (wyłączników, odłączników, przełączników, styczników, przekaźników, itp.). Zwykle jeden ze styków jest nieruchomy (stały) a drugi ruchomy. Styki zestyków ruchomych nierozłącznych mogą (nie tracąc kontaktu) wzajemnie przemieszczać się względem siebie. W przypadku trakcji elektrycznej, styk ruchomy (szczotka pantografu) ślizga się po przewodzie trakcyjnym. W przypadku silników indukcyjnych pierścieniowych styk ruchomy (pierścień) obraca się stykając się ze stykiem nieruchomym (szczotką).

Warunki pracy zestyków rozłącznych zależą od przeznaczenia łącznika, którego są częścią. W przypadku przekaźników, łączników teletechnicznych itp. przewodzone i przerywane prądy są rzędu ułamków ampera a napięcia między

otwartymi stykami nie przekraczają zwykle kilkunastu woltów. Przy małych wartościach prądów istotne jest uzyskanie małej rezystancji stykowej. Materiały najczęściej stosowane na styki łączników słaboprądowych to: srebro, platyna, pallad, stop srebro-kadm i stop srebro-pallad.

W łącznikach niskiego napięcia ( $U < 1000 \text{ V}$ ), które załączają i przerywają prądy o wartościach od kilku do kilkudziesięciu amperów, styki narażone są na działanie łuku elektrycznego o umiarkowanej mocy. Materiał stykowy musi więc mieć wysoką temperaturę topnienia i musi być odporny na utlenianie, upalanie i sklejanie się styków. Na styki w takich łącznikach stosuje się najczęściej wolfram oraz stopy: Ag-CdO, Ag-W, Ag-grafit, Ag-Ni.

W przypadku łączników niskiego napięcia na prądy rzędu setek i tysięcy amperów oraz łączników wysokiego napięcia, styki narażone są na działanie silnego łuku elektrycznego oraz silny docisk. Wymaga to zastosowania na styki (nakładki stykowe) materiałów szczególnie odpornych, a jednocześnie o dobrej przewodności. Praktycznie stosuje się na takie styki molibden oraz stopy i spieki: W-Cu (z dodatkiem Ni lub Co), W-Ag-Ni.

Szczotki zestyków ślizgowych wykonuje się głównie z materiałów węglowych. Tylko w niewielkim zakresie stosuje się metale. Pożądane własności materiałów szczotkowych to przede wszystkim: mała rezystywność, mały współczynnik tarcia, mała ścieralność, duża wytrzymałość mechaniczna. Zgodnie z obowiązującym podziałem wyróżnia się cztery podstawowe materiały szczotkowe: metalografit, węglografit, grafit i elektrografit.

Metalografit uzyskuje się przez spiekanie sproszkowanego grafitu z proszkami metalu lub stopu. Wykonuje się z niego różne rodzaje szczotek zależnie od użytych składników, np. szczotki srebrowo-grafitowe, miedziowo-grafitowe lub brązowo-grafitowe (grafit plus Cu-Pb).

Składnikami do produkcji węglografitu są proszki grafitu, sadzy, koksu i odpowiednie lepiszcza. Węglografit uzyskuje się przez wypalanie sprasowanych proszków. Zależnie od procesu technologicznego wytworzone szczotki mogą być twarde, odporne na wstrząsy i iskrzenie, albo średnio twarde.

Grafit jako materiał szczotkowy uzyskuje się przez prasowanie i wypalanie proszku grafitowego. Zależnie od temperatury wypalania szczotki grafitowe różnią się własnościami elektrycznymi i mechanicznymi.

Elektrografit otrzymuje się z takich samych składników jak węglografit, poddając je po sprasowaniu procesowi grafityzacji w temperaturze ok.  $3000^\circ\text{C}$ . Zależnie od parametrów tego procesu uzyskuje się szczotki o różnej twardości.

Styki współpracujące ze szczotkami wykonuje się głównie ze stopów metali. Jednym z podstawowych materiałów, z którego wykonuje się przewody jezdne w sieci trakcyjnej jest brąz kadmowy (miedź z jednoprocentowym dodatkiem kadmu). Na pierścienie ślizgowe maszyn elektrycznych stosuje się m.in. brąz berylowy (zawartość berylu ok. 2 %).

### 3.2.5. Materiały na termopary

Na bazie termopar wykonuje się termometry do kontaktowego, punktowego pomiaru temperatury. Termometry termoelektryczne znajdują szerokie zastosowanie m.in. w urządzeniach i procesach przemysłowych, gdzie wymagana jest ciągła kontrola (rejestracja, regulacja, stabilizacja) temperatury.

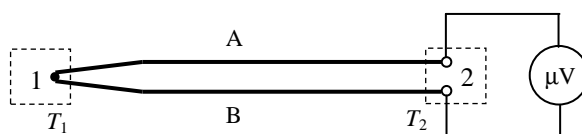
Termopary wykonuje się z materiałów termoelektrycznych, tzn. materiałów charakteryzujących się wysokim poziomem intensywności zjawisk termoelektrycznych, a w szczególności zjawiska Seebecka, które objawia się występowaniem tzw. kontaktowej różnicy potencjałów na styku dwóch różnych metali lub stopów, zwanej także siłą termoelektryczną (STE).

Fizyczną przyczyną kontaktowej różnicy potencjałów są różnice gęstości elektronów swobodnych w różnych przewodnikach (metalach i stopach metalicznych) oraz zależność tej koncentracji, a co za tym idzie wartości STE, od temperatury przewodnika.

Elektrony swobodne w metalu mogą poruszać się w całej jego objętości, mogą także przenikać przez granicę styczności dwóch metali (termopary). Z tego wynika, że elektrony podlegając zjawisku dyfuzji będą przechodzić z przewodnika o większej ich gęstości do przewodnika o mniejszej ich gęstości, powodując w tym drugim nadmiar nieskompensowanego ładunku ujemnego. Natomiast w pierwszym przewodniku będzie nadmiar ładunku dodatniego.

Powstała w taki sposób różnica potencjałów (STE) będzie działać na elektrony siłą skierowaną przeciwnie do siły spowodowanej ciśnieniem dyfuzyjnym. W efekcie ustali się równowaga między tymi siłami, na poziomie zależnym od temperatury złącza. Wartość obydwóch sił będzie tym większa, im wyższa będzie temperatura złącza.

Schemat elektryczny termometru termoelektrycznego przedstawiono na rys. 3.2, a w tabeli 3.1 - wartości jednostkowej siły termoelektrycznej  $e_T$  wybranych materiałów termoelektrycznych, w odniesieniu do platyny. Wartość napięcia  $U_T$  wskazywanego przez mikrowoltomierz zależy od różnicy jednostkowych sił termoelektrycznych ( $\Delta e_T = e_{TA} - e_{TB}$ ) materiałów A i B oraz od różnicy temperatur  $T_1$  i  $T_2$ , zgodnie z zależnością  $U_T = \Delta e_T(T_1 - T_2)$ .



Rys. 3.2. Schemat elektryczny termometru termoelektrycznego;  
A i B - elementy termopary z różnych materiałów termoelektrycznych,  
1 - złącze termopary, 2 - wolne końce termopary,  $T_1$  - temperatura złącza,  $T_2$  - temperatura odniesienia,  $\mu V$  - mikrowoltomierz

Tabela 3.1. Wartości jednostkowej siły termoelektrycznej w odniesieniu do platyny oraz maksymalnej temperatury pracy wybranych materiałów termoelektrycznych

Materiał	Skład	$e_T$ [ $\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$ ]	$T_{max}$ [ $^{\circ}\text{C}$ ]
nichrom	Ni80Cr20	+22,0	1000
żelazo	Fe	+18,0	600
molibden	Mo	+13,1	2000
wolfram	W	+7,9	2000
nikiel	Ni	-15,0	1000
konstantan	Cu60Ni40	-35,0	600
kopel	Cu56Ni44	-40,0	600

Końce 2 termopary nie tworzą bezpośrednio złącza takiego jak końce 1, są połączone przewodem miedzianym pośrednio przez mikrowoltomierz. Mimo tego, wartość siły termoelektrycznej między końcami 2 (równa sumie  $STE$ , z uwzględnieniem ich znaku, dwóch złączy: materiał A - miedź i miedź - materiał B), jest taka sama jak wartość tej siły, jaka by była, gdyby te końce tworzyły złącze bezpośrednie.

Znając temperaturę odniesienia  $T_2$ , różnicę jednostkowych sił termoelektrycznych materiałów A i B oraz wartość zmierzonego napięcia  $U_T$ , można, na podstawie zależności  $U_T = \Delta e_T(T_1 - T_2)$ , wyznaczyć temperaturę  $T_1$ . Przyjmując, że temperatura  $T_2$  jest stała, po przeprowadzeniu tzw. wzorcowania termometru termoelektrycznego, można skalę napięciową mikrowoltomierza zastąpić skalą temperatury.



## 4. MATERIAŁY MAGNETYCZNE

### 4.1. Zjawiska magnetyczne w ośrodkach materialnych

Zjawiska magnetyczne w ośrodkach materialnych wiążą się z istnieniem tzw. prądów molekularnych. Prądy molekularne tworzą poruszające się cząstki elementarne obdarzone ładunkiem elektrycznym. Obracające się wokół własnej osi jądro atomu, krążące wokół niego elektrony, które obracają się jednocześnie wokół własnych osi, to trzy oddzielne przyczyny prądów molekularnych. Każdy z tych przypadków można zastąpić modelem w postaci zamkniętego obwodu mniej lub bardziej zbliżonego do kształtu kołowego, w którym płynie prąd elektryczny. Prąd ten wytwarza dwubiegunowe pole magnetyczne, które można scharakteryzować wielkością wektorową, tzw. dipolowym momentem magnetycznym.

W atomie występują więc trzy rodzaje trwałych dipolowych momentów magnetycznych:

- jądrowy,
- elektronowy orbitalny,
- elektronowy spinowy, tzn. związany z momentem obrotowym elektronu (spinem).

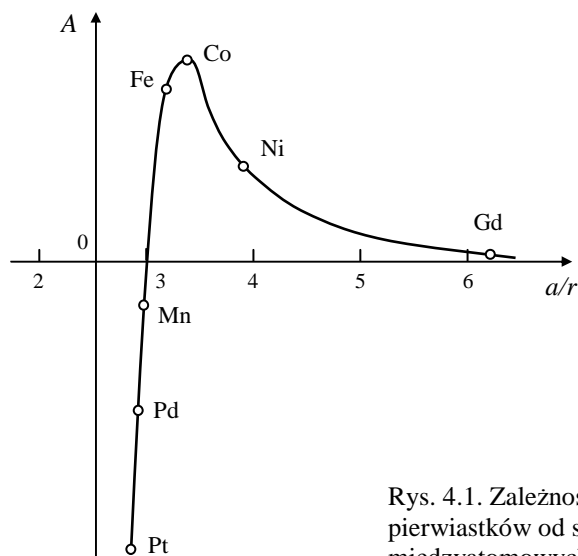
Wypadkowy trwały moment magnetyczny atomu jest, wyznaczaną zgodnie z zasadami mechaniki kwantowej, sumą wektorową wymienionych momentów - jądra i wszystkich jego elektronów. O wartości tej sumy decydują magnetyczne momenty spinowe elektronów. Ich momenty magnetyczne orbitalne oraz moment magnetyczny jądra są relatywnie tak małe, że praktycznie się je pomija.

Spinowe momenty magnetyczne elektronów, mogące mieć jedną z dwóch wartości:  $+\frac{1}{2}$  lub  $-\frac{1}{2}$ , kompensują się wzajemnie podobnie jak ich momenty orbitalne. Wypadkowy moment magnetyczny atomu może być zerowy, w przypadku pełnej kompensacji, albo niezerowy, w przypadku niepełnej kompensacji. W drugim przypadku liczba nie skompensowanych momentów magnetycznych spinowych atomu zależy od pierwiastka i dla następujących pierwiastków wynosi: 5 dla Mn, 4 dla Cr i Fe, 3 dla Co i V, 2 dla Ni i Ti.

Niezależnie od trwałego momentu magnetycznego atomu (większego od zera lub zerowego), pole magnetyczne zewnętrzne indukuje w nim dodatkowy moment magnetyczny, tzw. moment magnetyczny indukowany.

W ciele stałym składającym się z atomów pierwiastka o niezerowych trwałych momentach magnetycznych, na skutek oddziaływań między atomami, ich momenty magnetyczne różnią się między sobą i są znacznie mniejsze niż atomów izolowanych. W przypadku żelaza i kobaltu to zmniejszenie wynosi średnio prawie o 50 % a w przypadku niklu o 70 %. Natomiast w przypadku manganu i chromu średnie momenty magnetyczne atomów w ciele stałym są praktycznie zerowe.

Skutki oddziaływań między atomami, o niezerowych trwałych momentach magnetycznych, określa się wartością tzw. energii wymiany  $A$ , która zależy od relacji między odległością  $a$  mierzona między środkami sąsiednich atomów i promieniem  $r$  ich najbardziej zewnętrznej niekompletnie obsadzonej powłoki elektronowej, rys. 4.1.



Rys. 4.1. Zależność energii wymiany  $A$  wybranych pierwiastków od stosunku odległości międzyatomowych  $a$  do promienia atomu  $r$

Z przedstawionymi własnościami magnetycznymi atomów i złożonych z nich ciał stałych, a także cząsteczek cieczy i gazów, wiążą się określone efekty magnetyczne, przyjmowane zwykle jako kryterium podziału materiałów. Z tym podziałem wiąże się także wartość ich przenikalności magnetycznej  $\mu$  określonej zależnością:

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (4.1)$$

gdzie:  $B$  – indukcja magnetyczna,  $H$  – natężenie pola magnetycznego.

Przenikalność magnetyczna próżni,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$  (w przybliżeniu  $1,256 \cdot 10^{-6} \text{ H}\cdot\text{m}^{-1}$ ), jest znaną stałą fizyczną. Do niej porównywana jest zwykle przenikalność magnetyczna ciał stałych, cieczy i gazów. Co wiąże się z pojęciem względnej przenikalności magnetycznej:  $\mu_r = \mu / \mu_0$ .

## 4.2. Podstawowe własności materiałów magnetycznych

### 4.2.1. Procesy magnesowania

Spośród pięciu grup (diamagnetyki, paramagnetyki, ferromagnetyki, antyferromagnetyki i ferrimagnetyki) materiałów różniących się własnościami magnetycznymi, tylko materiały należące do dwóch z nich są stosowane na obwody magnetyczne i magnesy trwałe. Są to *ferromagnetyki* i *ferrimagnetyki* - zwane ogólnie materiałami magnetycznymi.

Indukcja magnetyczna  $B$  wywołana w materiale magnetycznym przez zewnętrzne pole magnetyczne o natężeniu  $H$  jest sumą indukcji magnetycznej w próżni i polaryzacji magnetycznej tego materiału  $M$ :

$$B = \mu H = \mu_0 H + M \quad (4.2)$$

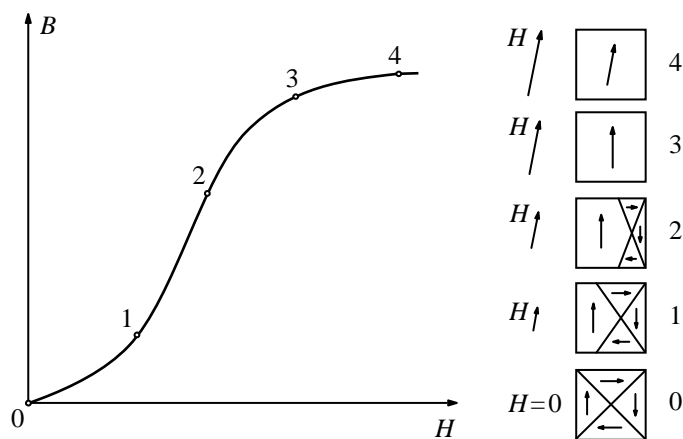
Polaryzacja  $M$  materiału magnetycznego zależy od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego  $H$ :

$$M = (\mu_r - 1)\mu_0 H = \eta_m \mu_0 H \quad (4.3)$$

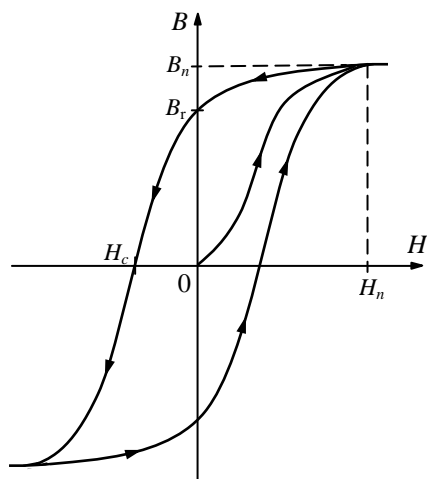
gdzie  $\eta_m$  jest podatnością magnetyczną materiału. Jej wartość dla próżni wynosi 0.

Na rys. 4.2 przedstawiono proces pierwotnego magnesowania materiału magnetycznego przy zwiększaniu natężenia pola  $H$  od zera. Po całkowitym rozroście domen najbardziej zgodnych z zewnętrznym polem magnetycznym i uporządkowaniu w nich wszystkich dipoli zgodnie z kierunkiem tego pola (punkt 4, na rys. 4.2) występuje nasycenie magnetyczne materiału.

Zmniejszanie natężenia pola, po osiągnięciu nasycenia magnetycznego w czasie magnesowania pierwotnego powoduje zmniejszanie się indukcji  $B$  z opóźnieniem. Pozostawanie  $B$  w tyle za  $H$  nazywa się histerezą magnetyczną. Rejestrując zmiany indukcji w materiale magnetycznym umieszczonym w polu magnetycznym przemiennym uzyskuje się tzw. pętle histerezy magnetycznej. Szczególnym przypadkiem takiej pętli jest graniczna pętla histerezy magnetycznej, tzn. uzyskana przy amplitudzie  $H$ , przy której indukcja osiąga wartości graniczne pomiędzy stanem nienasycenia i nasycenia materiału magnetycznego, rys. 4.3.



Rys. 4.2. Zależność indukcji magnetycznej  $B$  materiału magnetycznego od rosnącego natężenia pola  $H$  oraz ilustracja procesu magnesowania



Rys. 4.3. Graniczna pętla histerezy magnetycznej

Graniczna pętla histerezy jest figurą symetryczną względem początku układu współrzędnych. Dodatnim wartościom wielkości:  $B_n$ ,  $H_n$ ,  $B_r$  i  $H_c$ , odpowiadają ich wartości ujemne. Graniczną wartość indukcji nasycenia  $B_n$  uzyskuje się przy granicznym natężeniu pola magnetycznego  $H_n$ . Stan namagnesowania po zmniejszeniu  $H$  do zera określa pozostałość magnetyczna  $B_r$  (indukcja remanencji). Chcąc zmniejszyć indukcję do zera należy zmienić kierunek pola  $H$  na przeciwny i zwiększyć go do wartości zwanej natężeniem powściąągającym  $H_c$  (natężenie koercji).

### 4.2.2. Przenikalność magnetyczna

Ze względu na nieliniowość i histerezę charakterystyki  $B = f(H)$  materiałów magnetycznych, wartości ich przenikalności magnetycznej bezwzględnej  $\mu$  a tym samym i względnej  $\mu_r$  nie są stałe i jednoznaczne. Podawanie konkretnych wartości liczbowych  $\mu$  lub  $\mu_r$  wymaga określenia warunków ich uzyskania. Spośród różnie definiowanych przenikalności magnetycznych najważniejsze to:

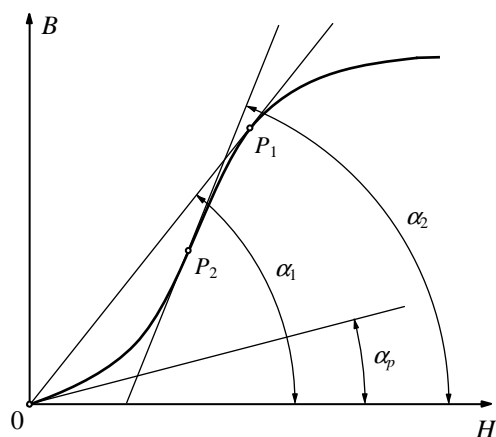
- przenikalność statyczna (normalna),
- przenikalność dynamiczna (różniczkowa).

Obydwie wymienione przenikalności są definiowane na pierwotnej krzywej magnesowania, rys. 4.4. Ze względu na jej krzywoliniowość, wartości przenikalności statycznej i dynamicznej różnią się od siebie i są różne w różnych punktach tej charakterystyki. Dla materiałów magnetycznych zwykle określa się dwie charakterystyczne wartości każdej z tych przenikalności: przenikalność początkową i przenikalność maksymalną.

Przenikalności magnetyczne początkowe, statyczna i dynamiczna, są sobie równe. Ich wartość jest równa tangensowi kąta, jaki tworzy z osią  $H$  styczna do charakterystyki magnesowania pierwotnego w punkcie początkowym układu współrzędnych, rys. 4.4. Odpowiednia zależność przedstawia się następująco:

$$\mu_{p(stat)} = \mu_{p(dyn)} = \lim_{H \rightarrow 0} \frac{B}{H} = \operatorname{tg} \alpha_p \quad (4.4)$$

Przenikalność magnetyczna statyczna maksymalna jest równa tangensowi kąta, jaki tworzy z osią  $H$  prosta przechodząca przez początek układu współrzędnych i punkt  $P_1$  na pierwotnej krzywej magnesowania, rys. 4.4.



Rys. 4.4. Ilustracja do definicji charakterystycznych wartości przenikalności magnetycznej statycznej i dynamicznej

W punkcie  $P_1$  iloraz  $B/H$  ma największą wartość. Zależność na przenikalność statyczną maksymalną przedstawia się więc następująco:

$$\mu_{m(stat)} = \left( \frac{B}{H} \right)_{\max} = \operatorname{tg} \alpha_1 \quad (4.5)$$

Przenikalność magnetyczna dynamiczna maksymalna jest równa tangensowi kąta, jaki tworzy z osią  $H$  prosta styczna do pierwotnej krzywej magnesowania w punkcie  $P_2$ , rys. 4.4. W punkcie  $P_2$  pochodna  $dB/dH$  ma największą wartość. Zależność na przenikalność dynamiczną maksymalną przedstawia się więc następująco:

$$\mu_{m(dyn)} = \left( \frac{dB}{dH} \right)_{\max} = \operatorname{tg} \alpha_2 \quad (4.6)$$

### 4.2.3. Stratność magnetyczna

W materiałach magnetycznych znajdujących się w zmiennym polu magnetycznym, np. w materiałach rdzeni magnetycznych w urządzeniach elektrycznych prądu zmiennego, występują straty energii, tzn. część energii pola magnetycznego zmienia się w ciepło. Straty magnetyczne są powodowane przez dwa zjawiska: zmianę orientacji domen magnetycznych - straty na histerezę, indukowanie prądów w materiale magnetycznym - straty na prądy wirowe.

W praktyce rzadko używa się pojęcia strat energii magnetycznej, częściej używa się pojęcia strat mocy odniesionych do jednostki masy materiału magnetycznego. Taka wielkość fizyczna nazywa się stratnością magnetyczną, a jej jednostką jest  $1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Stratność całkowita ferromagnetyka lub ferrimagnetyka  $\Delta p_{Fe}$  jest sumą stratności histerezowej  $\Delta p_h$  i wiroprądowej  $\Delta p_w$ .

Stratność histerezowa, wiążąca się z pracą wykonaną na zmianę orientacji domen, jest proporcjonalna do pola powierzchni ograniczonego pętlą histerezy i zależy od częstotliwości  $f$  zmian pola magnetycznego oraz od amplitudy indukcji magnetycznej  $B_m$  zgodnie ze wzorem:

$$\Delta p_h = k_h \frac{f}{f_{50}} \left( \frac{B_m}{B_1} \right)^2 \quad (4.7)$$

gdzie:  $k_h$  – stała materiałowa, tzn. stratność histerezowa w watach na kilogram przy częstotliwości zmian pola magnetycznego równej 50 Hz ( $f_{50}$ ) i amplitudzie indukcji równej 1 T ( $B_1$ ).

Stratność wiroprądowa, wiążąca się z wydzielaniem ciepła (ciepła Joule'a) w czasie przepływu prądów wirowych przez materiał magnetyczny

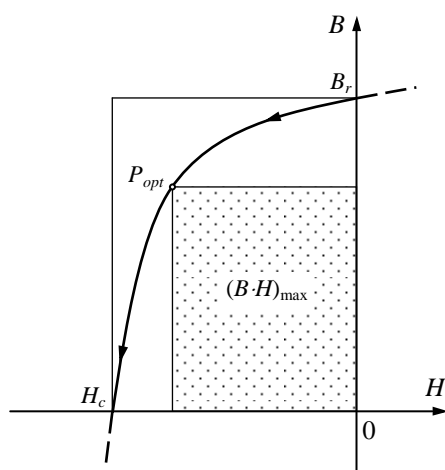
o określonej rezystywności, zależy od częstotliwości  $f$  zmian pola magnetycznego, od amplitudy indukcji magnetycznej  $B_m$  oraz od grubości blach magnetycznych, z których wykonano rdzeń, zgodnie ze wzorem:

$$\Delta p_w = k_w \left( \frac{f}{f_{50}} \frac{B_m}{B_1} \frac{\delta}{\delta_{0,5}} \right)^2 \quad (4.8)$$

gdzie:  $k_w$  – stała materiałowa, tzn. stratność wiropądowa w watach na kilogram przy częstotliwości zmian pola magnetycznego równej 50 Hz ( $f_{50}$ ), amplitudzie indukcji równej 1 T ( $B_1$ ) oraz standardowej grubości blach rdzenia równej 0,5 mm ( $\delta_{0,5}$ ).

#### 4.2.4. Krzywa odmagnesowania

Część granicznej pętli histerezy leżąca w drugiej ćwiartce układu współrzędnych prostokątnych  $B, H$  to krzywa odmagnesowania, rys 4.5. Jej kształt oraz związane z nim charakterystyczne wielkości są istotne dla oceny własności materiałów magnetycznych twardych.



Rys. 4.5. Krzywa odmagnesowania materiału magnetycznie twardego (objaśnienia w tekście)

Gęstość energii pola magnetycznego w magnesie trwałym jest równa iloczynowi  $B \cdot H$ , obliczonemu dla punktu pracy magnesu leżącego na krzywej odmagnesowania. Punktu temu (punkt  $P_{opt}$  na rys. 4.5), będącemu jednym z wierzchołków mieszczącego się pod krzywą odmagnesowania prostokąta o największym polu powierzchni  $(B \cdot H)_{max}$ , odpowiada optymalna

wartość indukcji, tzn. taka, przy której materiał magnetycznie twardy jest najlepiej wykorzystany.

Drugą, obok  $(B \cdot H)_{\max}$ , charakterystyczną wielkością jest współczynnik kształtu krzywej od magnesowania określony jako stosunek pól prostokątów: wyznaczonego przez punkt  $P_{opt}$  i wyznaczonego przez współrzędne  $B_r$  i  $H_c$ , rys. 4.5. Można go obliczyć z zależności:

$$k_o = \frac{(B \cdot H)_{\max}}{B_r \cdot H_c} \quad (4.9)$$

Materiał na magnesy trwałe jest tym lepszy, im wartość  $k_o$  jest większa. Najbardziej zbliżone do 1 wartości współczynnika kształtu krzywej od magnesowania mają materiały, których graniczna pętla histerezy magnetycznej jest zbliżona do kształtu prostokątnego.

### 4.3. Materiały magnetyczne stosowane w elektrotechnice

#### 4.3.1. Wprowadzenie

Materiały magnetyczne mogą mieć własności metaliczne, kiedy składają się z metali lub ich stopów, albo niemetaliczne, kiedy składają się z tlenków metali (własności ceramiki) lub stanowią mieszaninę sproszkowanego ferromagnetyka i materiału izolacyjnego.

Materiały magnetyczne dzielą się zasadniczo na:

- materiały magnetycznie miękkie,
- materiały magnetycznie twarde.

Najbardziej istotną cechą, którą różnią się te dwie grupy materiałów jest wartość natężenia powściąającego  $H_c$ . Materiały magnetycznie miękkie cechują się małymi wartościami  $H_c$ , rzędu kilku do kilkudziesięciu amperów na metr (wąska pętla histerezy). Natomiast materiały magnetycznie twarde mają znacznie większe wartości  $H_c$ , rzędu  $10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^{-1}$  (szeroka pętla histerezy).

Materiały magnetycznie miękkie powinny charakteryzować się możliwie dużymi wartościami:

- indukcji nasycenia  $B_n$ ,
- przenikalności magnetycznej statycznej względnej: początkowej  $\mu_{rp}$  i maksymalnej  $\mu_{rm}$ ;

oraz możliwie małymi wartościami:

- natężenia powściąającego  $H_c$ ,
- stratności  $\Delta p_{Fe}$ .

Natomiast materiały magnetycznie twarde powinny charakteryzować się możliwie dużymi wartościami:



- pozostałości magnetycznej  $B_r$ ,
- natężenia powściągającego  $H_c$ ,
- iloczynu  $(B \cdot H)_{\max}$ ,
- współczynnika kształtu krzywej od magnesowania  $k_o$ .

Ponadto, obydwa rodzaje materiałów magnetycznych powinny charakteryzować się:

- stabilnością wymienionych wyżej własności w czasie,
- łatwością obróbki mechanicznej i cieplnej,
- niską ceną.

Materiały magnetyczne pracujące w polach magnetycznych zmiennych o wielkich częstotliwościach powinny charakteryzować się możliwie dużą rezystywnością. Istotne są także własności fizyczne i konstrukcyjne, takie jak: masa właściwa, wytrzymałość mechaniczna, odporność na uderzenia i wstrząsy.

Materiały magnetycznie miękkie, magnesujące się łatwo i nietrwale, są stosowane na obwody magnetyczne urządzeń elektrycznych zmiennoprądowych (maszyny elektryczne, transformatory, dławiki, elektromagnesy). Zamyka się w nich strumień magnetyczny, równy iloczynowi indukcji magnetycznej i pola przekroju poprzecznego rdzenia, wzbudzony przez prąd płynący w otaczającym go uzwojeniu. Kiedy prąd w uzwojeniu nie płynie, w rdzeniu przepływa niewielki strumień związany z pozostałością magnetyczną  $B_r$ . Poza nielicznymi wyjątkami, ten strumień jest niepożądanym, stąd wymaga się, żeby materiały magnetycznie miękkie miały wąską pętlę histerezy, tzn. małe wartości  $H_c$  i  $B_r$ .

Z materiałów magnetycznie twardych wytwarza się magnesy trwałe stosowane między innymi w silnikach elektrycznych, prądnicach, urządzeniach telekomunikacyjnych i mikrofalowych oraz przyrządach pomiarowych. Materiały te namagnesowane w silnym polu magnetycznym zachowują trwale ten stan. Praktyczne magnesy trwałe nie tworzą zamkniętych obwodów magnetycznych. Szczeliny powietrzne powodują, że indukcja magnetyczna jest mniejsza od indukcji  $B_r$ . Magnes trwały ze szczeliną powinien być tak wykonany, aby punkt jego pracy był najbliżej punktu pracy optymalnej.

#### 4.3.2. Materiały magnetycznie miękkie metaliczne

##### *Żelazo*

Głównym składnikiem materiałów magnetycznie miękkich jest żelazo. Żelazo tworzy zwykle stopy z metalami ferromagnetycznymi: niklem i kobaltem, a także z krzemem. Składnikami materiałów magnetycznych są trudne do usunięcia zanieczyszczenia, zwykle niewielkie ilości innych pierwiastków takich, jak: węgiel, tlen, azot, siarka, fosfor.

Nawet śladowe ilości zanieczyszczeń powodują znaczne pogorszenie własności materiałów magnetycznych. Chemicznie czyste żelazo jest doskonałym materiałem magnetycznie miękkim. Jego statyczna maksymalna

przenikalność względna  $\mu_{rm}$  wynosi aż 1,5 miliona, a natężenie powściągające  $H_c$  zaledwie  $1,2 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ .

Najlepiej technicznie oczyszczone żelazo, w procesie elektrolizy i następnie po przetapianiu w próżni lub w atmosferze wodoru, który tworzy lotne związki z wymienionymi wyżej pierwiastkami niemetalicznymi, zawiera jeszcze 0,005 % węgla i 0,001 % tlenu. Mimo tak niewielkich zawartości zanieczyszczeń, jego  $\mu_{rm}$  jest ponad czterokrotnie mniejsza w porównaniu do żelaza chemicznie czystego, a  $H_c$  jest dwa razy większe.

Odmiany żelaza mające zastosowania techniczne charakteryzują się większą zawartością węgla i tlenu. Żelazo *karbonylkowe* stosowane do wytwarzania rdzeni proszkowych, a uzyskiwane w procesie termicznego rozkładu pięciokarbonylku żelaza  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ , zawiera po 0,005 % węgla i tlenu. Jego maksymalna przenikalność względna  $\mu_{rm}$  jest równa 21500, a natężenie powściągające  $H_c$  wynosi około  $6,4 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ .

Żelazo *armco* stosowane na rdzenie mierników i przekaźników, a uzyskiwane w specjalnych procesach wytapiania, zawiera aż 0,025 % węgla i 0,035 % tlenu. Jego  $\mu_{rm}$  wynosi zaledwie 5000, a  $H_c$  jest równe aż  $80 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ .

Statyczna początkowa przenikalność względna  $\mu_{rp}$  wymienionych wyżej materiałów wynosi od 200 do 20000 i jest większa przy mniejszej zawartości zanieczyszczeń. Natomiast, indukcja nasycenia  $B_n$  dla lepiej oczyszczonych odmian żelaza dochodzi do 2,17 T. Istotnym parametrem jest rezystywność materiału magnetycznego. Dla żelaza o różnym stopniu zanieczyszczenia  $\rho_{Fe} \cong 0,1 \mu\Omega\text{m}$  i jest większa od rezystywności miedzi  $\rho_{Cu} \cong 0,017 \mu\Omega\text{m}$ , ale zbyt mała, żeby w istotnym stopniu ograniczać prądy wirowe.

### ***Stal krzemowa i bezkrzemowa***

Materiałem stosowanym do wytwarzania obwodów magnetycznych transformatorów (w tym głównie energetycznych) i maszyn elektrycznych wirujących, od małych do największych mocy, jest *stal krzemowa*. Obok żelaza zawiera ona w swoim składzie od 1 do 4 % krzemu, do 0,05 % węgla i śladowe ilości innych pierwiastków.

W porównaniu do żelaza o czystości technicznej, kilkuprocentowy udział Si w stali krzemowej powoduje pozytywne zmiany większości jej własności magnetycznych:

- zwiększa przenikalność początkową  $\mu_{rp}$  i maksymalną  $\mu_{rm}$ ,
- zmniejsza wartość natężenia powściągającego  $H_c$ ,
- zwiększa rezystywność  $\rho$ ,
- polepsza stabilność własności magnetycznych w czasie.

Do negatywnych zmian należy zaliczyć:

- zmniejszenie indukcji nasycenia  $B_n$  (z 2,15 T do 1,95 T przy 4 % Si),
- zwiększenie twardości i kruchości materiału.

Stal krzemowa przeznaczona do wytwarzania rdzeni magnetycznych jest produkowana w postaci blach zwykle o grubości dziesiątych części milimetra. Jest to podyktowane głównie koniecznością ograniczenia prądów wirowych w rdzeniach magnetycznych urządzeń elektrycznych zmiennoprądowych. Kilkakrotne zwiększenie rezystywności, w porównaniu z czystym żelazem, przez dodanie krzemu jest niewystarczające. Tak więc, rdzenie magnetyczne buduje się w postaci pakietu blach krzemowych izolowanych od siebie.

Pierwotnie używano blach walcowanych na gorąco (technologia podobna do stosowanej w produkcji blach konstrukcyjnych). Obecnie używa się blach walcowanych na zimno, które mają mniejszą stratność i lepszą magnesowalność (pierwotna charakterystyka magnesowania przechodzi przez większe wartości indukcji  $B$ ). Poza tym w technologii walcowania na zimno uzyskuje się blachy o większej gładkości i mniejszych odchyłkach grubości. Pozwala to uzyskać wysoką wartość (ponad 0,97) współczynnika wypełnienia stałą krzemową przestrzeni zajmowanej przez rdzeń.

Obecnie stosowanym sposobem izolowania sąsiednich blach pakietu rdzenia jest powlekanie ich cienką warstwą izolacji ceramicznej odpornej na wysokie temperatury (do 800°C). Takie rozwiązanie uniemożliwia przepływ prądów wirowych w kierunkach poprzecznych do blach. Ograniczenie prądów wirowych płynących w blachach równoległe do ich powierzchni jest tym większe, im ich grubość jest mniejsza.

Produkuje się blachy ze stali krzemowej walcowane na zimno: *nieorientowane* i *orientowane*. Blachy orientowane uzyskuje się w wyniku wielokrotnych operacji walcowania na zimno w tym samym kierunku i wyżarzania odprężającego. Uzyskuje się przez to uporządkowanie kryształów w taki sposób, że ich kierunki łatwego magnesowania, równoległe do określonych krawędzi sieci krystalograficznej, są w większości zgodne z kierunkiem walcowania. W wyniku tego procesu blacha ma silne własności anizotropowe. Jej własności magnetyczne są w kierunku walcowania znacznie lepsze niż w kierunkach poprzecznych. Zdecydowanie mniejsza jest stratność, nawet 4-krotnie, a magnesowalność większa o 35 %.

Z droższych blach orientowanych buduje się rdzenie przede wszystkim transformatorów energetycznych. Podstawowe parametry tych blach mają następujące wartości:  $\mu_{rm} = 60000$ ,  $H_c = 10 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ ,  $\Delta p_{Fe} = 0,7 \text{ W}\cdot\text{kg}^{-1}$ . Blachy nieorientowane o własnościach izotropowych są stosowane w maszynach elektrycznych wirujących. Na rdzenie o niewielkich wymiarach stosuje się blachy o mniejszej zawartości krzemu, które cechują się mniejszą kruchością a przez to lepszą wykrawalnością.

Na rdzenie maszyn elektrycznych małej mocy stosuje się często blachy ze stali bezkrzemowej walcowane na zimno nieorientowane. Obok żelaza stale te zawierają do 0,3 % węgla i niewielkie ilości manganu Mn, molibdenu Mo,

wanadu V i siarki S. Zaletą ich jest bardzo łatwa magnesowalność, dobra wykrawalność, wysoki współczynnik wypełnienia i relatywnie niska cena.

### ***Stopy żelazo-niklowe i żelazo-kobaltowe***

Ze stopów żelaza z niklem wytwarza się taśmy o grubości 0,05...0,35 mm na rdzenie magnetyczne pracujące przy wyższych częstotliwościach. Materiały te zawierają 30...80 % niklu. Cechują się łatwiejszą magnesowalnością i przenikalnością magnetyczną, ale mniejszą indukcją nasycenia w porównaniu do stali krzemowej. Przy zawartości 78 % Ni mają szczególnie wąską pętlę histerezy i bardzo duże wartości  $\mu_p$  i  $\mu_{rm}$ . Stopy o tym składzie są bardzo drogie. Stosuje się je na rdzenie dokładnych przekładników prądowych.

Bardzo drogie są także stopy żelazo-kobaltowe o zawartości 30...40 % Co. Ich zaletą jest duża wartość indukcji nasycenia a wadą większe straty i mniejsza przenikalność magnetyczna, a także duża kruchość. Stosowane są na specjalne rdzenie w przyrządach elektrycznych lotniczych i kosmicznych.

Bardzo trudnym w produkcji jest stop amorficzny (niekryształiczny) składający się z żelaza, kobaltu i niklu z dodatkiem boru, krzemu i węgla. Ciekły stop schładza się z prędkością większą niż prędkość krystalizacji (około  $10^6$  K na sekundę). W porównaniu do blach krzemowych orientowanych stop ten ma około 3-krotnie mniejszą stratność i o około 25 % mniejszą indukcję nasycenia.

### **4.3.3. Materiały magnetycznie miękkie niemetaliczne**

#### ***Magnetodielektryki***

Magnetycznie miękkie magnetodielektryki wytwarza się z proszków ferromagnetyków metalicznych i materiału elektroizolacyjnego, najczęściej żywicy termoutwardzalnej. Jako ferromagnetyka używa się m.in.: czyste żelazo, stopy żelazo-niklowe, żelazo karbonylkowe, stop żelazo-krzem-aluminium. Na powierzchni ziarenek sproszkowanego ferromagnetyka, o średnicach rzędu kilku mikrometrów, wytwarza się warstwę izolacyjną przez utlenianie powierzchniowe lub powlekanie lakierem. Następnie miesza się przygotowany w taki sposób proszek z żywicą, formuje przez prasowanie elementy rdzeni i poddaje procesowi utwardzania.

Magnetodielektryki charakteryzują się dużą rezystywnością, małą stratnością i małą przenikalnością magnetyczną. Stosuje się je na rdzenie cewek pracujących w obwodach wielkiej częstotliwości (od 20 kHz do 10 MHz).

#### ***Ferryty magnetycznie miękkie***

Ferryty to materiały o własnościach ferrimagnetyków. Są mieszaniną co najmniej dwóch różnych tlenków, przy czym, zawsze jednym z nich jest tlenek

żelaza  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  zwany ferrytem. Ferryty mają własności właściwe dla ceramiki, są twarde, kruche i mają bardzo dużą rezystywność  $\rho = 10^2 \dots 10^6 \Omega\text{m}$ .

Ferryty magnetycznie miękkie dzielą się na ferryty proste i ferryty złożone. Ferryty proste zawierają obok  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  tylko jeden tlenek metalu. Może to być tlenek jednego z następujących metali dwuwartościowych: Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Cd. Wzory chemiczne przykładowych ferrytów prostych:  $\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  (lub  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ),  $\text{MnO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  (lub  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ),  $\text{FeO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$  (lub  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ). Pierwsze dwa to odpowiednio ferryt magnezowy i ferryt manganowy. Ostatni to tzw. magnetyt znany od czasów starożytnych, w którym spinowe momenty magnetyczne atomów Fe trójwartościowego pochodzących z  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  wzajemnie kompensują się, a o wartości momentów magnetycznych domen decydują momenty spinowe atomów Fe dwuwartościowego pochodzących z FeO.

Ferryty złożone są mieszaninami dwóch lub więcej ferrytów prostych. Najczęściej stosowane są ferryty niklowo-cynkowe:



gdzie współczynniki:  $i, j, k$  określają ilościowe proporcje składników.

Indukcja nasycenia ferrytów magnetycznie miękkich ma niewielkie wartości  $B_n = 0,2 \dots 0,6 \text{ T}$ . Ich względna przenikalność magnetyczna maksymalna też nie jest duża, dochodzi do  $\mu_{rm} = 6000$ . Natomiast natężenie powściągające ma małą wartość  $H_c \cong 1 \text{ A}\cdot\text{m}^{-1}$ .

Ferryty magnetycznie miękkie są stosowane na rdzenie: małych transformatorów, dławików, filtrów wielkiej częstotliwości, przełączników elektronicznych. Są stosowane także w telefonii i technice telewizyjnej.

#### 4.3.4. Materiały magnetycznie twarde metaliczne

##### *Stopy żelaza*

Najstarszym znanym materiałem magnetycznym twardym, stosowanym do wyrobu magnesów trwałych, jest zahartowana *stal węglowa*, zawierająca około 1 % węgla. Jest to materiał tani o nienajlepszych i mało stabilnych własnościach magnetycznych: natężenie powściągające  $H_c = 4,8 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ , pozostałość magnetyczna  $B_r = 0,86 \text{ T}$ , największa gęstość energii magnetycznej  $(B\cdot H)_{\text{max}} = 2 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ . Stal węglowa jest stosowana na magnesy trwałe o małych wymaganiach, szczególnie na magnesy o dużych wymiarach, a także na magnesy małych maszyn synchronicznych.

Nieco lepsze (o 10...20 %) własności magnetyczne ma znacznie droższa *stal wolframowa* o zawartości kilka procent wolframu. Stabilność tych własności jest znacznie lepsza w porównaniu ze stalą węglową. Stosuje się ją w maszynach elektrycznych, induktorach, licznikach indukcyjnych.

Znacznie lepsze, ze względu na cenę, własności magnetyczne i ich stabilność, są stopy żelaza z aluminium, niklem i kobaltem. Przykładowe parametry jednego z najlepszych stopów Fe-Al-Ni-Co przedstawiają się następująco:  $H_c = 62 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ ,  $B_r = 1,4 \text{ T}$ ,  $(B\cdot H)_{\text{max}} = 64 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ . Są to materiały twarde i kruche, stosowane na magnesy trwałe w przyrządach pomiarowych, przekazywach, maszynach elektrycznych, głośnikach.

Na ostateczne własności magnesu trwałego, obok procentowego składu materiału, ma wpływ sposób przeprowadzenia jego obróbki mechanicznej i termicznej. Na przykład poddanie rekrytalizacji (po uprzednim podgrzaniu do temperatury przekraczającej temperaturę Curie) stopów Fe-Al-Ni-Co w obecności zewnętrznego pola magnetycznego otrzymuje się strukturę w postaci wydłużonych ziaren o wzajemnie równoległych osiach krystalicznych. Uzyskany materiał jest anizotropowy i ma lepsze własności magnetyczne - większe wartości  $H_c$  i  $(B\cdot H)_{\text{max}}$ .

#### 4.3.5. Materiały magnetycznie twarde niemetaliczne

##### *Ferryty magnetycznie twarde*

Podobnie jak ferryty magnetycznie miękkie, ferryty magnetycznie twarde są materiałami tlenkowymi, ale o nieporównywalnie większych wartościach natężenia powściągającego  $H_c$ . Do wytwarzania magnesów trwałych stosuje się najczęściej *ferryt barowy*  $\text{BaO}\cdot 6\text{Fe}_2\text{O}_3$ , charakteryzujący się dobrymi stabilnymi własnościami magnetycznymi:  $H_c = 160 \text{ kA}\cdot\text{m}^{-1}$ ,  $B_r = 0,4 \text{ T}$ ,  $(B\cdot H)_{\text{max}} = 30 \text{ kJ}\cdot\text{m}^{-3}$ . Poza tym ferryt barowy ma dużą rezystywność  $\rho \cong 10^7 \Omega\text{m}$  oraz małą gęstość  $4,2\dots 5 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ .

Własności magnetyczne można polepszyć przez wytwarzanie magnesów ferrytowych anizotropowych. Uzyskuje się je przez prasowanie bardzo drobno zmielonych tlenków w polu magnetycznym i spiekanie. Ferryty magnetycznie twarde używa się do wytwarzania magnesów trwałych stosowanych w głośnikach, mikrosilnikach, sprzęgłach magnetycznych, w technice impulsowej i wielkiej częstotliwości.

## 5. MATERIAŁY PÓŁPRZEWODNIKOWE

### 5.1. Budowa i własności półprzewodników

#### 5.1.1. Wprowadzenie

Materiały półprzewodzące zajmują miejsce pomiędzy materiałami przewodzącymi i materiałami izolacyjnymi. Ich rezystywność zawiera się w granicach od  $10 \mu\Omega\text{m}$  do  $10 \text{M}\Omega\text{m}$  i bardzo silnie zależy od temperatury, natężenia pola elektrycznego i intensywności promieniowania. Do wytwarzania półprzewodników nadaje się tylko część materiałów półprzewodzących tych, których szerokość pasma zabronionego nie jest zbyt duża. Dla przykładu szerokość pasma zabronionego krzemu wynosi  $1,1 \text{ eV}$ , a germanu  $0,7 \text{ eV}$ .

Ze względu na zastosowane materiały, półprzewodniki dzielą się na:

- elementarne, o podstawowej strukturze zbudowanej z atomów jednego pierwiastka, krzemu Si lub germanu Ge;
- złożone, o strukturze zbudowanej z atomów dwóch, trzech pierwiastków lub ich tlenków tworzących półprzewodnikowe związki międzymetaliczne.

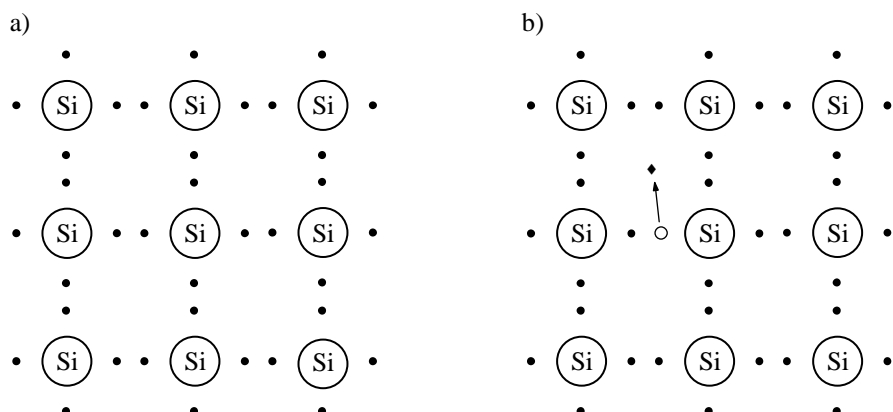
Półprzewodniki elementarne są stosowane do wytwarzania różnego rodzaju diod, tranzystorów i ich kombinacji, jako elementów elektronicznych indywidualnych, albo jako elementów zintegrowanych w postaci tzw. układów scalonych. Natomiast półprzewodniki złożone stosuje się do wytwarzania przyrządów absorbujących światło lub ciepło (InSb, CdSe, PbTe, ZnSb), albo emitujących światło (GaAs, GaAsP, ZnS), a także do wytwarzania termistorów ( $\text{BaTiO}_3$ ,  $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), warystorów (SiC), hallotronów (InAs).

#### 5.1.2. Budowa półprzewodników

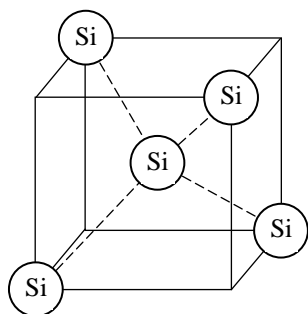
Półprzewodniki elementarne charakteryzują się regularną budową. Podstawowym rodzajem wiązań międzyatomowych w strukturach pierwiastków należących do IV grupy układu okresowego (C, **Si**, **Ge**, Pb) jest wiązanie kowalencyjne. Atom Si ma 4 elektrony walencyjne, dążąc do stabilnej konfiguracji (8 elektronów walencyjnych), udziela je z elektronami walencyjnymi czterech najbliższych sąsiednich atomów, rys. 5.1a.

Przestrzenny układ wybranego atomu centralnego i czterech najbliższych atomów sąsiednich pokazano na rys. 5.2. Środek atomu centralnego pokrywa się ze środkiem geometrycznym sześcianu, a środki atomów sąsiednich znajdują się w czterech spośród ośmiu jego wierzchołków. Układ taki zajmuje jedną

ósmą objętości komórki elementarnej sieci A4. Z tym, że w tej komórce znajdują się, rozmieszczone na przemian: cztery układy takie, jak opisywany, i cztery podobne układy, ale nie mające atomu centralnego.



Rys. 5.1. Obraz płaski wiązań kowalencyjnych w kryształach krzemu w stanie: a) nie wzbudzonym, b) wzbudzonym; • - elektron walencyjny związany, ♦ - elektron walencyjny swobodny, o - dziura

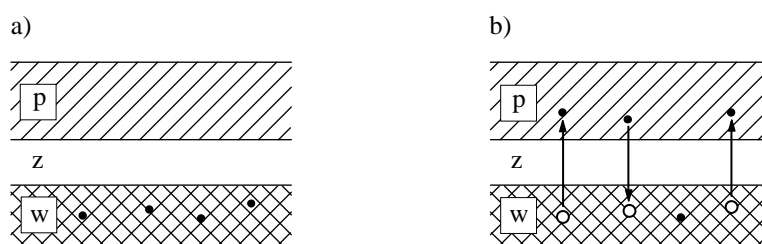


Rys. 5.2. Układ przestrzenny wybranego atomu centralnego i czterech najbliższych atomów sąsiednich w sieci krystalicznej Si

Obrazowi wiązań międzyatomowych z rys. 5.1a odpowiada model pasmowy półprzewodnika z rys. 5.3a. Dostarczając z zewnątrz odpowiedniej ilości energii do kryształu półprzewodnika, można uwolnić elektron z wiązania kowalencyjnego i przenieść go do pasma przewodnictwa, rysunki 5.1b i 5.3b. W temperaturze pokojowej, w jego objętości równej  $1 \text{ cm}^3$  znajduje się około  $10^{13}$  swobodnych elektronów wyrwanych z wiązań. Oznacza to, że przy liczbie atomów około  $10^{23}$  w  $1 \text{ cm}^3$  półprzewodnika zerwanie wiązania ma miejsce przy jednym atomie na  $10^{10}$  atomów. W miejscu, z którego został wyrwany elektron powstaje tzw. dziura, równoważna powstaniu w zerwanym węźle ładunku dodatniego, równego co do wartości bezwzględnej ładunkowi elektronu. Obok procesu wzbudzania, czyli powstawania par elektron-dziura,



zachodzi proces odwrotny, w którym elektrony z pasma przewodnictwa przechodzą do pasma walencyjnego neutralizując dziury, rys. 5.3b.



Rys. 5.3. Model pasmowy półprzewodnika: a) w stanie nie wzbudzonym, b) w stanie wzbudzonym; w, z, p - pasma odpowiednio: walencyjne, zabronione i przewodnictwa; • - przykładowe elektrony, o - przykładowe dziury

### 5.1.3. Przewodnictwo półprzewodników

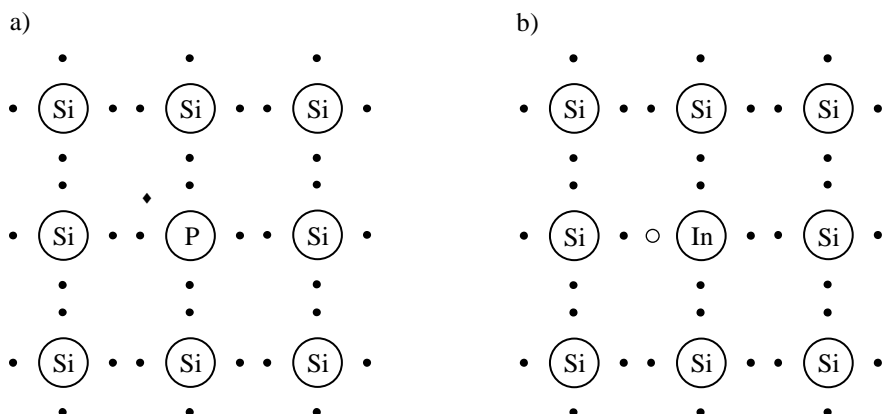
Przy obecności pola elektrycznego w półprzewodniku, wywołanego różnicą potencjałów między jego powierzchniami granicznymi, występuje przepływ elektronów w paśmie przewodnictwa w kierunku potencjału wyższego. Jest to tzw. prąd elektronowy. Występuje jednocześnie przepływ dziur w paśmie walencyjnym w kierunku potencjału niższego. Jest to tzw. prąd dziurowy. Ruch dziur jest ruchem pozornym (umownym) wywołanym przechodzeniem do nich elektronów z sąsiednich wiązań kowalencyjnych.

Przedstawione zjawiska wzbudzania półprzewodników i przepływu prądów występują w tzw. *półprzewodnikach samoistnych*, tzn. chemicznie czystych. Intensywność tych zjawisk jest niewielka i dlatego półprzewodniki samoistne mają ograniczone zastosowanie. Dla zwiększenia liczby swobodnych elektronów lub dziur poddaje się półprzewodniki samoistne domieszkowaniu. Uzyskuje się w ten sposób *półprzewodniki domieszkowe* stosowane powszechnie do wytwarzania elementów i przyrządów półprzewodnikowych.

W procesie domieszkowania można uzyskać znaczne zwiększenie liczby elektronów w paśmie przewodnictwa - półprzewodnik typu *n*, albo znaczne zwiększenie liczby dziur w paśmie walencyjnym - półprzewodnik typu *p*.

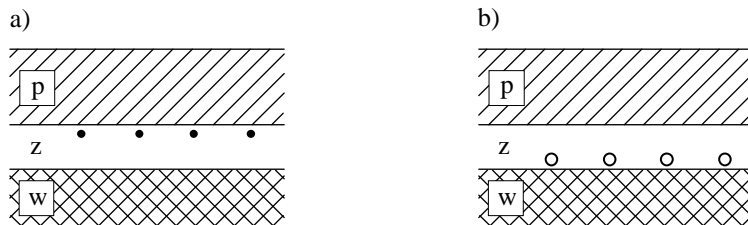
Wprowadzając do czystego krzemu lub germanu, mających 4 elektrony walencyjne, domieszkę donorową, tzn. domieszkę pierwiastka mającego 5 elektronów walencyjnych (fosfor, arsen, antymon, bizmut), otrzymuje się półprzewodnik typu *n*. Atomy domieszki zastępują w nielicznych (zwykle w 1 na  $10^6$ ) węzłach atomy macierzyste, wiążąc się z sąsiednimi atomami czterema swoimi elektronami walencyjnymi, rys. 5.4a. Poziom energetyczny piątego, niezwiązanego elektronu, jest nieco niższy od poziomu dolnej granicy pasma przewodnictwa materiału podstawowego (Si lub Ge), rys. 5.5a.

Przeniesienie do pasma przewodnictwa wolnego elektronu domieszki donorowej wymaga więc znacznie mniej energii (mniej niż 0,05 eV), niż przeniesienie elektronu z pasma walencyjnego.



Rys. 5.4. Obraz płaski wiązań kowalencyjnych w kryształe krzemu domieszkowanym: a) donorowo, b) akceptorowo; • - elektron walencyjny związany, ♦ - elektron walencyjny swobodny, o - dziura

Z przytoczonych wyżej liczb można oszacować, że koncentracja elektronów swobodnych pochodzących z domieszki jest rzędu  $10^{17}$  na  $\text{cm}^3$ , a koncentracja elektronów i dziur pochodzących z półprzewodnika samoistnego jest rzędu  $10^{13}$  na  $\text{cm}^3$ . Z tego wynika, że większościami nośnikami ładunku elektrycznego w półprzewodnikach typu  $n$  są elektrony. Inaczej mówiąc, półprzewodniki typu  $n$  charakteryzują się elektronowym charakterem przewodnictwa elektrycznego.



Rys. 5.5. Model pasmowy półprzewodnika nie wzbudzonego domieszkowanego: a) donorowo, b) akceptorowo; w, z, p - pasma odpowiednio: walencyjne, zabronione i przewodnictwa; • - elektrony donora, o - dziury akceptora

Wprowadzając do czystego krzemu lub germanu domieszkę akceptorową, tzn. domieszkę pierwiastka mającego 3 elektrony walencyjne

(bor, aluminium, gal, ind), otrzymuje się półprzewodnik typu *p*. Atomy domieszki wiążą się z sąsiednimi atomami trzema swoimi elektronami walencyjnymi, rys. 5.4b. Brakuje elektronu do uwspólnienia z jednym z sąsiednich atomów pierwiastka podstawowego. Powstaje w tym miejscu dziura, której poziom energetyczny jest nieco wyższy od poziomu górnej granicy pasma walencyjnego materiału podstawowego, rys. 5.5b. Przeniesienie do pasma walencyjnego dziury domieszki akceptorowej wymaga więc znacznie mniej energii (w granicach od 0,01 do 0,16 eV), niż uzyskanie dziury w tym paśmie przez przeniesienie elektronu do pasma przewodnictwa.

Koncentracja dziur pochodzących z domieszki akceptorowej jest rzędu  $10^4$  razy większa od koncentracji elektronów i dziur w półprzewodniku samoistnym. Tak więc, większościami nośnikami ładunku elektrycznego w półprzewodnikach typu *p* są dziury, innymi słowy, półprzewodniki te charakteryzują się dziurowym charakterem przewodnictwa elektrycznego.

Z jednorodnie domieszkowanych lub samoistnych półprzewodników wykonuje się elementy i przyrządy objętościowe, np. termistory, warystory, halotrony. Natomiast, elementy półprzewodnikowe aktywne (dioda, tranzystor, tyrystor) wykonuje się z półprzewodników, w których wytworzono wcześniej dwie sąsiadujące warstwy, jedna domieszkowana donorowo a druga akceptorowo. Te dwie warstwy tworzą złącze *p-n*, czyli cienką (około 1  $\mu\text{m}$ ) warstwę przejściową pomiędzy warstwami typu *n* i *p*. Najbardziej istotną cechą złącza *p-n* jest występowanie w nim warstwy zaporowej charakteryzującej się jednokierunkowym przewodnictwem elektrycznym.

## 5.2. Krzem jako materiał półprzewodnikowy

### 5.2.1. Własności krzemu

Krzem, Si (Silicium), jest pierwiastkiem częściowo metalicznym, o liczbie atomowej 14 i masie atomowej 28,086. W postaci krystalicznej jest szary, twardy i kruchy, topi się w temperaturze 1420 °C. Jako składnik skorupy ziemskiej (27 % masy) zajmuje drugie miejsce po tlenie i występuje w postaci związków, głównie glinokrzemianów, krzemianów i krzemionki  $\text{SiO}_2$ .

Materiałem półprzewodnikowym, z którego pierwotnie wytwarzano złącza *p-n* był german. Szybki rozwój technologii półprzewodników na bazie krzemu spowodowało, że obecnie ponad 90 % elementów i przyrządów półprzewodnikowych jest wytwarzanych z wykorzystaniem tego pierwiastka.

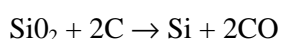
Krzem spełnia w znacznym stopniu wymagania stawiane materiałom półprzewodnikowym. Do najważniejszych wymagań, szczególnie istotnych w przypadku wytwarzania diod i tranzystorów, należą:

– mała szerokość pasma zabronionego,

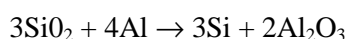
- łatwość wprowadzania domieszek,
- rezystywność po domieszkowaniu w zakresie  $10^{-5}$ ... $10 \Omega\text{m}$ ,
- energia wzbudzenia atomów domieszek w zakresie 0,01...0,05 eV,
- duża ruchliwość i długi czas życia nośników ładunku,
- możliwość uzyskania materiału wyjściowego o odpowiedniej czystości,
- niski koszt uzyskiwania struktury monokrystalicznej,
- trwałość chemiczna i dobre własności mechaniczne.

### 5.2.2. Otrzymywanie

Krzem uwalnia się z krzemionki przez jej redukcję węglem, aluminium lub magnezem. Redukcja węglem wymaga dostarczenia dużej ilości ciepła, dlatego przeprowadza się ją w piecach ogrzewanych łukiem elektrycznym, zachodzi wtedy reakcja:



Natomiast redukcja  $\text{SiO}_2$  aluminium jest reakcją egzotermiczną:



W wyniku tych dość tanich procesów metalurgicznych uzyskuje się krzem o czystości zaledwie około 98...99 %.

Otrzymywanie germanu jest bardziej złożone. Zawierają go rudy cynku w postaci siarczku w niewielkiej ilości (do 1 %). Przeprowadza się szereg reakcji, najpierw z siarczku Ge uzyskuje się chlorek a później dwutlenek germanu. W końcu  $\text{GeO}_2$  redukuje się wodorem uzyskując german.

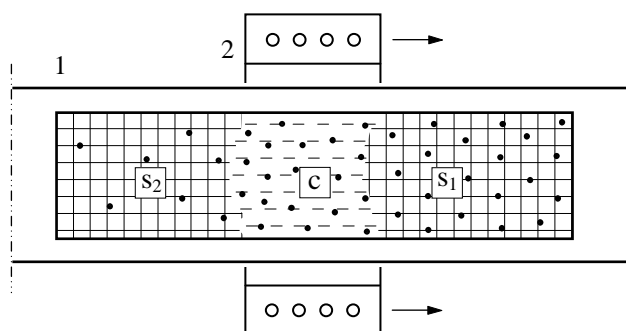
### 5.2.3. Oczyszczanie

W stosunku do materiałów półprzewodnikowych obowiązują bardzo wysokie wymagania dotyczące ich czystości. Właściwości tych materiałów przekładające się na parametry wykonywanych z nich elementów i przyrządów są bardzo czułe na nawet niewielkie zawartości zanieczyszczeń. Biorąc pod uwagę stosowane ilości domieszek celowych - donorowych lub akceptorowych, które najczęściej są rzędu jeden atom domieszki na  $10^6$ ... $10^7$  atomów półprzewodnika podstawowego, wymaga się, żeby zanieczyszczenia nie były większe niż 1 obcy atom na  $10^9$ ... $10^{11}$  atomów macierzystych półprzewodnika.

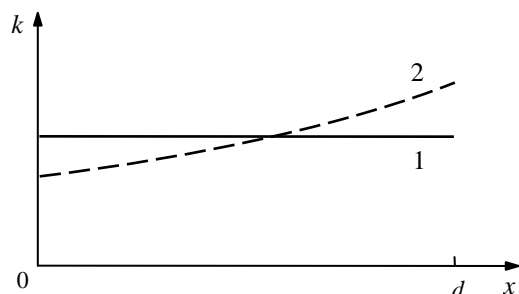
Krzem metalurgiczny oczyszcza się wstępnie metodami fizycznymi i chemicznymi. Właściwe oczyszczanie przeprowadza się stosując technologię topienia strefowego, która opiera się na tym, że rozpuszczalność zanieczyszczeń w krzemie jest większa w stanie ciekłym niż w stanie stałym. To samo dotyczy germanu z wyjątkiem zanieczyszczenia atomami boru.

Praktyczne wykorzystanie tej własności polega na kierunkowej krystalizacji materiału półprzewodnikowego, rys. 5.6. Kiedy granica fazy stałej i ciekłej przemieszcza się w kierunku fazy ciekłej, to ze względu na mniejszą rozpuszczalność w stanie stałym nie wszystkie cząstki zanieczyszczeń znajdujące się przed granicą krystalizacji ulokują się w sieci krystalicznej za tą granicą. Będą przez nią „wypychane” w kierunku fazy ciekłej.

Ze względu na to, że proporcja między stężeniami zanieczyszczeń w fazie stałej i w fazie ciekłej (właściwa dla danego materiału i zanieczyszczenia) jest stała, oraz że w miarę przesuwania się granicy krystalizacji stężenie zanieczyszczeń w fazie ciekłej zwiększa się, stężenie w fazie stałej (mniejsze niż w fazie ciekłej) będzie rosło zgodnie z kierunkiem krystalizacji. Tak więc, zanieczyszczenia są przesuwane z jednego końca próbki materiału na drugi, zgodnie z kierunkiem krystalizacji, rys. 5.7.



Rys. 5.6. Oczyszczanie materiału półprzewodnikowego metodą topienia strefowego: 1 - rura kwarcowa, 2 - nagrzewnica indukcyjna; strefy materiału:  $s_1$  - przed stopieniem,  $c$  - stopionego,  $s_2$  - po krystalizacji kierunkowej; • - cząstka zanieczyszczenia



Rys. 5.7. Rozkład stężenia zanieczyszczeń  $k$  wzdłuż wałka materiału półprzewodnika o długości  $d$ ; 1 - przed topieniem, 2 - po pierwszym topieniu (krystalizacji kierunkowej)

Techniczna realizacja tego procesu przedstawia się następująco, rys. 5.6. Materiał półprzewodnikowy w postaci wałka jest umieszczony w rurze grafitowej i razem z nią w rurze kwarcowej ( $\text{SiO}_2$ ). Między ściankami rury wewnętrznej i zewnętrznej jest przetłaczany gaz obojętny. Na rurze zewnętrznej jest umieszczona ruchoma cewka wytwarzająca pole magnetyczne o dużej częstotliwości (nagrzewnica indukcyjna). Prądy wirowe wytworzone przez pole magnetyczne powodują stopienie oczyszczanego materiału. W czasie powolnego przesuwania nagrzewnicy wzdłuż osi wałka, przesuwa się wraz z nią strefa ciekłego materiału. Kilkakrotne powtórzenie procesu topienia strefowego powoduje przesunięcie większości zanieczyszczeń do końca wałka. Jego początkowa część zawiera materiał o bardzo dużej czystości.

#### 5.2.4. Otrzymywanie monokryształów

Dominującym materiałem, z którego wytwarza się miniaturowe i małogabarytowe elementy i przyrządy półprzewodnikowe (diody, tranzystory, tyrystory, układy scalone), jest monokrystaliczny krzem i w niewielkiej ilości german. Polikrystaliczne materiały elementarne i złożone stosuje się zwykle do wytwarzania elementów półprzewodnikowych o dużej objętości (ogniwa termoelektryczne, warystory, termistory) oraz dużej powierzchni i małej grubości (ogniwa fotoelektryczne, fotorezystory). Materiał polikrystaliczny jest zbudowany z wzajemnie dowolnie zorientowanych ziaren krystalicznych o wymiarach zwykle od pojedynczych mikrometrów do milimetrów.

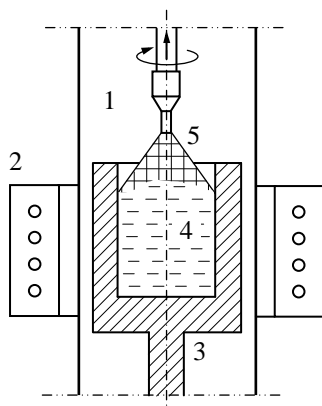
Monokrystalizacja jest to proces wzrostu kryształu począwszy od jednego zarodka. Uzyskany w taki sposób monokryształ cechuje się ciągłością i zachowaniem jednej orientacji sieci krystalicznej w całej objętości. Dopuszczalne są niewielkie ilości zanieczyszczeń (omówionych wyżej) oraz defektów punktowych i dyslokacji.

W zależności od możliwości i potrzeb stosuje się jedną z trzech metod monokrystalizacji:

- wzrost kryształu z półprzewodnika w stanie ciekłym (z fazy ciekłej),
- wzrost kryształu z mieszaniny ciekłego półprzewodnika i metalu,
- wzrost kryształu z półprzewodnika w stanie gazowym (z fazy gazowej).

Jedną z najczęściej stosowanych metod krystalizacji z ciekłego półprzewodnika jest metoda Czochralskiego. Polega ona na zetknięciu chłodnego pręta z powierzchnią roztopionego półprzewodnika, rys. 5.8, co powoduje utworzenie się zarodka krystalizacji. Monokryształ narasta od tego zarodka przy podnoszeniu pręta z prędkością równą prędkości krystalizacji. Narastający monokryształ wprawia się w wolny ruch obrotowy dla zapewnienia jednakowego gradientu temperatury na jego krawędzi (w pobliżu ścianek tygła), co jest warunkiem jego równomiernego wzrostu.

Przeciętne wartości gradientu temperatury na styku ciekły półprzewodnik - monokryształ mieszczą się w zakresie od 5 do 10 K·cm<sup>-1</sup>. Pozwala to uzyskać prędkość wzrostu kryształu rzędu kilku lub kilkunastu centymetrów na godzinę.



Rys. 5.8. Szkic fragmentu urządzenia do monokrystalizacji metodą Czochralskiego: 1 - komora próżniowa, 2 - nagrzewnica indukcyjna, 3 - tygiel, 4 - półprzewodnik ciekły, 5 - narastający monokryształ

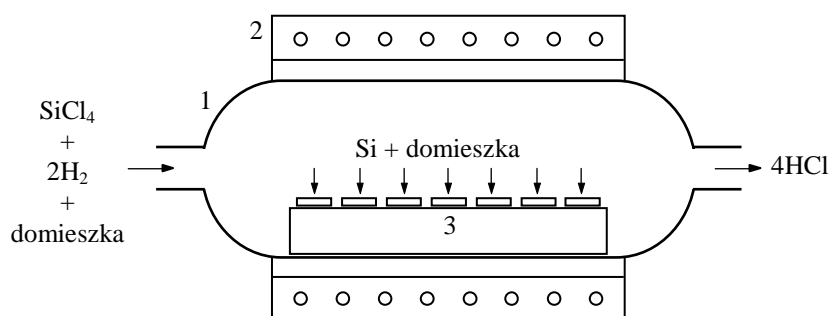
Przedstawiona metoda krystalizacji z fazy ciekłej ma wadę polegającą na wnikaniu cząstek tygla do ciekłego półprzewodnika i zanieczyszczeniu go. Sposobem na uniknięcie tego zanieczyszczenia jest monokrystalizacja metodą beztyglową. Wałek polikrystalicznego materiału półprzewodnikowego umocowuje się na obu końcach w pozycji pionowej. W jego górnym końcu jest wcześniej umieszczany zarodek krystalizacji. Całość umieszcza się w osłonie, przez którą przetacza się gaz obojętny. Za pomocą nagrzewnicy indukcyjnej topi się ciekłą warstwę materiału wałka prostopadłą do jego osi. Na tyle ciekłą, żeby stopiony materiał nie wypłynął na zewnątrz wałka. Topienie zaczyna się od zarodka i przesuwa w dół. Nad warstwą stopioną narasta monokryształ.

W technologii wzrostu kryształu z mieszaniny ciekłego półprzewodnika i metalu wykorzystuje się własność pewnych mieszanin materiałów półprzewodnikowych i metali, polegającą na tym, że taka mieszanina ma znacznie niższą temperaturę topnienia niż sam materiał półprzewodnikowy. Po zetknięciu ciekłej mieszaniny z zarodkiem następuje narastanie na nim monokrystalicznych warstw półprzewodnika.

Monokrystalizacja z mieszaniny ciekłego półprzewodnika i metalu ma dwie istotne zalety. Pozwala otrzymywać monokryształy w temperaturze dużo niższej od temperatury topnienia materiału półprzewodnikowego, a także umożliwia wytwarzanie warstw jednego półprzewodnika, tzw. warstw epitaksjalnych, na powierzchni drugiego półprzewodnika, zwanego podłożem. Podłoże, spełniające rolę zarodka krystalizacji, może być wykonane z tego samego materiału, co warstwa epitaksjalna lub innego o zbliżonej strukturze.

Inna stosowana technologia, to osadzanie monokrystalicznych warstw epitaksjalnych z materiału półprzewodnikowego w stanie gazowym lub

z mieszaniny gazowej zawierającej półprzewodnik. Metodę tę stosuje się często do osadzania na podłożu krzemowym atomów tego pierwiastka uwalnianych w wysokiej temperaturze ze związków chemicznych. Przykład takiego procesu przedstawiono na rys. 5.9. Zaletą tej technologii jest uzyskanie ostrej granicy między, różnie domieszkowanymi, podłożem i nową warstwą.



Rys. 5.9. Urządzenie do osadzania warstw epitaksjalnych: 1 - komora ze szkła kwarcowego, 2 - nagrzewnica, 3 - kasetta z płytkami krzemowymi

### 5.2.5. Domieszkowanie

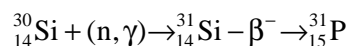
Do najczęściej stosowanych domieszek w półprzewodnikach krzemowych należy zaliczyć fosfor P - do otrzymywania warstw typu *n*, oraz bor B - do otrzymywania warstw typu *p*. Do obecnie stosowanych metod domieszkowania można zaliczyć:

- dodawanie domieszki w stanie ciekłym,
- metodę transmutacji,
- dyfuzję z fazy gazowej,
- metodę implantacji.

Zgodnie z pierwszą metodą, w pierwszym etapie wytwarzania złącz *p-n* domieszkuje się donorowo lub akceptorowo materiał półprzewodnikowy, dodając odpowiednią domieszkę do fazy ciekłej przed monokryształizacją. Metoda ta nie zapewnia wysokiej jednorodności rozmieszczenia atomów domieszki, wymaganej przy produkcji przyrządów półprzewodnikowych dużych mocy i wysokiego napięcia, a także układów scalonych.

Metoda transmutacji zapewnia bardzo dużą jednorodność rozmieszczenia domieszki w monokryształach półprzewodnika. Chcąc otrzymać materiał półprzewodnikowy typu *n* na bazie monokryształicznego krzemu, poddaje się go napromieniowaniu strumieniem neutronów w reaktorze jądrowym. Następuje przemiana jądrowa (transmutacja) pewnej, zależnej od czasu napromieniowania, liczby atomów izotopu krzemu o masie atomowej 30 w stabilny fosfor o masie atomowej 31. Reakcję tę można zapisać następująco:





W pierwszym etapie reakcji, na skutek „wbicia” dodatkowego neutronu (w obecności promieniowania  $\gamma$ ) w jądro atomu izotopu krzemu o masie 30, przekształca się on w nietrwały izotop Si o masie 31 i czasie połowicznego rozpadu 2,6 godziny. Po wypromieniowaniu elektronu (cząstka  $\beta^-$ ) z jądra tego izotopu, z jednego z jego neutronów pozostaje proton. Liczba protonów w jądrze zwiększa się do 15, czyli powstaje atom fosforu. Uzyskując odpowiednią liczbę wytworzonych w ten sposób atomów domieszki donorowej otrzymuje się półprzewodnik typu *n*.

Trzecią spośród wymienionych metod stosuje się do domieszkowania monokrystalicznych płytek w czasie seryjnej produkcji złącz *p-n*, na bazie których wytwarza się elementy półprzewodnikowe o niewygórowanych wymaganiach. Proces dyfuzji z fazy gazowej przeprowadza się w temperaturze ponad 1000°C, w której niektóre atomy Si opuszczają swoje węzły w sieci krystalicznej, pozostawiając miejsce dla lokujących się tam atomów domieszki.

Metodą domieszkowania płytek półprzewodnikowych na niewielką głębokość jest metoda implantacji. Polega ona na wprowadzaniu domieszki przez bombardowanie powierzchni płytek strumieniem jonów. Jest to metoda kosztowna, ale dokładna, gdyż umożliwia kontrolowanie gęstości i głębokości domieszkowania przez dobór koncentracji i energii strumienia jonów, i przez to jest stosowana do wytwarzania półprzewodników o wysokich wymaganiach.

Po domieszkowaniu metodami transmutacji i implantacji powstają defekty sieci krystalicznej półprzewodnika. Usuwa się je przez wygrzewanie materiału w temperaturze kilkuset stopni Celsjusza.

### 5.3. Wytwarzanie elementów półprzewodnikowych

#### 5.3.1. Elementy indywidualne i układy scalone

Złącza *p-n* potrzebne do produkcji indywidualnych elementów półprzewodnikowych wytwarza się zwykle na płytkach monokrystalicznego krzemu. Przykładowy prosty proces bazujący na płytce Si domieszkowanej donorowo (tzw. technologia dyfuzyjno-planarna) składa się z następujących etapów przedstawionych w skrócie:

- 1) Wytworzenie na powierzchni płytki warstewki izolacyjnej SiO<sub>2</sub> o grubości około 1 μm przez jej utlenienie w wysokiej temperaturze.
- 2) Nałożenie warstwy materiału światłoczułego na SiO<sub>2</sub>.
- 3) Nałożenie na warstwę światłoczułą maski zasłaniającej tylko elementarne powierzchnie, pod którymi mają być wytworzone złącza *p-n* w płytce Si.

- 4) Naświetlanie przez otwory w masce warstwy światłoczułej, prowadzące do jej polimeryzacji (utwardzenia).
- 5) Usunięcie warstwy światłoczułej nie spolimeryzowanej i usunięcie warstewki SiO<sub>2</sub> przez jej trawienie kwasem fluorowodorowym.
- 6) Wprowadzenie przez dyfuzję z fazy gazowej nadmiaru (w stosunku do istniejącej domieszki donorowej) domieszki akceptorowej do odsłoniętych warstw Si. Wytworzona cienka warstwa półprzewodnikowa typu *p* wraz ze znajdującą się pod nią warstwą typu *n* tworzy złącze *p-n*.
- 7) Naparowanie warstwy metalu na płytkę w celu wykonania połączeń od złącz *p-n*.
- 8) Usunięcie metalu z powierzchni płytki Si z wyjątkiem miejsc połączeń. Operację tą wykonuje się podobnie jak opisaną w punktach od 2) do 5) operację usuwania warstwy SiO<sub>2</sub>.
- 9) Podzielenie płytki (przez zarysowanie i łamanie) na pojedyncze złącza *p-n*.

Stosując opisaną wyżej technologię można wytwarzać na płytkach krzemowych nie tylko złącza *p-n*, czyli diody i tranzystory, ale także rezystory i kondensatory. W jednym procesie można więc wykonać układy elektroniczne realizujące różne funkcje i, co więcej, złożone kombinacje tych układów, znane pod nazwą układów scalonych.

Obecnie wytwarza się masowo układy scalone o niezwykle małych rozmiarach (poniżej 1 mm), coraz mniejszych w miarę rozwoju technologii. Na pojedynczych płytkach monokrystalicznego krzemu wytwarza się jednocześnie (w jednym procesie) tysiące jednakowych układów scalonych o wysokim stopniu złożoności.

### 5.3.2. Półprzewodniki polikrystaliczne

W grupie półprzewodników polikrystalicznych stosuje się zarówno materiały półprzewodnikowe elementarne jak i złożone. Z pierwszych wykonuje się przede wszystkim elementy półprzewodnikowe o dużej powierzchni, a z drugich - elementy o dużej objętości. Materiały polikrystaliczne są prostsze i tańsze w produkcji.

Przykładowa technologia ogniw fotoelektrycznych polega na wytwarzaniu drobnoziarnistych płytek krzemowych o grubości około 0,1 mm przez naparowanie Si na odpowiednie podłoże, od którego można go łatwo oddzielić. W celu polepszenia własności takiego materiału stosuje się jego przetapianie przez lokalne podgrzewanie wiązką laserową. Po ponownej krystalizacji wymiary ziaren są rzędu pojedynczych milimetrów.

## 6. MATERIAŁY IZOLACYJNE

### 6.1. Własności materiałów izolacyjnych

#### 6.1.1. Rezystywność dielektryków

Przyjmuje się, że materiały izolacyjne stosowane w układach izolacyjnych szeroko rozumianych urządzeń elektrycznych mają rezystywność większą od  $10^8 \Omega\text{m}$ , co w przypadku materiałów izolacyjnych stałych wiąże się z szerokością pasma zabronionego większą od 5 eV.

Rezystywność materiałów izolacyjnych określa się przy napięciu stałym. Prąd ustalony przy takim napięciu jest prądem przewodzenia, tworzą go cząstki obdarzone ładunkiem elektrycznym o znaku dodatnim i ujemnym, które mają swobodę poruszania się w dielektryku na całej drodze między elektrodami. Do wyznaczenia rezystywności przyjmuje się wartość ustaloną prądu lub, w przypadku długiego czasu ustalania, wartość quasi ustaloną.

#### *Rezystywność skrośna i powierzchniowa dielektryków stałych*

Jednostką rezystywności skrośnej dielektryka jest  $1 \Omega\text{m}$ . Do jej wyznaczenia potrzebna jest wartość napięcia przyłożonego do elektrod i wartość wymuszonego przez nie prądu, przepływającego wewnątrz dielektryka znajdującego się między elektrodami. Odwrotnością rezystywności skrośnej jest przewodność skrośna dielektryków, której jednostką jest  $1 \text{S}\cdot\text{m}^{-1}$

Nośnikami ładunku elektrycznego tworzącymi prąd przewodzenia w materiałach izolacyjnych stałych są przede wszystkim jony i w niewielkiej ilości elektrony. Wynika to ze znacznych różnic wartości energii potrzebnej do uwolnienia elektronu (ponad 5 eV) i energii potrzebnej do oswobodzenia jonu z wiązań z sąsiednimi cząstkami dielektryka (od 0,1 do 5 eV).

Źródłem energii potrzebnej do uwolnienia jonów może być duża wartość natężenia pola elektrycznego, wysoka temperatura dielektryka oraz promieniowanie zewnętrzne. Źródłem jonów są głównie zanieczyszczenia dielektryków, w tym zanieczyszczenia dysocjujące.

Zależność rezystancji dielektryka od jego temperatury jest odwrotna niż w przypadku metali. Wraz ze wzrostem temperatury rezystywność materiałów izolacyjnych maleje. Wyższa temperatura sprzyja oswobodzeniu jonów. Rezystywność jednego z lepszych materiałów izolacyjnych stałych, polietylenu, jest rzędu  $10^{16} \Omega\text{m}$ , a jednego z gorszych, bakelitu, jest rzędu  $10^{12} \Omega\text{m}$ .

W odróżnieniu od rezystywności skrośnej, jednostką rezystywności powierzchniowej jest  $1 \Omega$ . Do jej wyznaczenia potrzebna jest wartość napięcia przyłożonego do elektrod i wartość prądu płynącego po powierzchni dielektryka między elektrodami. Odwrotnością rezystywności powierzchniowej jest przewodność powierzchniowa dielektryków, której jednostką jest  $1 S$ .

W przypadku przewodności powierzchniowej nośnikami ładunku elektrycznego tworzącymi prąd przewodzenia są głównie jony powstałe na skutek dysocjacji związków chemicznych (zanieczyszczeń) w mikrowarstewce wody zaadsorbowanej na powierzchni dielektryka.

Z powyższego wynika, że rezystywność powierzchniowa zależy od własności dielektryka. Najmniejszą rezystywność mają dielektryki hydrofilowe (łatwo zwilżające się), które dodatkowo rozpuszczają się w wodzie. Należą do nich m.in. szkła. Rezystywność powierzchniowa szkła sodowego wynosi zaledwie około  $10^8 \Omega$ . Większą rezystywność powierzchniową mają dielektryki nierozpuszczalne w wodzie, np. żywica epoksydowa. Największą rezystywność powierzchniową mają dielektryki hydrofobowe, np. polietylen ( $10^{16} \Omega$ ).

### ***Rezystywność dielektryków ciekłych i gazowych***

Dielektryki ciekłe wykazują przewodność jonową elektrolityczną. Dysocjacja związków chemicznych (głównie pochodzących z zanieczyszczeń) następuje w zwykle śladowych ilościach rozpuszczalników (woda, alkohole) w cieczach izolacyjnych. Stąd, rezystywność dielektryków ciekłych zależy od stopnia ich czystości. Temperaturowy współczynnik rezystancji dielektryków ciekłych jest także ujemny. Wzrost temperatury ułatwia ruch jonów w cieczy. Rezystywność oleju izolacyjnego mineralnego jest rzędu  $10^{12} \Omega m$ .

Prąd przewodzenia w dielektrykach gazowych bazuje w zbliżonej mierze na jonach i elektronach. W przypadku powietrza atmosferycznego, w  $1 cm^3$  w normalnych warunkach ciśnienia (1013 hPa) i temperatury (293 K) jest  $2,77 \cdot 10^{19}$  cząstek, z których około 1000 to elektrony i jony.

Rezystywność powietrza wynosi w przybliżeniu  $10^{17} \Omega m$ . Wynika z tego, że wartość prądu płynącego w powietrzu między elektrodami o powierzchni  $100 cm^2$  oddalonymi od siebie o 1 cm, między które przyłożono napięcie 1 V, jest rzędu  $10^{-17} A$ . Rezystywność osiągalnej próżni jest rzędu  $10^{20} \Omega m$ .

### **6.1.2. Przenikalność elektryczna dielektryków**

#### ***Polaryzacja elektryczna***

W dielektryku, obok swobodnych jonów i elektronów tworzących prąd przewodzenia, znajdują się jony i elektrony mogące poruszać się tylko w ograniczonej przestrzeni, nie docierając do elektrod. Cząstki tworzące

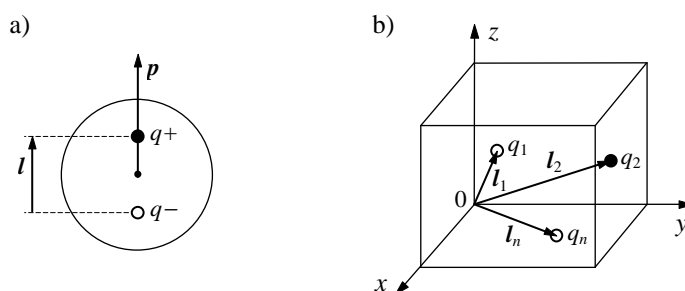
strukturę dielektryka mogą być elektrycznie obojętne, tzn. ładunki dodatnie (protonów) i ujemne (elektronów) kompensują się wzajemnie i cząstka nie jest źródłem pola elektrycznego. Mogą być także trwałymi dipolami elektrycznymi, tzn. środki ciężkości ładunków elektrycznych dodatnich i ujemnych nie pokrywają się ze sobą, cząstka ma dwa bieguny elektryczne, między którymi istnieje pole elektryczne. W obecności pola elektrycznego cząstki elektrycznie obojętne stają się dipolami indukowanymi.

Upraszczając elektryczny obraz dielektryka można powiedzieć, że znajdują się w nim ładunki swobodne mogące tworzyć prąd przewodzenia i ładunki związane, do których należą ładunki biegunów dipoli trwałych i indukowanych oraz ładunki jonów i elektronów, których ruch w dielektryku jest ograniczony. Ładunki związane podlegają działaniu pola elektrycznego. Zjawisko to nazywa się polaryzacją elektryczną dielektryka.

Wielkością charakteryzującą dipol elektryczny jest moment dipolowy. Zgodnie z rys. 6.1a, moment dipolowy cząstki materialnej jest wektorem leżącym na prostej przechodzącej przez środki ciężkości jej ładunku dodatniego i ujemnego. Jego początek znajduje się w połowie odległości między tymi środkami a zwrot jest zgodny z biegunem dodatnim. Moment dipolowy jest równy iloczynowi wielkości skalarnej, jaką jest wartość bezwzględna ładunku elektrycznego  $q$  dodatniego lub ujemnego i wektora  $l$  określającego odległość środków ciężkości tych ładunków:  $p = q \cdot l$

Wypadkowy moment dipolowy próbki dielektryka można wyznaczyć sumując momenty dipolowe względem jednego punktu, np. początku układu współrzędnych, rys. 6.1b, wszystkich ładunków związanych znajdujących się w tej próbce (z uwzględnieniem ich znaków):

$$p_w = \sum_{i=1}^n (q_i l_i) \quad (6.1)$$



Rys. 6.1. Schematyczne przedstawienie sposobu wyznaczania: a) momentu dipolowego cząstki materialnej, b) wypadkowego momentu dipolowego próbki dielektryka;  $p$  - moment dipolowy;  $l$  - wektor odstępu między ładunkami;  $q^+, q^-, q_1, q_2, q_n$  - wartości ładunków związanych dodatnich  $\bullet$  i ujemnych  $\circ$ ;  $l_1, l_2, l_n$  - wektory położenia ładunków w układzie  $x, y, z$

## Rodzaje (mechanizmy) polaryzacji

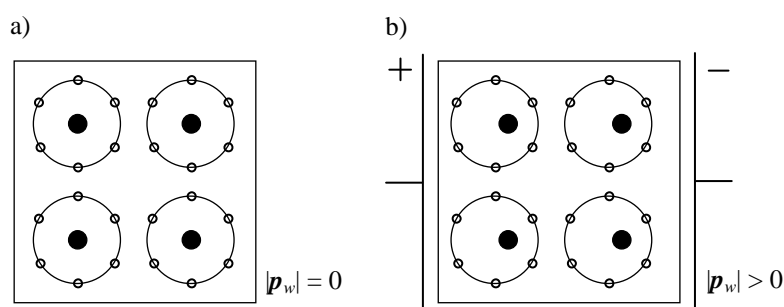
Rodzaje polaryzacji elektrycznej dielektryków wiążą się z rodzajem i własnościami cząstek, z których dielektryk jest zbudowany. Wyróżnia się cztery rodzaje (mechanizmy) polaryzacji materiałów izolacyjnych.

### Polaryzacja elektronowa

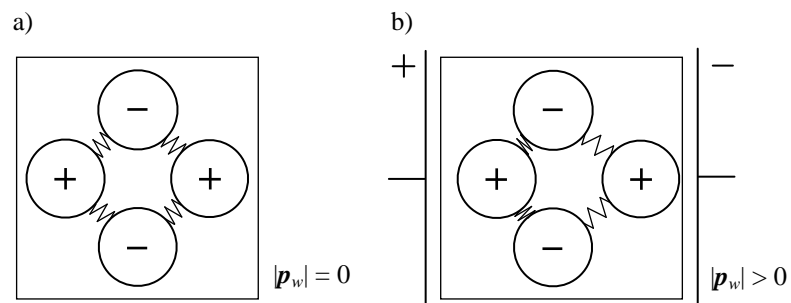
Ten rodzaj polaryzacji polega na wzajemnym przesunięciu elektronów i protonów pod wpływem pola elektrycznego, rys. 6.2. Jest to odkształcenie elastyczne i synchroniczne ze zmianami pola. W przypadku pola elektrycznego przemiennego własność ta jest zachowana w zakresie częstotliwości do około  $10^{15}$  Hz. Polaryzacja elektronowa jest *rezonansowa* i *bezstratna*.

### Polaryzacja atomowa (jonowa)

Mechanizm polaryzacji atomowej polega na wzajemnym przesunięciu jonów lub grup atomów w cząsteczce na skutek działania pola elektrycznego, rys. 6.3. Polaryzacja atomowa jest także polaryzacją *rezonansową* i *bezstratną*. Częstotliwość graniczna wynosi około  $10^{13}$  Hz.



Rys. 6.2. Mechanizm polaryzacji elektronowej: a) dielektryk z wybranymi atomami, b) dielektryk w polu elektrycznym; ● - jądro atomu, o - elektron

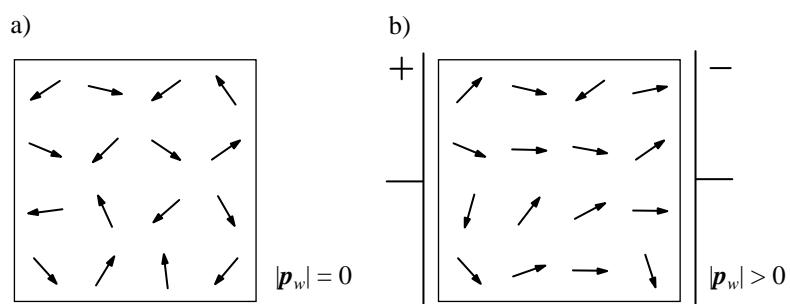


Rys. 6.3. Mechanizm polaryzacji atomowej: a) dielektryk reprezentowany przez jedną cząsteczkę, b) dielektryk w polu elektrycznym; - i + grupy atomów o przewodze ładunku ujemnego lub dodatniego

### Polaryzacja dipolowa

Ta polaryzacja występuje w dielektrykach zawierających trwałe dipole elektryczne, rys. 6.4. Polega na porządkowaniu orientacji dipoli w kierunku elektrody ujemnej. Obrót dipoli odbywa się z opóźnieniem, zużywana jest część energii tego pola elektrycznego. Z tych powodów polaryzacja dipolowa jest określana jako *relaksacyjna* i *stratna*.

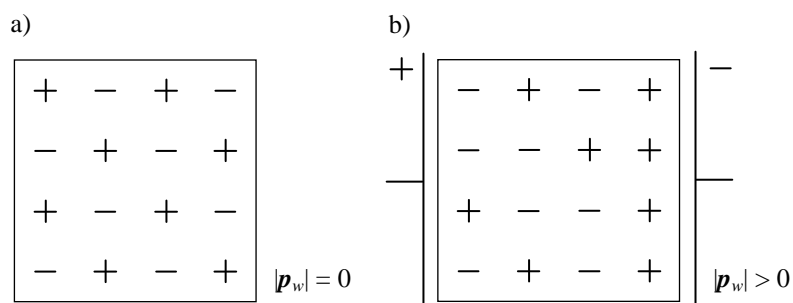
Czas relaksacji (czas uzyskania nowego położenia spoczynkowego dipoli) w typowych dielektrykach wynosi od  $10^{-10}$  do  $10^{-6}$  s. Trwałymi dipolami są zarówno cząsteczki dwuatomowe o wymiarach rzędu ułamka nanometra, jak i cząsteczki wieloatomowe (dielektryki organiczne) o wymiarach milimetrów.



Rys. 6.4. Mechanizm polaryzacji dipolowej: a) dielektryk z wybranymi dipolami elektrycznymi, b) dielektryk w polu elektrycznym

### Polaryzacja makroskopowa

Polaryzacja makroskopowa występuje w dielektrykach zawierających jony, rys. 6.5, które mogą przemieszczać się tylko na części drogi między elektrodami. Te przesunięcia odbywają się z opóźnieniem za zmianami pola elektrycznego i zużywają jego energię. Podobnie jak dipolowa, polaryzacja makroskopowa jest *relaksacyjna* i *stratna*.

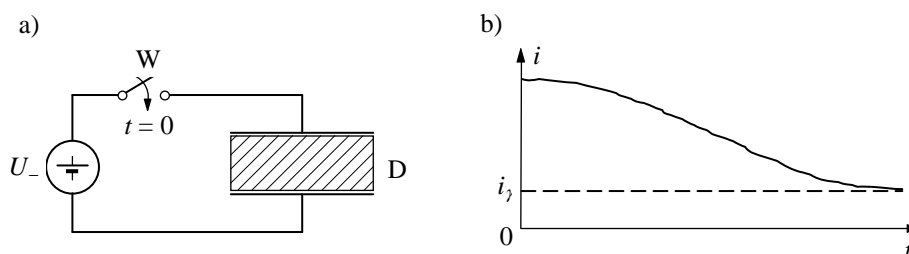


Rys. 6.5. Mechanizm polaryzacji makroskopowej: a) dielektryk z wybranymi jonami związanymi + i -, b) dielektryk w polu elektrycznym

Czas relaksacji (czas uzyskania nowego położenia spoczynkowego jonów) w stosowanych dielektrykach wynosi od  $10^{-2}$  s do wielu godzin. Tak duży zakres czasu relaksacji wiąże się z rodzajem i stanem dielektryka. Cechą odróżniającą ten rodzaj polaryzacji od pozostałych jest to, że przesunięcia jonów odbywają się w przestrzeni wielokrotnie większej od ich wymiarów.

### **Załączenie układu izolacyjnego pod napięcie stałe**

Bezpośrednio po załączeniu układu izolacyjnego pod napięcie, prąd płynący w obwodzie ma większą wartość, niż ustalony (po pewnym czasie) prąd przewodzenia dielektryka, rys. 6.6. Na różnicę tych prądów składają się trzy różne prądy: pojemnościowy prąd ładowania układu elektrod bez dielektryka, pojemnościowy prąd absorpcji związany z polaryzacją dielektryka oraz czynny prąd absorpcji związany ze stratami polaryzacyjnymi w dielektryku. Te trzy prądy tworzą tzw. prąd przesunięcia charakteryzujący się tym, że tworzące go elektrony nie przemieszczają się w sposób ciągły w zamkniętym obwodzie elektrycznym, rys. 6.6a, tak jak elektrony tworzące prąd przewodzenia  $i_\gamma$ , lecz przemieszczają się (są przesuwane) tylko między źródłem napięcia i elektrodami układu izolacyjnego.



Rys. 6.6. Załączenie układu izolacyjnego pod napięcie stałe: a) schemat obwodu elektrycznego, b) przebieg prądu w obwodzie;  $U_-$  - źródło napięcia stałego,  $W$  - wyłącznik,  $D$  - dielektryk,  $i_\gamma$  - prąd przewodzenia dielektryka

Przy napięciu stałym prąd przesunięcia zanika po upływie czasu relaksacji polaryzacji stratnych właściwych dla danego dielektryka, rys. 6.6b. Przy napięciu przemiennym prąd przesunięcia ma charakter ciągły. Jego składowa czynna jest w fazie z napięciem i prądem przewodzenia. Natomiast dwie pozostałe składowe wyprzedzają napięcie o kąt fazowy równy  $90^\circ$ .

### **Związek polaryzacji z przenikalnością elektryczną**

Na rysunku 6.7 oznaczono różnymi symbolami taką samą wartość ładunku jednostkowego dodatniego i ujemnego na elektrodach układu izolacyjnego oraz ładunku jednostkowego dipoli w dielektryku: kółka - ładunki

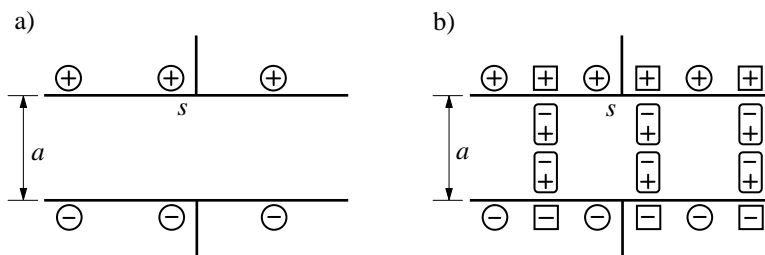


związane z pojemnością układu izolacyjnego bez dielektryka, kwadraty - ładunki związane z polaryzacją dielektryka, owale - ładunki dipoli elektrycznych w dielektryku.

W obydwoch przypadkach, rys. 6.7a i rys. 6.7b, napięcie stałe przyłożone do elektrod jest takie same i wynosi  $U_0$ . W przypadku układu izolacyjnego bez dielektryka, rys. 6.7a, ładunek zgromadzony na elektrodach jest równy  $Q_0$  (trzy jednostki ładunku). Pojemność tego układu wynosi:

$$C = C_0 = \epsilon_0 \frac{s}{a} = \frac{Q_0}{U_0} \quad (6.2)$$

gdzie  $\epsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$  – przenikalność elektryczna próżni.



Rys. 6.7. Ładunek „przesunięty” ze źródła napięcia na elektrody układu izolacyjnego: a) próżniowego, b) z dielektrykiem stałym;  $a$  - odstęp elektrod,  $s$  - powierzchnia elektrody

W przypadku układu izolacyjnego z dielektrykiem, rys. 6.7b, ładunek zgromadzony na elektrodach jest równy  $Q = Q_0 + Q_a$ . Dodatkowy ładunek  $Q_a$  (kwadraty) został przesunięty ze źródła napięcia po umieszczeniu dielektryka między elektrodami. Nastąpiła absorpcja tego ładunku dla zrównoważenia ładunku dipoli w dielektryku. Pojemność układu z rys. 6.7b wynosi:

$$C = \epsilon \frac{s}{a} = \frac{Q_0 + Q_a}{U_0} \quad (6.3)$$

gdzie  $\epsilon$  – przenikalność elektryczna dielektryka.

Przenikalność elektryczną dielektryków określa się często jak krotność przenikalności próżni, używając tzw. przenikalności względnej:  $\epsilon_r = \epsilon / \epsilon_0$ .

W przypadku przykładu przedstawionego na rys. 6.7:  $Q = 2Q_0$ ,  $C = 2C_0$ . Stąd  $\epsilon = 2\epsilon_0$ , czyli  $\epsilon_r = 2$ . Przenikalność elektryczna względna dielektryków ciekłych i stałych stosowanych w praktycznych układach izolacyjnych zawiera się najczęściej w zakresie od 2 do 8. Przenikalność względna dielektryków gazowych nie różni się praktycznie od przenikalności próżni.

### 6.1.3. Stratność elektryczna dielektryków

Stratność elektryczna jako własność materiałów izolacyjnych wiąże się ze zjawiskami zmiany energii pola elektrycznego na ciepło. Zjawiska te są niepożądane i szkodliwe ze względu na koszty traconej energii elektrycznej oraz na destrukcyjny wpływ wysokiej temperatury na dielektryki.

Występują dwa mechanizmy strat elektrycznych w dielektrykach. Jeden z nich to *straty polaryzacyjne* występujące tylko przy napięciu zmiennym. W układach izolacyjnych pracujących przy napięciu przemiennym, np. 50 Hz, straty polaryzacyjne stanowią około 90 % wszystkich strat. Pozostałe straty to *straty przewodnościowe*, występujące przy napięciu stałym i zmiennym.

Wielkością charakteryzującą stratność elektryczną dielektryków jest współczynnik  $tg\delta$ . Jest to tangens kąta przesunięcia fazowego między prądem całkowitym, płynącym w obwodzie połączonym z układem izolacyjnym, i składową pojemnościową tego prądu. Dla dielektryków tworzących (wraz z elektrodami) układy izolacyjne, moc bierna pojemnościowa  $Q_C$  jest mocą charakterystyczną, natomiast moc czynna  $P$  jest mocą traconą. Dla obliczenia tej ostatniej należy skorzystać z zależności:  $P = tg\delta \cdot Q_C$ . Stąd też współczynnik  $tg\delta$  jest współczynnikiem strat elektrycznych.

Współczynnik strat większości dielektryków stosowanych do budowy układów izolacyjnych zawiera się w zakresie od  $10^{-5}$  do  $10^{-2}$ . Odpowiada to wielkości kąta  $\delta$  znacznie poniżej jednego stopnia.

## 6.2. Podział materiałów izolacyjnych

### 6.2.1. Dielektryki gazowe

Dielektryki gazowe są stosowane w układach izolacyjnych wielu urządzeń elektrycznych. Zwykle wypełniają znaczną część przestrzeni między ich elementami przewodzącymi, ale, nie mogąc pełnić roli konstrukcyjnej, współpracują z elementami izolacyjnymi wykonanymi z materiałów stałych.

Stosowane dielektryki gazowe są jedno- lub wieloskładnikowe, charakteryzują się rezystywnością rzędu  $10^{17} \dots 10^{18} \Omega m$  i praktycznie pomijalną stratnością ( $tg\delta = 10^{-8} \dots 10^{-7}$ ). Ich przenikalność elektryczna różni się minimalnie od przenikalności próżni, np. przenikalność elektryczna względna powietrza atmosferycznego  $\epsilon_r = 1,00059$ .

Między dielektrykami gazowymi naturalnymi i dielektrykami syntetycznymi istnieją znaczne różnice wytrzymałości elektrycznej. Miarą wytrzymałości elektrycznej gazu jest napięcie przeskoku iskry  $U_p$  między równoległymi elektrodami płaskimi, między którymi odstęp wynosi 1 cm.

## 6.2.2. Dielektryki ciekłe

### *Oleje mineralne*

Oleje mineralne otrzymuje się z wybranych gatunków ropy naftowej. Pierwszym etapem produkcji jest destylacja frakcyjna ropy. Oleje mineralne stanowią frakcję charakteryzującą się liczbą atomów węgla w cząsteczkach węglowodorów zasadniczo od 8 do 12. Lżejsze frakcje to benzyna i nafta, a cięższe to oleje smarowe, wazelina i asfalty.

Drugi etap to rafinacja olejów z zastosowaniem reagentów, np.  $H_2SO_4$ , wiążących niepożądane składniki ropy. W trzecim etapie produkcji oleje są oczyszczane z reagentów i ze związków, które powstały w czasie rafinacji. Oczyszczanie polega na ługowaniu, przemywaniu wodą i filtrowaniu.

Oleje mineralne stosowane jako cieczy izolacyjne to mieszanina węglowodorów parafinowych, naftenowych i aromatycznych. Najlepsze oleje izolacyjne uzyskuje się z ropy naftenowej. Przykładowy skład mieszaniny węglowodorów: 45 % parafinowych, 50 % naftenowych i 5 % aromatycznych.

Wartości podstawowych parametrów elektrycznych olejów mineralnych zawierają się w granicach:  $\rho = 10^8 \dots 10^{12} \Omega m$ ;  $\epsilon_r = 2,1 \dots 2,5$ ;  $tg \delta = 0,001 \dots 0,01$ ;  $U_p = 100 \dots 150$  kV (elektrody płaskie w odległości 1 cm).

## 6.2.3. Dielektryki stałe nieorganiczne

### *Materiały stapiane (szkła)*

Podstawowy podział szkieł jest oparty na kryterium uwzględniającym skład chemiczny i temperaturę mięknięcia. W szklach wyróżnia się dwie podstawowe grupy składników: składniki szklotwórcze i składniki modyfikujące. Temperatura mięknięcia szkła zależy od tego, jakie składniki jednego i drugiego rodzaju zawiera i w jakiej ilości. Zgodnie z tym kryterium szkła dzieli się zwykle na sześć wymienionych niżej grup.

- 1) Szkło o bardzo niskiej temperaturze mięknięcia niższej od  $300^\circ C$ , np. szkło ołowiowo-borowe (90 %  $PbO$ , 10 %  $B_2O_3$ ), stosowane jako szkliwo wiążące.
- 2) Szkło miękkie ołowiowo-krzemowe, o temperaturze mięknięcia niższej od  $550^\circ C$ , stosowane na izolatory i części elektrycznych źródeł światła.
- 3) Szkło miękkie wapniowo-alkaliczne (70 %  $SiO_2$ , 16 %  $Na_2O$ , 6 %  $CaO$ ), na żarówki, świetlówki i klosze lamp, temperatura mięknięcia  $550 \dots 700^\circ C$ .
- 4) Szkło półtwarde borowo-krzemowe (20 %  $B_2O_3$ , 73 %  $SiO_2$ ), mięknie w temperaturze  $700 \dots 750^\circ C$ , na elementy urządzeń wielkiej częstotliwości.
- 5) Szkło twarde glinowo-borowo-krzemowe (20 %  $Al_2O_3$ , 9 %  $B_2O_3$ , 56 %  $SiO_2$ ), odporne na zmiany temperatury, temperatura mięknięcia  $750 \dots 950^\circ C$ .
- 6) Szkło kwarcowe (minimum 96 %  $SiO_2$ ) i kwarc topiony, mała stratność elektryczna i duża wytrzymałość, temperatura mięknięcia około  $1660^\circ C$ .

Ważnym, stosowanym w elektrotechnice rodzajem szkła jest włókno szklane, zawierające około 54 %  $\text{SiO}_2$  i mniej niż 0,8 % tlenków alkalicznych.

Szkła charakteryzują się znacznymi wartościami przenikalności elektrycznej, większymi od  $\epsilon_r = 3,9$ . Stratność szkieł dochodzi do  $\text{tg} \delta = 0,1$ . Najlepszy jest czysty kwarc, dla którego  $\text{tg} \delta = 0,0001$ . Rezystywność skrośna: od  $\rho_v = 10^8 \Omega\text{m}$  dla szkieł alkalicznych do  $\rho_v = 10^{18} \Omega\text{m}$  dla czystego kwarcu.

### ***Materiały wypalane (ceramika)***

Dielektryki ceramiczne stosowane w elektrotechnice to bogaty zbiór materiałów o różnorodnych własnościach. W podstawowym podziale wyróżnia się zwykle osiem przedstawionych niżej grup materiałów ceramicznych.

- 1) Porcelana elektrotechniczna jest materiałem izolacyjnym ceramicznym najbardziej znanym. Wytwarza się ją z kaolinu ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), krzemionki ( $\text{SiO}_2$ ) i skalenia ( $\text{K}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$ ). Z porcelany wytwarza się izolatory wysokiego i niskiego napięcia, osłony izolacyjne oraz elementy izolacyjno-konstrukcyjne aparatów i osprzętu niskiego napięcia.
- 2) Ceramika steatytowa ma większą rezystywność i mniejszą stratność oraz o około dwukrotnie większą wytrzymałość mechaniczną niż porcelana. Wytwarza się z niej izolatory o dużej wytrzymałości, elementy izolacyjne urządzeń próżniowych oraz urządzeń elektronicznych.
- 3) Ceramika kondensatorowa cechuje się dużą wartością przenikalności elektrycznej wynikającej głównie z udziału w jej składzie rutyli ( $\text{TiO}_2$ ). W skład jednej z dwóch grup tej ceramiki wchodzi dielektryki o przenikalności elektrycznej względnej  $\epsilon_r = 10 \dots 160$ , zależnej liniowo od temperatury. W skład drugiej grupy ceramiki kondensatorowej zalicza się dielektryki nieliniowe, zwane ferroelektrykami.
- 4) Ceramika kordierytowa i celsjanowa jest stosowana na elementy łukoo- i żaroodporne (kordieryt) oraz na elementy urządzeń wielkiej częstotliwości (celsjan). Kordieryt ( $2\text{MgO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{SiO}_2$ ) ma mały współczynnik rozszerzalności cieplnej i jest odporny na nagłe zmiany temperatury. Celsjan ( $\text{BaCO}_3 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) ma niewielką stratnością ( $\text{tg} \delta = 0,0006$ , przy 1 MHz).
- 5) Ceramika porowata jest stosowana do wytwarzania elementów izolacyjno-konstrukcyjnych pieców elektrycznych i sprzętu grzejnego. Może pracować w temperaturach dochodzących do  $1000 \dots 1350^\circ\text{C}$ .
- 6) Ceramika alundowa zawiera  $90 \dots 98\%$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  i ma dużą wytrzymałość mechaniczną w podwyższonych temperaturach i dużą przewodność cieplną. Wykonuje się z niej elementy izolacyjno-konstrukcyjne aparaty elektronicznej, a także osłony termoelementów i korpusy rezystorów.
- 7) Ceramika korundowa składa się prawie wyłącznie z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (powyżej 98 %). Stosuje się ją na elementy izolacyjne w przyrządach półprzewodnikowych

i układach elektronicznych scalonych hybrydowych wykonywanych technologią grubowarstwową.

- 8) Ceramika tlenkowa to grupa drogich materiałów stosowanych na elementy konstrukcyjno-izolacyjne specjalnych urządzeń elektronicznych (lampy elektronowe, urządzenia próżniowe). W skład tej grupy wchodzi tlenki BeO, MgO, ZrO<sub>2</sub>. Bardzo wysoką temperaturą pracy charakteryzuje się ceramika cyrkonowa, zawierająca tlenki ZrO<sub>2</sub> i SiO<sub>2</sub>.

### **Mika**

Mika to nieorganiczny materiał kopalny o strukturze warstwowej. Spośród wielu odmian tego minerału w elektrotechnice stosuje się mikę potasową, tzw. *muskowit*, o wzorze K<sub>2</sub>O·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·6SiO<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, oraz mikę magnezową, tzw. *flogopit*, o wzorze K<sub>2</sub>O·6MgO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·6SiO<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O. Lepszym dielektrykiem jest muskowit, jego własności elektryczne przedstawiają się następująco:  $\rho_v \cong 10^{14} \Omega\text{m}$ ,  $\epsilon_r \cong 7$ ,  $\text{tg } \delta \cong 0,0004$ .

Głównym materiałem do wytwarzania izolacji mikowej, tzw. *mikanitu*, jest mika łuszczona. Mikanit może mieć postać giętkich folii, albo twardych płyt, rurek lub tulei izolacyjnych, uzyskiwanych przez mieszanie drobnych płatków miki z żywicami, np. epoksydową, i formowanie. Folie mikowe, zawierające papier lub bibułę wzmacniające mechanicznie (taśma mikowa, mikafolia), stosuje się na izolację uzwojeń maszyn elektrycznych. Mikanit twardy stosuje się na różnego rodzaju podkładki i przekładki izolacyjne odporne na podwyższone temperatury, np. w komutatorach maszyn elektrycznych.

## **6.2.4. Dielektryki stałe organiczne**

### **Materiały łatwotopliwe**

Grupa materiałów łatwotopliwych składa się z trzech podgrup: żywic, asfaltów i wosków. Większość tych materiałów jest pochodzenia naturalnego. Pozostałe są zwykle otrzymywane przez modyfikację chemiczną materiałów naturalnych, rzadziej przez polimeryzację różnych związków organicznych. Temperatura mięknięcia materiałów należących do tej grupy zawiera się zwykle w zakresie od kilkudziesięciu do stu kilkudziesięciu stopni Celsjusza. Są to materiały hydrofobowe i w większości są plastyczne.

### **Materiały włókniste**

Materiały włókniste organiczne można podzielić na kilka grup:  
– materiały naturalne pochodzenia roślinnego (zawierające celulozę), wytwarzane głównie z drewna (bibułka, papiery, preszpany), a w mniejszym zakresie z bawełny, lnu, konopi i juty,

- materiały roślinne przetworzone chemicznie (dla polepszenia ich własności izolacyjnych),
- materiały naturalne pochodzenia zwierzęcego (jedwab naturalny, cechujący się dobrymi własnościami izolacyjnymi),
- materiały syntetyczne, najczęściej stosowane są włókna poliamidowe (nylon, stylon, kapron, perlon).

### ***Elastomery***

Elastomery są zbudowane z polimerów organicznych, których cząsteczki mają kształt spiralny lub zygzakowaty. Elastomery zwane są popularnie gumami. Materiałami wyjściowymi do produkcji gum izolacyjnych są różnego rodzaju kauczuki. Cząsteczki kauczuków mają podwójne wiązania międzyatomowe. Dzięki temu, w procesie chemicznym zwanym wulkanizacją jest możliwe utworzenie wiązań poprzecznych między sąsiednimi długimi cząsteczkami tych polimerów. W ten sposób powstaje przestrzenna sieć wiązań w całej próbce materiału. Guma składająca się ze spiralnych i zygzakowatych cząsteczek powiązanych poprzecznie charakteryzuje się dużą elastycznością.

### ***Termoplasty***

Termoplasty to materiały syntetyczne składające się z polimerów organicznych, których cząsteczki mają najczęściej kształt liniowy. Makrocząsteczki termoplastów są powiązane między sobą tylko słabymi wiązaniami międzycząsteczkowymi. Umożliwia to wielokrotne topienie oraz formowania nowych elementów izolacyjnych z tego materiału.

Termoplasty to najlepsze materiały izolacyjne. Rezystywność skośna i stratność elektryczna najlepszych termoplastów (polietylen, polipropylen) osiągają wartości:  $\rho_v = 10^{16} \Omega\text{m}$ ,  $\text{tg} \delta = 0,0001$ . Charakteryzują się niewielką przenikalnością elektryczną ( $\epsilon_r \cong 2,2 \dots 2,7$ ) oraz dużą wytrzymałością elektryczną dochodzącą dla cienkich warstw (około 0,1 mm) do  $1000 \text{ kV} \cdot \text{cm}^{-1}$ .

### ***Duroplasty***

Duroplasty to syntetyczne polimery organiczne. Wytwarzanie elementów izolacyjnych z tych tworzyw polega na ich formowaniu i utwardzaniu. Wytworzony element izolacyjny jest w całości usieciowany, jest jedną wielką cząsteczką. Podstawowe duroplasty izolacyjne to tworzywa: fenolowo-formaldehydowe, melaminowo-formaldehydowe, epoksydowe i silikonowe. Duroplasty mają gorsze własności elektryczne niż termoplasty, ale lepsze własności mechaniczne i cieplne. Ich rezystywność skośna, stratność i przenikalność elektryczna, zawierają się w granicach:  $\rho_v = 10^7 \dots 10^{14} \Omega\text{m}$ ,  $\text{tg} \delta = 0,001 \dots 0,01$  i  $\epsilon_r = 3,5 \dots 10$ ).

## 7. BADANIE REZYSTYWNOŚCI MATERIAŁÓW PRZEWODZĄCYCH

### 7.1. Wprowadzenie

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z wybraną metodą pomiaru rezystywności i temperaturowego współczynnika rezystancji (TWR) materiałów przewodzących w funkcji temperatury. Podczas ćwiczenia wykonuje się pomiary porównawcze na próbkach materiałów przewodzących: przewodowych (miedź, aluminium, stal miękka) i oporowych (manganin, kanthal).

W celu poprawnego przeprowadzenia pomiarów należy, przed przystąpieniem do ćwiczenia, zapoznać się z następującymi zagadnieniami:

- podstawowa charakterystyka i podział materiałów przewodzących,
- materiały przewodzące najczęściej wykorzystywane w elektrotechnice,
- parametry opisujące właściwości materiałów przewodzących.

Materiały przewodzące charakteryzują się przewodnictwem czysto elektronowym. Ich przewodność właściwą można wyrazić zależnością:

$$\gamma = n \cdot e \cdot k \quad (7.1)$$

gdzie:  $\gamma$  – przewodność właściwa (konduktywność),  $n$  – koncentracja elektronów w materiale [ $\text{m}^{-3}$ ],  $e$  – ładunek elektronu [C],  $k$  – ruchliwość elektronów w materiale [ $\text{m}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ ].

Wartość przewodności elektrycznej materiałów przewodzących zależy od kilku czynników:

- a) rodzaju materiału i jego budowy,
- b) czystości materiału, tzn. zawartości obcych domieszek,
- c) obróbki mechanicznej na zimno,
- d) temperatury.

We wzorze (7.1), w zależności od rodzaju materiału i jego budowy (a), obecności obcych domieszek (b), zmienia się koncentracja elektronów  $n$ . Natomiast na ruchliwość  $k$  elektronów w materiale mają wpływ: jego czystość (b), obróbka na zimno (c) oraz temperatura (d).

Odwrotnością konduktywności, wyrażanej w S/m, czyli przewodności przewodnika o jednostkowym przekroju  $S$  i jednostkowej długości  $l$ , jest rezystywność materiału  $\rho$  (oporowość właściwa). Jednostką rezystywności jest  $1 \Omega \cdot \text{m}$ . W praktyce używa się jednostki  $10^6$  razy mniejszej  $1 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ , dostosowanej do wymiaru przewodów. Obie wielkości można zapisać wzorami:

$$\gamma = \frac{l}{R \cdot S} \quad (7.2)$$

$$\rho = \frac{1}{\gamma} = \frac{R \cdot S}{l} \quad (7.3)$$

Temperaturowy współczynnik rezystancji (TWR)  $\alpha$  jest względną zmianą rezystancji materiału przewodzącego przy zmianie temperatury o 1 K.

$$\alpha = \frac{R - R_0}{R_0 \cdot (T - T_0)} \quad (7.4)$$

Siła termoelektryczna (STE) definiowana jest jako różnica potencjałów na styku dwóch różnych przewodników metalicznych, spowodowana różnicą temperatur złącza i wolnych końców tych przewodników. Wartość siły termoelektrycznej, w  $\mu\text{V}/\text{deg}$  lub w  $\mu\text{V}/\text{K}$ , materiałów podaje się zwykle w odniesieniu do platyny.

W tabeli 7.1 zestawiono orientacyjne wartości parametrów wybranych materiałów przewodzących, pomocne przy formułowaniu wniosków z badań przeprowadzonych w czasie ćwiczenia.

Tabela 7.1. Orientacyjne wartości parametrów wybranych materiałów przewodzących

Materiał	Skład	Ciężar właściwy $d$	Konduktywność $\gamma$	Rezystywność $\rho$	Temperaturowy współczynnik rezystancji $\alpha$
	%	$\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$	$\text{MS} \cdot \text{m}^{-1}$	$\mu\Omega\text{m}$	$\text{K}^{-1}$
Miedź Cu	99,99	$88,9 \cdot 10^3$	59,77	0,01675	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Aluminium Al	99,99	$27 \cdot 10^3$	38,2	0,0262	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Stal węglowa	do 1,7 % C	$78,5 \cdot 10^3$	7,00	0,143	$5,9 \cdot 10^{-3}$
Manganin	Cu 86, Mn 12 Ni 2	$84 \cdot 10^3$	2,17	0,46	$3 \cdot 10^{-5}$
Kanthal Al	Fe 68, Cr 24 Al 5,5, Co 1,5	-	0,689	1,45	$3,2 \cdot 10^{-5}$



## 7.2. Wykonanie pomiarów




W czasie ćwiczenia należy wyznaczyć rezystywność oraz wartość temperaturowego współczynnika rezystancji badanych próbek. Układ pomiarowy umożliwia wykonanie pomiarów rezystancji metodą techniczną, dokładnie mierzonego napięcia, przy zasilaniu prądem stałym. Rezystywność i współczynnik  $\alpha$  wyznacza się dla próbki materiału zamocowanej na statywie wewnątrz komory grzejnej. Pierwszy pomiar rezystancji próbki ( $R_0$ ) wykonuje się w temperaturze otoczenia ( $T_0$ ). Kolejne pomiary ( $R$ ) należy przeprowadzić w wyższych temperaturach ( $T$ ). Temperatura próbek jest wskazywana na wyświetlaczu regulatora RE-22.

Przedmiotem badania są następujące materiały: miedź, aluminium, stal miękka, manganin oraz kanthal. Próbkami są druty o przekroju okrągłym, których wymiary podano w tabeli 7.2.

Tabela 7.2. Długości i średnice próbek badanych materiałów

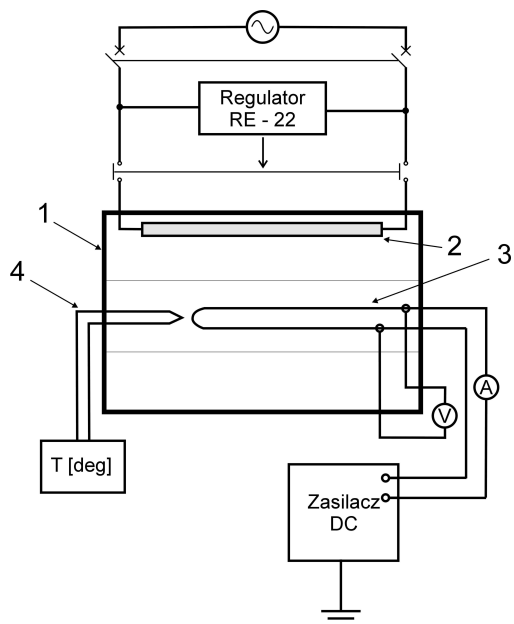
Nr próbki	Nazwa próbki	Długość $l$	Średnica $d$
		[m]	[m]
1	miedź	1	$1,085 \cdot 10^{-3}$
2	aluminium		$1,690 \cdot 10^{-3}$
3	stal miękka		$1,000 \cdot 10^{-3}$
4	manganin		$0,510 \cdot 10^{-3}$
5	kanthal		$0,465 \cdot 10^{-3}$

### *Kolejność czynności przy wykonywaniu pomiarów*

1. Włączyć zasilacz i ustawić na górnym wyświetlaczu wartość natężenia prądu podaną przez prowadzącego zajęcia.
2. Załączyć woltomierz i odczytać napięcie dla każdej z próbek. Próbki do badania wybiera się przełącznikiem wielopozycyjnym (co 2 skoki pokręćła) umieszczonym na panelu przednim suszarki.
3. Włączyć suszarkę i poczekać aż na regulatorze pokaże się wartość temperatury w komorze suszarki (temperatura pokojowa). Następnie należy ustawić zakres temperatury, do której komora będzie nagrzewana (maksymalnie 125,0 °C). Zakres temperatury ustawia się przez wciśnięcie i przytrzymanie przycisku  na regulatorze, aż do pojawienia się na regulatorze żądanej temperatury. Powrót do aktualnej temperatury nastąpi po jednoczesnym naciśnięciu przycisków  i  lub automatycznie po

upływie 30 sekund od ostatniego naciśnięcia przycisku. Po kilku sekundach włączy się stycznik sygnalizowany na regulatorze przez czerwoną kontrolkę oznaczoną „out”. Grzałki w suszarce zaczną pracować.

Pomiary należy przeprowadzać co 10 °C, od 30 °C do 130 °C, dla każdej próbki. Wartość napięcia należy mierzyć w sposób podany w punkcie 2.



Rys. 7.1. Schemat układu pomiarowego do badania rezystywności i TWR materiałów przewodzących w zależności od temperatury

- 1 - komora suszarki,
- 2 - grzałka,
- 3 - badana próbka,
- 4 - termopara



Rys. 7.2. Widok stanowiska pomiarowego

### **7.3. Opracowanie wyników badań**

Pomiary i obliczenia należy przeprowadzić dla określonych materiałów przewodzących. Sprawozdanie z ćwiczenia należy wykonać zgodnie z instrukcją korzystając z formularza.

Uwaga - do opracowania wyników pomiarów (obliczenia, wykresy) należy wykorzystać arkusz kalkulacyjny Excel.

#### **Literatura podstawowa**

1. Celiński Z.; Materiałoznawstwo elektrotechniczne. OWPW. Warszawa 2011.
2. Przybyłowicz K., Przybyłowicz J.; Materiałoznawstwo w pytaniach i odpowiedziach, WNT, Warszawa 2000.
3. Strykowski S.; Materiałoznawstwo elektryczne, Dział Wydawnictw Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1995.
4. Tymowicz M.; Praca magisterska: Badanie temperaturowego współczynnika rezystancji materiałów przewodzących, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2009.

## **8. BADANIE ŁUKOODPORNOŚCI MATERIAŁÓW IZOLACYJNYCH**

### **8.1. Wprowadzenie**

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z materiałami elektroizolacyjnymi stałymi pochodzenia organicznego oraz z metodą badania ich odporności na łuk elektryczny. Podczas ćwiczenia wykonywane są badania odporności materiałów izolacyjnych na łuk elektryczny o małym natężeniu prądu przy wysokim napięciu.

W celu prawidłowego wykonania badań należy, przed przystąpieniem do ćwiczenia, zapoznać się z następującymi zagadnieniami:

- podstawowa charakterystyka i podział materiałów elektroizolacyjnych,
- pochodzenie, sposoby wytwarzania i cechy materiałów izolacyjnych stałych pochodzenia organicznego,
- podstawowe pojęcia związane wytwarzaniem materiałów izolacyjnych (polimeryzacja, poliaddycja, polikondensacja, polimer, monomer, mer itp.),
- materiały elektroizolacyjne stałe pochodzenia organicznego najczęściej wykorzystywane w elektrotechnice,
- parametry opisujące właściwości materiałów elektroizolacyjnych stałych pochodzenia organicznego.

### **8.2. Identyfikacja próbek przygotowanych do badań**

Przeprowadzić identyfikację wybranych próbek na podstawie opisu umieszczonego w broszurce. Zwrócić uwagę na cechy fizykochemiczne próbek i sposoby ich wytwarzania (procesy polimeryzacji addycyjnej i kondensacyjnej) oraz związane z nimi możliwości zastosowania w elektrotechnice. Zapoznać się z opisem metody rozpoznawania tworzyw organicznych przez umieszczanie ich w płomieniu. Spostrzeżenia zanotować w formularzu sprawozdania.

#### **Zestawienie właściwości wybranych tworzyw termoplastycznych**

Na podstawie dostępnej literatury opracować zestawienie porównawcze właściwości następujących tworzyw:

- polichlorek winylu twardy: winidur,
- poliwęglan: makrolon, bistan,
- politetrafluoroetylen: tarflen, teflon.

Dokonać wyboru parametrów określających właściwości fizyczne, mechaniczne, elektryczne, cieplne i chemiczne oraz odszukać konkretne wartości liczbowe tych parametrów w dostępnej literaturze dla wymienionych wyżej materiałów. Opracować ich zestawienie porównawcze. Tabelę z wartościami liczbowymi wybranych parametrów oraz wnioski z zestawienia umieścić w formularzu sprawozdania.

### 8.3. Przeprowadzenie badań

Na podstawie norm (PN-EN 60212:2011, PN-EN 61621:2002) zapoznać się z metodą badania i wysokonapięciowym układem probierczym. W formularzu sprawozdania umieścić schemat układu pomiarowego oraz krótki opis metody badania. W opisie powinny znaleźć się odpowiedzi na pytania:

- co jest miarą odporności materiałów na łuk elektryczny?
- jakie materiały mogą być badane za pomocą takiego układu?
- przy jakim napięciu wykonuje się badania?
- jak zmienia się czas łukowy i natężenie prądu?
- jakie są efekty działania łuku elektrycznego na próbkę?
- co uważa się za wynik badania?

Badania należy przeprowadzić zgodnie z instrukcją dla wybranych zidentyfikowanych materiałów izolacyjnych stałych pochodzenia organicznego. (Uwaga: pojedynczą próbkę badać pięciokrotnie, a nie, jak wymaga norma, dziesięciokrotnie).

Zanotować spostrzeżenia z przebiegu ćwiczenia (jak zachowują się próbki podczas badania, w jaki sposób rozwija się niszczenie powierzchni, czy występują jakies efekty?).

Sprawozdanie z ćwiczenia należy wykonać zgodnie z instrukcją korzystając z formularza.

### Literatura podstawowa

1. Celiński Z., Materiałoznawstwo elektrotechniczne, OWPW, Warszawa 2011.
2. Kolbiński K., Słowikowski J.; Materiałoznawstwo elektryczne, WNT, Warszawa 1988.
3. Antoniewicz J.; Własności dielektryków (tablice i wykresy), WNT, Warszawa 1971.
4. PN-EN 60212:2011 Materiały elektroizolacyjne stałe, Przygotowanie i badanie próbek
5. PN-EN 61621:2002 Materiały elektroizolacyjne stałe suche, Odporność na wyładowania łukowe wysokonapięciowe, niskoprądowe

## 9. BADANIE STRATNOŚCI I PRZENIKALNOŚCI ELEKTRYCZNEJ DIELEKTRYKÓW

### 9.1. Wprowadzenie

Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z metodą pomiaru współczynnika strat i przenikalności elektrycznej względnej materiałów elektroizolacyjnych stałych, z wykorzystaniem wysokonapięciowego mostka Scheringa. Podczas ćwiczenia przeprowadzane są pomiary współczynnika strat i przenikalności elektrycznej kilku materiałów izolacyjnych ceramicznych i organicznych. Pomiary przeprowadza się w oparciu o polską normę PN-86/E-04403 Materiały elektroizolacyjne stałe. Metody pomiaru przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych.

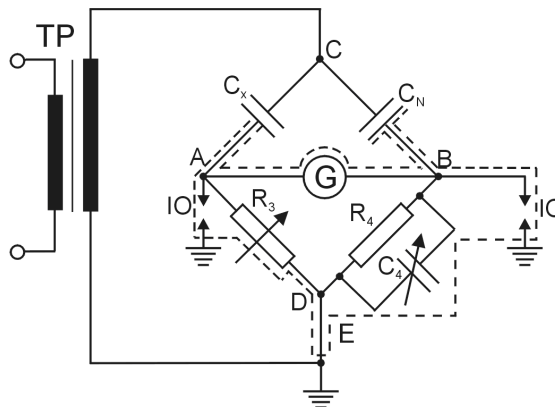
W celu właściwego wykonania pomiarów należy, przed przystąpieniem do ćwiczenia, zapoznać się z następującymi zagadnieniami:

- podstawowa charakterystyka i podział materiałów elektroizolacyjnych,
- materiały elektroizolacyjne stałe najczęściej stosowane w elektrotechnice,
- parametry opisujące właściwości materiałów elektroizolacyjnych stałych,
- metody mostkowe stosowane w badaniach właściwości dielektryków (przenikalność elektryczna  $\epsilon$ , współczynnik strat elektrycznych  $\text{tg}\delta$ ),
- warunek równowagi mostka Scheringa (równania w postaci zespolonej).

Do badania współczynnika strat elektrycznych i przenikalności elektrycznej w zakresie od 20 Hz do 1 MHz stosuje się metody mostkowe. Zgodnie z jedną z klasycznych metod mostkowych wykorzystuje się mostek Scheringa (rys. 9.1). W układzie mostka są dwie gałęzie wysokiego napięcia. Jedną z nich stanowi próbka badanego materiału, którą w schemacie zastępczym przedstawia się za pomocą szeregowego układu pojemności i rezystancji ( $C_x$ ,  $R_x$ ). Drugą wysokonapięciową gałęzią mostka jest bezstratny kondensator wzorcowy ( $C_N$ ). Jest to zwykle kondensator powietrzny lub próżniowy. Dla szeregowego układu zastępczego badanej próbki zależność na współczynnik strat elektrycznych wyraża się wzorem:

$$\text{tg}\delta = \omega R_x C_x \quad (9.1)$$

Dwie gałęzie niskonapięciowe mostka to: regulowany opornik  $R_3$  oraz układ równoległy opornika  $R_4$  i regulowanego kondensatora  $C_4$  o bardzo małych stratach. Prawie całe wysokie napięcie przypada na gałęzie  $C_x$  i  $C_N$ , natomiast na elementach  $R_3$ ,  $R_4$  i  $C_4$  występuje niskie napięcie względem ziemi.



Rys. 9.1. Podstawowy schemat układu mostka Scheringa

Warunek równowagi mostka Scheringa można zapisać następująco:

$$\underline{Z}_N \underline{Z}_3 = \underline{Z}_x \underline{Z}_4 \quad (9.2)$$

tzn. iloczyny impedancji ramion mostka leżących naprzeciw siebie powinny być sobie równe. Po podstawieniu odpowiednich impedancji otrzymujemy:

$$\frac{1}{j\omega C_N} R_3 = \left( R_x + \frac{1}{j\omega C_x} \right) \left( \frac{R_4}{1 + j\omega C_4 R_4} \right) \quad (9.3)$$

Po porównaniu ze sobą części rzeczywistych i urojonych otrzymujemy relacje:

$$R_x = R_3 \frac{C_4}{C_N} \quad (9.4)$$

oraz:

$$C_x = C_N \frac{R_4}{R_3} \quad (9.5)$$

Współczynnik strat próbki wynosi:

$$\operatorname{tg} \delta = \omega R_4 C_4 \quad (9.6)$$

Stan równowagi osiąga się przez regulację  $R_3$  oraz kondensatora  $C_4$ . Zwykle w mostkach wysokonapięciowych rezystancję  $R_4$  przyjmuje się równą  $1000/\pi$  i wówczas dla częstotliwości 50 Hz,  $\operatorname{tg} \delta$  jest równy liczbowo pojemności  $C_4$  wyrażonej w mikrofaradach.

Pomiary wykonane mostkiem Scheringa są obarczone uchybem powstającym wskutek istnienia pojemności pasożytniczych gałęzi mostka oraz sprzężeń magnetycznych poszczególnych gałęzi. Przez zastosowanie uziemionego ekranu na całej części niskonapięciowej mostka eliminuje się wpływ pojemności szkodliwych. Wpływ pojemności doziemnych można ograniczyć sprowadzając napięcie między gałęzią wskaźnika równowagi a ziemią do zera. Realizuje się to przez doprowadzenie odpowiedniego napięcia z możliwością regulacji jego modułu i fazy.

## 9.2. Przygotowanie do badań

### Zapoznanie się z układem probierczym

Zasady bezpiecznego posługiwania się układem probierczym:

- nie wolno wchodzić na pole probiercze przy włączonym napięciu zasilającym,
- nie wolno dokonywać żadnych zmian w połączeniach mostka,
- równoważenie mostka należy przeprowadzać ostrożnie, aby nie uszkodzić wskaźnika równowagi.

### Zapoznanie się z wymaganiami normy i instrukcją obsługi mostka

Należy przeczytać wybrane punkty z normy i instrukcji. Mostek prądu przemiennego P525 służy do pomiaru pojemności oraz  $\text{tg}\delta$  materiałów izolacyjnych (np. izolatorów, kondensatorów, itp.). Płytę czołową mostka Scheringa przedstawiono na rys. 9.2, a jego schemat na rys. 9.3.

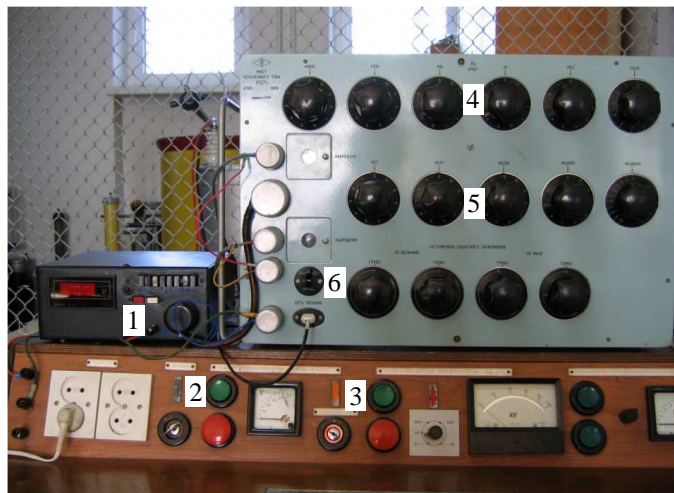
## 9.3. Wykonanie pomiarów i obliczeń

Pomiary i obliczenia należy przeprowadzić dla różnych materiałów elektroizolacyjnych stałych. Kolejność czynności:

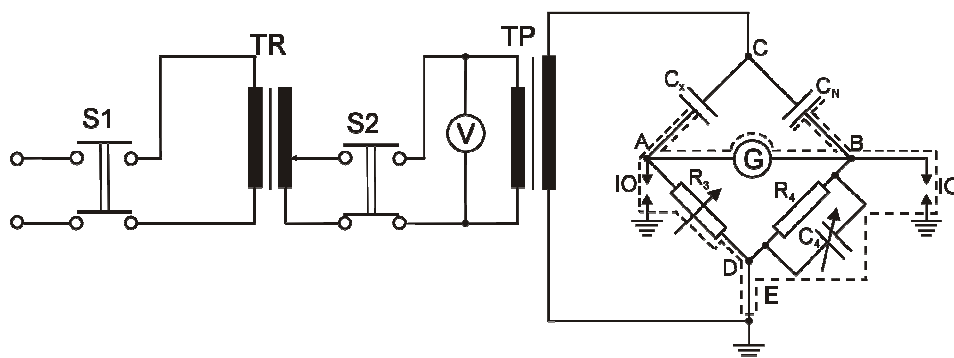
- na wskaźniku zera (1) ustawić jak najmniejszą czułość (stopnie od 0 do 7),
- załączyć układ wyłącznikami (2) i (3) - pojawia się napięcie około 2 kV,
- zwiększyć stopniowo czułość wskaźnika (do około 200 jednostek),
- zrównoważyć mostek regulując na przemian dekadami w gałęzi czynnej  $R_3$  (4) i biernej  $\text{tg}\delta$  (5), zaczynając regulację od największych wartości),
- po uzyskaniu na wskaźniku równowagi jak najmniejszej wartości (bliskiej zera), zwiększyć jego czułość i kontynuować równoważenie mostka przy użyciu dekad o coraz mniejszej wartości  $R_3$  i  $\text{tg}\delta$ , w miarę wzrostu czułości wskaźnika,



- w końcowym etapie równoważenia mostka przeprowadzić kompensację wpływu ekranów, tzn. napięcia doziemnego gałęzi wskaźnika równowagi mostka, przez przestawienie przełącznika (6) w dolną pozycję (ekrany),
- po skompensowaniu wpływu ekranów przestawić przełącznik w pozycję górną i przeprowadzić końcową kompensację mostka przy maksymalnej czułości wskaźnika równowagi,
- odczytać wartości  $R_3$  i  $\text{tg} \delta$  (obliczyć  $C_x$  i  $\text{tg} \delta$ , posługując się wzorami (9.5) oraz (9.6)).



Rys. 9.2. Płyta czołowa układu mostka Scheringa P525



Rys. 9.3. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia współczynnika strat elektrycznych  $\text{tg} \delta$  i pojemności  $C_x$  za pomocą mostka Scheringa

Na rys. 9.3 użyto następujących oznaczeń:

S1, S2 - styczniki,

TR, TP - transformator regulacyjny i transformator probierczy,

V - woltomierz elektromagnetyczny,

C<sub>x</sub> - badany obiekt,

C<sub>N</sub> - kondensator wzorcowy (powietrzny), 49,9 pF,

R<sub>3</sub> - regulowany rezystor dekadowy,

C<sub>4</sub> - kondensator dekadowy o regulowanej pojemności,

R<sub>4</sub> - rezystor stały, 3183 Ω,

IO - iskiernik ochronny.

Sprawozdanie z ćwiczenia należy wykonać zgodnie z instrukcją korzystając z formularza.

### **Literatura podstawowa**

1. Polska norma PN-86/E-04403 Materiały elektroizolacyjne stałe. Metody pomiaru przenikalności elektrycznej i współczynnika strat dielektrycznych.
2. Instrukcja obsługi wysokonapięciowego mostka Scheringa, typ P525.

## 10. BADANIE WŁASNOŚCI MATERIAŁÓW MAGNETYCZNIE MIĘKKICH

### 10.1. Wprowadzenie

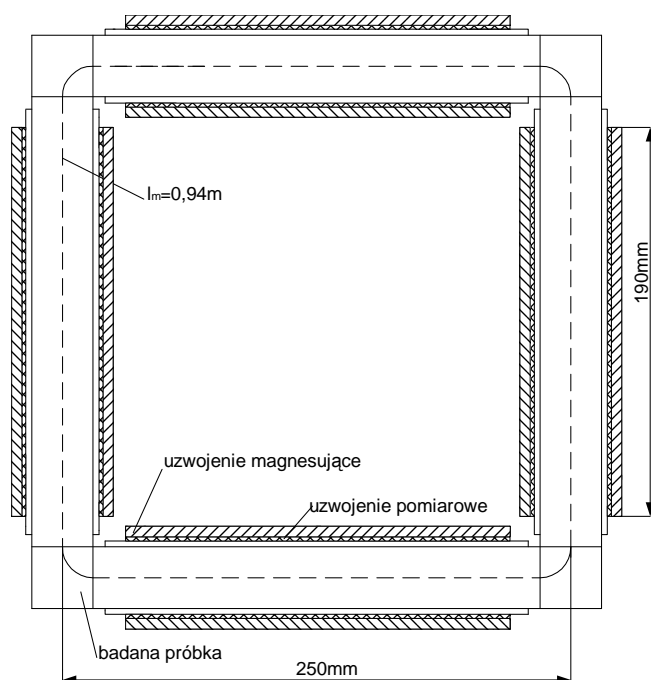
Celem ćwiczenia jest zapoznanie się z materiałami magnetycznie miękkimi oraz metodą badania ich stratności. Podczas ćwiczenia wykonywane są badania stratności blach transformatorowych za pomocą aparatu Epsteina.

W celu właściwego wykonania ćwiczenia należy, przed przystąpieniem do niego, zapoznać się z następującymi zagadnieniami:

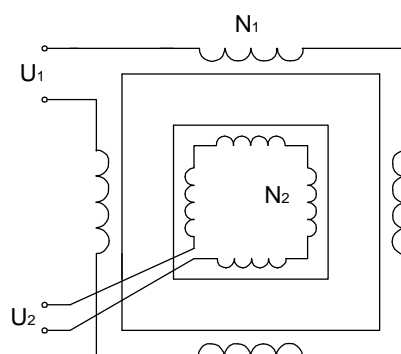
- podstawowa charakterystyka i podział materiałów magnetycznych,
- pochodzenie, sposób wytwarzania i właściwości materiałów magnetycznych,
- parametry opisujące pole magnetyczne (natężenie pola magnetycznego  $H$ , indukcja magnetyczna  $B$ , przenikalność magnetyczna  $\mu$ , histereza magnetyczna, straty w materiałach magnetycznych),
- sposób magnesowania i rozmagnesowania materiału magnetycznego (krzywa pierwotna magnesowania, pętla histerezy magnetycznej, indukcja nasycenia  $B_n$ , indukcja remanencji (pozostałość magnetyczna)  $B_r$ , natężenie koercji (natężenie powściągające)  $H_c$ , natężenie maksymalne  $H_m$ ).

Aparat Epsteina jest układem służącym do wyznaczania stratności blach transformatorowych i prądnicowych. Znormalizowane próbki tych blach stanowią rdzeń nieobciążonego transformatora (aparatu Epsteina). Aparat składa się z czterech jednakowych sekcji uzwojeń nawiniętych na płycie izolacyjnej (karkasie). Każda sekcja składa się z uzwojenia magnesującego (pierwotnego) i uzwojenia pomiarowego (wtórnego), rys. 10.1.

Każda sekcja zawiera po 175 zwojów z tym, że uzwojenie pomiarowe jest nawinięte w jednej warstwie drutem miedzianym o przekroju  $0,8 \text{ mm}^2$ . Natomiast uzwojenie magnesujące jest nawinięte w trzech warstwach bezpośrednio na uzwojeniu pomiarowym, dwoma równoległe połączonymi miedzianymi drutami o przekroju  $1,8 \text{ mm}^2$  każdy. Między uzwojeniami zastosowano ekran elektrostatyczny. Karkasy, na których nawinięte są cewki wykonane są z tekstolitu i mają prostokątny przekrój poprzeczny o wymiarach  $32 \times 10 \text{ mm}$ . Poszczególne sekcje uzwojeń, oddzielnie pierwotne i wtórne, połączone są szeregowo zgodnie z rys. 10.2. Całkowita liczba zwojów każdego uzwojenia (pierwotnego i wtórnego) wynosi 700. Rezystancja uzwojenia wtórnego wynosi  $R_2 = 2,1 \ \Omega$ , a pierwotnego  $R_1 = 0,7 \ \Omega$ . Uzwojenia ustawione są w czworobok na płycie izolacyjnej, ich osie tworzą kwadrat o boku  $25 \text{ cm}$ .



Rys. 10.1. Budowa aparatu Epsteina 25 cm



Rys. 10.2. Schemat połączeń uzwojeń aparatu

W skład aparatu Epsteina wchodzi także cewka kompensująca strumień rozproszenia. Jest ona umieszczona w środku okna utworzonego przez cztery sekcje aparatu, a jej oś jest prostopadła do płaszczyzny przechodzącej przez osie tych sekcji. Uzwojenie pierwotne cewki kompensującej ma 44 zwoje i wykonane jest drutem miedzianym o przekroju  $2,2 \text{ mm}^2$ , natomiast uzwojenie wtórne ma 275 zwojów i wykonane jest drutem o przekroju  $0,4 \text{ mm}^2$ . Cewka nawinięta jest na niemagnetycznym okrągłym rdzeniu o średnicy 55 mm.

Uzwojenie pierwotne tej cewki połączone jest szeregowo z uzwojeniem pierwotnym aparatu, uzwojenie wtórne połączone jest szeregowo przeciwsobnie z uzwojeniem wtórnym aparatu.

## 10.2. Przygotowanie do badań

Najczęściej stosowane materiały magnetycznie miękkie to:

- czyste odmiany żelaza,
- stale krzemowe (gorącowalcowana i zimnowalcowana),
- stopy żelazoniklowe,
- stopy żelazokobaltowe,
- magnetodielektryki i ferryty.

### Zapoznanie się z próbkami materiałów magnetycznie miękkich

W czasie pomiarów jako rdzeń transformatora będzie wykorzystywana jedna z trzech przygotowanych próbek. Należy zapoznać się z ich parametrami technicznymi.

**Próbka nr 1** - blacha krzemowa zimnowalcowana, symbol ET 41-27. Próbka składa się z 60 pasków o wymiarach  $280 \times 30$  mm, wyciętych z blachy zgodnie z kierunkiem jej walcowania. Średnia grubość jednego paska 0,27 mm.

Dane techniczne:

indukcja nasycenia  $B_{n1} = 1,89$  T,

masa całej próbki  $m_1 = 0,99$  kg,

gęstość materiału próbki  $\rho_{m1} = 7650$  kg/m<sup>3</sup>.

**Próbka nr 2** - blacha krzemowa zimnowalcowana. Próbka składa się z 48 pasków o wymiarach  $280 \times 30$  mm, wyciętych z blachy wzdłuż kierunku jej walcowania. Średnia grubość jednego paska 0,36 mm.

Dane techniczne:

indukcja nasycenia  $B_{n2} = 1,5...1,6$  T,

masa całej próbki  $m_2 = 1,08$  kg,

gęstość materiału próbki  $\rho_{m2} = 7673,6$  kg/m<sup>3</sup>.

**Próbka nr 3** - blacha krzemowa gorącowalcowana, już nie produkowana. Próbka składa się z 48 pasków o wymiarach  $280 \times 30$  mm, wyciętych z blachy zgodnie z kierunkiem jej walcowania. Średnia grubość paska 0,35 mm.

Dane techniczne:

indukcja nasycenia  $B_{n3} = 1,1...1,2$  T,

masa całej próbki  $m_3 = 1,00$  kg,

gęstość materiału próbki  $\rho_{m3} = 7358,8$  kg/m<sup>3</sup>.

## Przygotowanie do pomiarów

Dla wybranej próbki obliczyć:

– masę czynną  $m_a$  z zależności:

$$m_a = \frac{l_m}{4 \cdot l} \cdot m \quad (10.1)$$

gdzie:  $m$  - masa całkowita próbki,  $l$  - długość paska próbki,  $l_m$  - umowna efektywna droga strumienia magnetycznego ( $l_m = 0,94$  m).

– powierzchnię przekroju poprzecznego  $S_{Fe}$ :

$$S_{Fe} = \frac{m}{4 \cdot l \cdot \rho_m} \quad (10.2)$$

gdzie:  $\rho_m$  - gęstość materiału.

– średnie napięcie uzwojenia wtórnego  $\bar{U}_2$  dla maksymalnych wartości indukcji magnetycznej  $B_m = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1; 1,2; 1,4; 1,6; 1,8$  T, korzystając z zależności:

$$\bar{U}_2 = 4f \cdot N_2 \cdot S_{Fe} \cdot B_m \quad (10.3)$$

gdzie:  $f$  - częstotliwość,  $N_2$  - liczba zwojów uzwojenia wtórnego ( $N_2 = 700$ ),  $B_n$  - indukcja maksymalna (dla odpowiedniej próbki).

Dane do obliczeń:

$m_1 = 0,99$  kg,  $\rho_{m1} = 7650$  kg/m<sup>3</sup>;  $B_{n1} = 1,89$  T;

$m_2 = 1,08$  kg,  $\rho_{m2} = 7673,6$  kg/m<sup>3</sup>;  $B_{n2} = 1,5...1,6$  T;

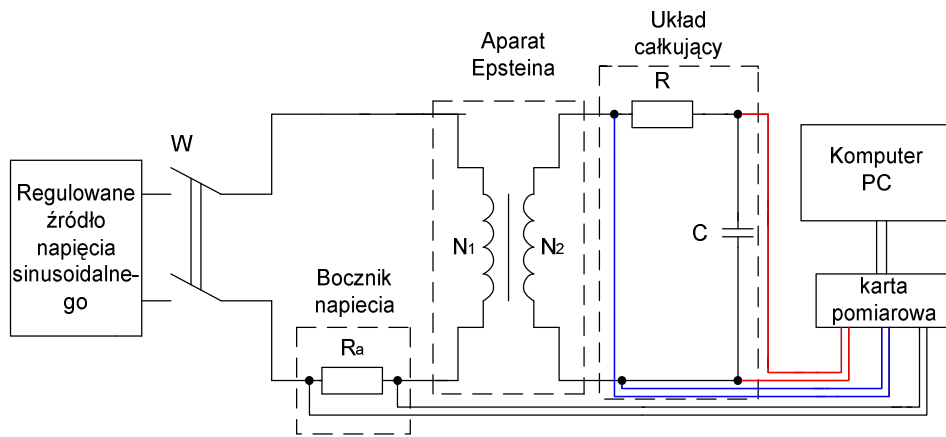
$m_3 = 1,00$  kg,  $\rho_{m3} = 7358,8$  kg/m<sup>3</sup>;  $B_{n3} = 1,1...1,2$  T;

$l = 0,28$  m.

## 10.3. Przeprowadzenie badań

Przed przystąpieniem do badań, próbkę należy rozmagnesować zmiennym polem magnetycznym. Polega to na zasileniu uzwojenia pierwotnego aparatu Epsteina prądem o wartości, przy której natężenie pola jest maksymalne i zmniejszaniu go aż do zera, rys. 10.3.

Dla obliczonych kolejnych wartości  $\bar{U}_2$  zaobserwować przebiegi prądu magnesującego, napięcia indukowanego oraz kształt pętli histerezy. Zapisać wyniki pomiarów dla indukcji równej indukcji nasycenia  $B_n$ . Z wykresów pętli histerezy odczytać: indukcję remanencji  $B_r$ , natężenie koercji  $H_c$ , indukcję nasycenia  $B_n$ , maksymalne natężenie pola magnetycznego  $H_m$ .



Rys. 10.3. Schemat układu do badania dynamicznych właściwości materiałów magnetycznych

## 10.4. Obliczenia

Należy obliczyć:

- maksymalne natężenie pola magnetycznego  $H_m$ , z zależności:

$$H_m = \frac{N_1 \cdot I_m}{l_m} \quad (10.4)$$

gdzie:  $I_m$  – maksymalny prąd magnesujący,  $l_m$  – umowna efektywna droga strumienia magnetycznego ( $l_m = 0,94$  m);

- maksymalną wartość indukcji  $B_m$ , (która dla maksymalnego natężenia pola równa jest indukcji nasycenia  $B_n$ ), z zależności:

$$B_m = \frac{\bar{U}_2}{4f \cdot N_2 \cdot S_{Fe}} \quad (10.5)$$

gdzie:  $\bar{U}_2$  - napięcie średnie strony wtórnej,  $f$  - częstotliwość;

- stratność magnetyczną  $\Delta p_{Fe}$  badanych próbek, z zależności:

$$\Delta p_{Fe} = \frac{P}{m_a} \quad (10.6)$$

gdzie:  $P$  – moc czynna,  $m_a$  – masa czynna;

- stratność pozorną  $S_s$  badanych próbek, z zależności:

$$S_s = S \cdot \frac{N_1}{N_2 \cdot m_a} \quad (10.7)$$

gdzie:  $N_1 = N_2 = 700$  - liczba uzwojeń strony pierwotnej i wtórnej aparatu Epsteina,  $m_a$  - masa czynna.

**UWAGA: Podczas pomiarów nie należy przekroczyć wartości skutecznej prądu magnesującego ponad 1 A!**

W przypadku przekroczenia obliczonej wartości napięcia, nie wolno go obniżać. Ustawione napięcie nie może być zmniejszane. Należy zanotować jego wartość i przeliczyć na odpowiadające mu natężenie pola magnetycznego.

Sprawozdanie z ćwiczenia należy wykonać zgodnie z instrukcją korzystając z formularza.

### Literatura podstawowa

1. Celiński Z., Materiałoznawstwo elektrotechniczne, OWPW, Warszawa 2011.
2. Nałęcz M. Jaworski J., Miernictwo magnetyczne, WNT, Warszawa 1968.
3. Kuryłowicz J., Badanie materiałów magnetycznych, WNT, Warszawa 1962.
4. Poradnik inżyniera elektryka, tom 1, WNT, Warszawa 1996.
5. PN-EN 60404-2:2003/A1:2008 Materiały magnetyczne, Część 2: Metody pomiaru własności magnetycznych stalowych blach i taśm elektrotechnicznych przy użyciu aparatu Epsteina.
6. <http://www.kwnae.ee.pw.edu.pl/labmat/mat06.pdf>, „Badanie własności materiałów ferromagnetycznych” Politechnika Warszawska 2006.

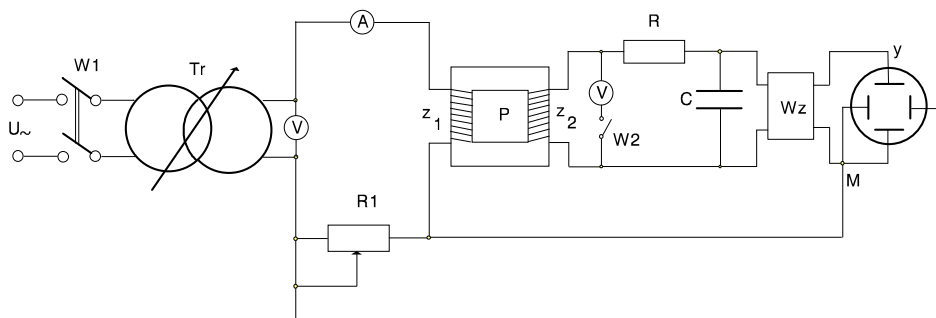
### Dodatek

#### Opis metody oscylograficznej, skalowanie oscyloskopu

Metoda oscylograficzna służy do zdejmowania dynamicznej pętli histerezy badanego materiału magnetycznego, stanowiącego rdzeń transformatora w odpowiednim układzie pomiarowym (rys. 10.4.).

Pętlę histerezy badanej próbki otrzymuje się na ekranie oscyloskopu, doprowadzając do jego płytek odchylenia poziomego napięcie proporcjonalne do natężenia pola magnetycznego, natomiast, do płytek odchylenia pionowego sygnał proporcjonalny do indukcji. Napięcie proporcjonalne do natężenia pola otrzymuje się z opornika połączonego z uzwojeniem magnesującym próbkę.





Rys. 10.4. Schemat układu do pomiaru pętli histerezy magnetycznej metodą oscylograficzną

Napięcie proporcjonalne do chwilowych wartości indukcji otrzymuje się podając przebieg siły elektromotorycznej uzwojenia wtórnego na układ całkujący RC. Obraz pętli histerezy magnetycznej powstaje więc dzięki pomiarowi odpowiadających sobie wartości chwilowych prądu magnesującego w cewce obejmującej próbkę oraz całki z napięcia na uzwojeniu pomiarowym próbki. Przed pomiarem należy wyskalować oscyloskop.

### Skalowanie osi B

W celu wyskalowania osi  $B$  (pionowej) należy zmierzyć napięcie na uzwojeniu pomiarowym badanych próbek i wyznaczyć wartość indukcji z zależności:

$$B_m = \frac{U_{sr}}{4f \cdot z_p \cdot S} \quad (10.8)$$

gdzie:  $U_{sr}$  - wartość średnia napięcia w [V],  $f$  - częstotliwość w [Hz],  $z_p$  - liczba zwojów uzwojenia pomiarowego,  $S$  - przekrój rdzenia próbki w [m<sup>2</sup>],  $B$  - indukcja w [T].

Pomiar wartości średniej napięcia wykonuje się miernikiem magnetoelektrycznym. Z uwagi na to, że mierniki te wyskalowane są w wartościach skutecznych przebiegu sinusoidalnego skalę wartości średniej określa się ze wzoru:

$$U_{sr} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot U \quad (10.9)$$

gdzie:  $U$  - wartość skuteczna napięcia.

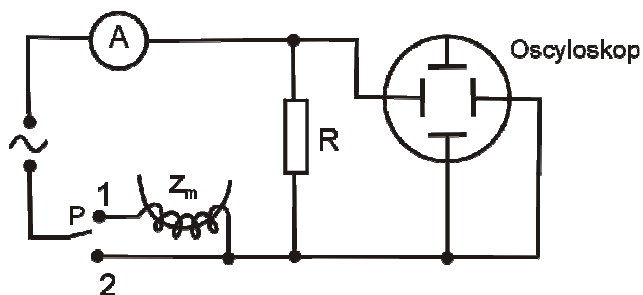
## Skalowanie osi H

W celu wyskalowania osi  $H$  (poziomej) należy zmierzyć wartość szczytową prądu magnesującego próbkę i na jej podstawie wyznaczyć natężenie pola magnetycznego w próbce:

$$H = \frac{z_m \cdot I_m}{l_{sr}} \quad (10.10)$$

gdzie:  $z_m$  - liczba zwojów uzwojenia magnesującego,  $I_m$  - szczytowa wartość prądu magnesującego,  $l_{sr}$  - średnia długość drogi magnetycznej.

Wartość szczytową prądu wyznacza się przez wyskalowanie oscyloskopu dla prądu o przebiegu sinusoidalnym, (rys. 10.5 - przełącznik P w położeniu 2).



Rys. 10.5. Schemat układu skalowania osi  $H$

Odchylenie plamki na ekranie oscyloskopu równe jest podwójnej amplitudzie prądu. Amperomierz wyskalowany jest w wartościach skutecznych, więc jego wskazania trzeba pomnożyć przez  $\sqrt{2}$ . Po ustawieniu przełącznika w pozycji 1 i takim wyregulowaniu prądu, aby odchylenie plamki było takie samo jak poprzednio, porównuje się wskazania amperomierza (w położeniu 1 -  $I_{\text{wskaz}}$  oraz  $I_m$  w położeniu 2). Potrzeba ustalenia takiej zależności wynika z odkształcenia prądu magnesującego i niemożności jego pomiaru za pomocą amperomierza o ustroju magnetoelektrycznym, służącym do pomiaru przebiegów sinusoidalnych (nieodkształconych). Postępując w ten sposób dla kilku wartości prądu wyznacza się charakterystykę  $I_m = f(I_{\text{wskaz}})$ .

## LITERATURA

1. Celiński Z., *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*. OWPW, Warszawa 2011.
2. Florkowska B., Furgał J., Szczerbiński M., Włodek R., Zydrón P., *Materiały elektrotechniczne. Podstawy teoretyczne i zastosowania*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2010.
3. Kolbiński K., Słowikowski J., *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*. Wyd. trzecie, WNT, Warszawa 1988.
4. Słowikowski J., Sobierajska E., Życki Z., Nowogórski P., *Materiałoznawstwo elektrotechniczne*, rozdział 5. Poradnika inżyniera elektryka, wyd. drugie, WNT, Warszawa 1994.
5. Tymowski J., *Materiały konstrukcyjne w budowie aparatury elektronicznej*. WNT, Warszawa 1978.
6. Stryzowski S., *Materiałoznawstwo elektryczne*. Wyd. Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 1993.
7. Garbarczyk J., *Wstęp do fizyki ciała stałego*. OWPW, Warszawa 2000.
8. Dereń J., Haber J., Pampuch R., *Chemia ciała stałego*. PWN, Warszawa 1997.
9. Szkoła F., Nitkiewicz Z., *Krystalografia geometryczna i zarys mineralogii*. Wyd. Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 1994.
10. Blicharski M., *Wstęp do inżynierii materiałowej*. Wydawnictwa AGH, Kraków 1995.
11. Domke W., *Vademecum materiałoznawstwa*. Wyd. drugie, WNT, Warszawa 1982.
12. Flisowski Z., *Technika wysokich napięć*. Wyd. piąte, WNT, Warszawa 2005.
13. Sulima T.: *Materiały i układy izolacyjne*. Wyd. Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1987.
14. Maksymiuk J., *Aparaty elektryczne*. Wyd. drugie, WNT, Warszawa 1995.
15. Markiewicz H., *Urządzenia elektroenergetyczne*. WNT, Warszawa 2001.
16. Wyderka S., *Urządzenia elektryczne*. Materiały pomocnicze, OWPRz, Rzeszów 2011.