



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

NAUKA O MATERIAŁACH

Wykład XII: Właściwości elektryczne

JERZY LIS
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki




Treść wykładu:

1. Wprowadzenie
2. Przewodnictwo elektryczne
 - a) wiadomości podstawowe
 - b) przewodniki
 - c) półprzewodniki
 - d) izolatory
3. Właściwości dielektryczne

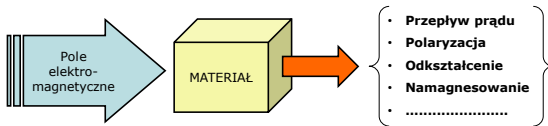


NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne




Wprowadzenie

Oddziaływanie pola magnetycznego na materiał



Przepływ prądu – izolatory, półprzewodniki, nadprzewodniki
Polaryzacja – kondensatory, układy hybrydowe
Odkształcenie – piezoelektryki
Namagnesowanie – ferryty
Własności fizyczne i chemiczne – sensory naprężenia, temperatury, stężenia

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

 **Przewodnictwo elektryczne**

Wiadomości wstępne - prawo Ohma

Prawo Ohma - ujęcie makroskopowe

$$U = I R$$

gdzie: U - napięcie; I - natężenie prądu; R - opór;


Oznaczając:
 l - długość przewodnika; S - pole przekroju, ρ - opór właściwy; σ - przewodność właściwa
 $R = \rho l / S = l / (\sigma S)$

stąd:
 $U = (I l) / (\sigma S)$ i $j = I / S$ gęstość strumienia prądu oraz
 $E = U / l$ natężenie pola elektrycznego
 mamy:

$$j = \sigma E$$

(II postać prawa Ohma)

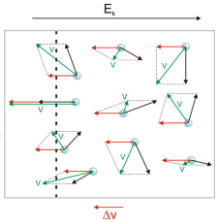
NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

 **Przewodnictwo elektryczne**


W ujęciu elementarnym strumień prądu to ruch ładunków prądu w polu elektrycznym

$j = \sum_i n_i e v z_i$

n_i - gęstość nośników
 e - elementarny ładunek
 v - średnia prędkość ruchu ładunków w kierunku pola
 z_i - liczba elementarnych ładunków (w jednostce objętości)



NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

 **Przewodnictwo elektryczne**

$$\sigma = \sum_i n_i e (v/E) z_i$$

$(v/E) = b$ ruchliwość ładunku w polu

Ostatecznie:

$$\sigma = \sum_i n_i e z_i b_i$$

Rozpatrując przewodność elektryczną materiału będziemy analizować rodzaj, ilość i ładunek nośników prądu oraz ich ruchliwość w polu elektrycznym.

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Przewodnictwo elektryczne

Rodzaje nośników prądu

elektrony swobodne (metale)

elektrony i dziury (półprzewodniki i izolatory)

jony (przewodniki jonowe)

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Przewodnictwo elektryczne

Przewodnictwo prądu wg. teorii pasmowej

Powstawanie kryształów wiąże się z rozszczeniem poziomów energetycznych orbitali na pasma (zachowanie reguły Pauliego)

1 atom 2 atom. N atom.

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne


AGH Przewodnictwo elektryczne

Przykłady struktur pasmowych

Energy bands for diamond versus lattice constant. Bart Van Zeghbroeck, Principles of Semiconductor Devices

Energy bands for metallic sodium. Richard Fieser, Electrons in Solids


NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne




Przewodnictwo elektryczne

Typy przewodnictwa materiałów

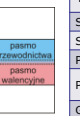
O typie przewodnictwa decyduje charakter struktury pasmowej i wielkość przerwy energetycznej (strefy energii wzbronione)



izolator




półprzewodnik



przewodnik

Półprzewodniki	E_g [eV]	Izolatory	E_g [eV]
Si	1,1	BaTiO ₃	2,5-3,2
SiC	2,8	Diament	5,6
PbS	0,35	Fe ₂ O ₃	3,1
PbTe	0,25 0,30	Si ₃ N ₄	4,0
Ge	0,67	KCl	9,5
InSb	0,17	AlN	4,3
CdSe	1,7	Al ₂ O ₃	10
GaAs	1,4	TiO ₂	3,0-3,8

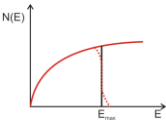
NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

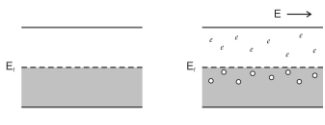


Przewodniki


Przewodniki metaliczne

W metalach elektrony z pasma podstawowego mogą łatwo przechodzić do pasma przewodnictwa.





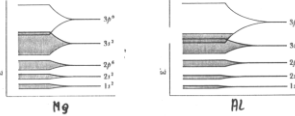
NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne



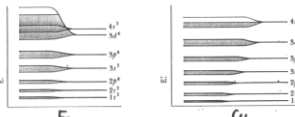
Przewodniki

Rodzaje metali i ich przewodnictwo elektryczne

- Grupa IA, Metale alkaliczne
- Grupa IIA, Metale ziem alkalicznych
- Grupa IIIA, Glin i inne
- Metale grup przejściowych
- Miedź i metale szlachetne



Hg Pb



Fe Cu

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Przewodniki

Czynniki obniżające przewodnictwo elektryczne metali

Uporzędkowanie

Domieszki

Temperatura
 $\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T)$

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Półprzewodniki

Półprzewodniki samoistne

Kryształy o strukturze diamentu, sfalerytu i wurcytu

Struktura diamentu: Si ($E_g = 1.1 \text{ eV}$); Ge ($E_g = 0.67 \text{ eV}$)
 Struktura sfalerytu: $A^{III}B^V$ (GaAs, GaP, PbTe)
 (Struktura wurcytu: SiC, CdS)

Wiązania mają charakter głównie kowalencyjny. Charakteryzują się szerokimi pasmami walencyjnymi i przewodnictwa tzn. posiadają dużą ruchliwość nośników.

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Półprzewodniki

Półprzewodniki samoistne

Przewodnictwo rośnie z temperaturą wskutek zwiększania się liczby nośników prądu.

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH **Półprzewodniki**

Półprzewodniki domieszkowe

Domieszkowanie półprzewodników pierwiastkami o większej liczbie elektronów walencyjnych (As) prowadzi do otrzymywania półprzewodników typu n zaś przy domieszkowaniu pierwiastkami o mniejszej liczbie elektronów walencyjnych (Ga) półprzewodników typu p.

typ n

typ p

Półprzewodniki te mają zastosowanie do wytwarzania elementów elektronicznych (diody, tranzystory, układy scalone)

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH **Półprzewodniki**

Półprzewodniki tlenkowe

Związki jonowe o charakterze niestechiometrycznym lub związki jonowe z domieszkami zawierają defekty punktowe i elektronowe (elektrony lub dziury).

Przykłady: ZnO, NiO, ZnS

ZnO

ZnO

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH **Przewodniki jonowe**

Przewodniki jonowe

Istnieją materiały o budowie jonowej w których możliwe jest uzyskanie wysokich stężeń ruchliwych nośników jonowych.

Przykład:
ZrO₂ domieszkowane Ca.

Wapń podstawiając cyrkon powoduje powstawanie wakancji anionowych. Możliwa jest wysoka dyfuzja tlenu mechanizmem wakancyjnym

Poligliniany β Al₂O₃ (+Na, K, Li)

Luźna struktura warstwowa z „drogami szybkiej dyfuzji” kationów.

Przewodniki jonowe są materiałami do wytwarzania czujników, ogniw i baterii słonecznych.

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Izolatory

Typowe materiały ceramiczne o budowie kowalencyjnej i jonowej są **izolatorami**.

Charakteryzują się wysoką wartością energii przerwy energetycznej oraz oporności właściwej.

Wykorzystywane są jako materiały elektroizolacyjne oraz dielektryczne.



<http://www.italit.pl/>

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Izolatory

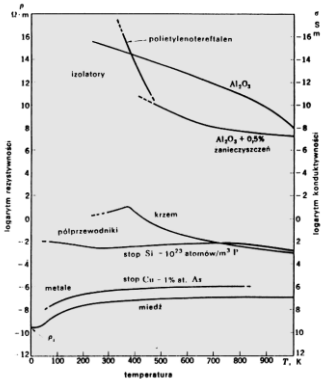
Właściwości niektórych materiałów ceramicznych na izolatory

Material	ϵ_r	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$ (1MHz)	Wytrzym. na przebicie	Rezystywność Ωm	Max. temp. zastosowania $^{\circ}\text{C}$
Porcelana	6+7	60+100	10+16	1,0-10 ⁹ (20 ^o C) 7,0-10 ² (600 ^o C)	1000
Al ₂ O ₃	8+9	10+20	10+16	1,0-10 ¹² (20 ^o C) 1,0-10 ⁷ (600 ^o C)	1500
Mullit	4+5	5+10	20	1,0-10 ¹⁰ (300 ^o C) 1,0-10 ⁹ (600 ^o C)	
Steatyt	5+7	8+35	8+14	1,0-10 ¹¹ (20 ^o C) 1,0-10 ⁵ (600 ^o C)	1050
Forsteryt	6	3	8+12		1050
Szkoło	4,5+5,5	20+100	16+40	5,0-10 ⁷ (20 ^o C) 1,0-10 ² (400 ^o C)	450

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH

Wykres zbiorczy zależności oporności właściwej od temperatury dla różnych typów materiałów



NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Właściwości dielektryczne

Polaryzacja dielektryczna

W materiałach nie przewodzących prądu może występować zjawisko nazywane **polaryzacją elektryczną** polegające na orientacji lub wzbudzeniu dipoli elektrycznych - lokalnych układów ładunków dodatnich i ujemnych przesuniętych względem siebie

Materiały takie nazywamy **dielektrykami**.

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Właściwości dielektryczne

Polaryzacja dielektryczna

Zewnętrzne pole elektryczne o natężeniu E oddziałując na dielektryk powoduje powstanie sumarycznego momentu dielektrycznego nazywanego polaryzacją P

$$P = \sum p_i = n\alpha E$$

Gdzie:
 n - ilość dipoli w objętości materiału;
 α - polaryzowalność dielektryczna
 $\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d + \dots$

Pole elektryczne w praktyce wywoływane jest przez naładowane płytki przewodzące - kondensatory

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Właściwości dielektryczne

Polaryzacja dielektryczna

Po wprowadzeniu dielektryka pomiędzy okładki kondensatora w materiale nakładają się dwa pola:

1. Pole elektryczne wywołane naładowanymi okładkami kondensatora
2. Pole wewnętrzne indukowane w dielektryku dzięki zjawisku polaryzacji

Sumaryczna polaryzowalność materiału wynosi:

$$P = \epsilon_0(\epsilon_r - 1)E$$

gdzie: ϵ_0, ϵ_r - przenikalności dielektryczne próżni i dielektryka

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Właściwości dielektryczne

Polaryzacja dielektryczna

Specyficzną grupę dielektryków stanowią **ferroelektryki** czyli materiały, w których możliwa jest samorzutna polaryzacja i występują trwałe dipole. Przykładem jest BaTiO₃

<http://iramis cea.fr>

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Właściwości dielektryczne

Polaryzacja dielektryczna

Ferroelektryki osiągają bardzo wysokie wartości przenikalności dielektrycznych, mają budowę domenową i ich zachowanie w polu elektrycznym ma charakter pętli histerezy.

domeny dielektryczne dielektryczna pętla histerezy

Ferroelektryki mają szerokie zastosowanie w elektronice i elektrotechnice w kondensatorach, układach hybrydowych, jako piezoelektryki i sensory.

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

AGH Właściwości dielektryczne

Polaryzacja dielektryczna

materiał	ϵ_r	tg δ · 10 ⁴	wytrzym. na przebicie [kV/m] · 10 ⁻³
ceramika rutyłowa (na bazie TiO ₂)	70÷80	4÷6	10÷12
ceramika steatytowa	5,5÷7	12	40÷42
BaTiO ₃	1800	40÷60	4÷6
Pb(Zr _x Ti _{1-x})O ₃	400÷700	3÷4	27÷36
Pb(Mg _{0,33} Nb _{0,67})O ₃	2500÷8000	25÷75	20
Sr(Ti _x Nb _{1-x})O ₃ (półprzewodzący) + izolacyjne cienkie warstwy SrTiO ₃	65000*	70	

* ϵ_r do 10⁶

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne