



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

## NAUKA O MATERIAŁACH

### Wykład XII: Właściwości elektryczne

JERZY LIS  
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki  
Katedra Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych

---

---

---

---

---

---

---

---



### Treść wykładu:

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



http://www.densordium.com

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

---

---

---


---

---

---

---

---



### Wprowadzenie

Oddziaływanie pola magnetycznego na materiał

Pole elektro-  
magnetyczne

MATERIAŁ

}

- Przepływ prądu
- Polaryzacja
- Odształcenie
- Namagnesowanie
- .....

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

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH 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,  $\rho$  - opór właściwy;  $\sigma$  - 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

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH 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

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH 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 rozszczieniem 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 Bube, Electrons in Solids

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Przewodnictwo elektryczne**

**Typy przewodnictwa materiałów**

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

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

**NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Przewodniki**

**Przewodniki metaliczne**

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

**NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH 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

**NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Przewodniki**

**Czynniki obniżające przewodnictwo elektryczne metali**

**Uporządkowanie**

**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: Własności 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: Własności elektryczne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Przewodniki jonowe**

**Przewodniki jonowe**

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

Przykład:  
ZrO<sub>2</sub> domieszkowane Ca.

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

Poliglinitany β Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (+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: Własności 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	$\epsilon_r$	$\text{tg} \delta \cdot 10^4$ (1MHz)	Wytrzymał. na przebicie	Rezystywność $\Omega\text{m}$	Max. temp. zastosowania $^{\circ}\text{C}$
Porcelana	6+7	60+100	10+16	$1,0 \cdot 10^9$ (20°C) $7,0 \cdot 10^2$ (600°C)	1000
$\text{Al}_2\text{O}_3$	8+9	10+20	10+16	$1,0 \cdot 10^{12}$ (20°C) $1,0 \cdot 10^7$ (600°C)	1500
Mullit	4+5	5+10	20	$1,0 \cdot 10^{10}$ (300°C) $1,0 \cdot 10^9$ (600°C)	
Steatyt	5+7	8+35	8+14	$1,0 \cdot 10^{11}$ (20°C) $1,0 \cdot 10^5$ (600°C)	1050
Forsteryt	6	3	8+12		1050
Szkoło	4,5+5,5	20+100	16+40	$5,0 \cdot 10^7$ (20°C) $1,0 \cdot 10^2$ (400°C)	450

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

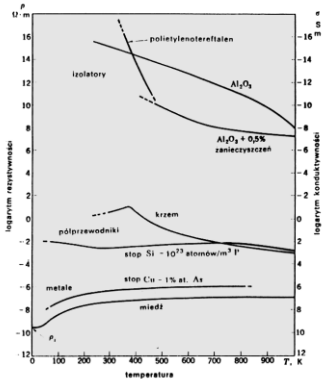
---

---

---

**AGH**

Wykres zbiorczy zależności oporności właściwej od temperatury dla różnych typów materiałów



NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

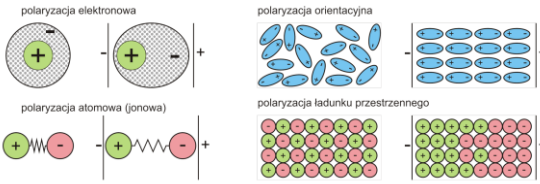
---

**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;  
 $\alpha$  - polaryzowalność dielektryczna  
 $\alpha = \alpha_e + \alpha_a + \alpha_d + \dots$

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

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**AGH Właściwości dielektryczne**

**Polaryzacja dielektryczna**

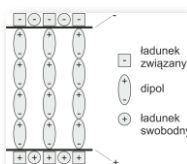
Po wprowadzeniu dielektryka pomiędzy okładki kondensatora w materiale nakładają się dwa pola:

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:  $\epsilon_0$ ,  $\epsilon_r$  - przenikalności dielektryczne próżni i dielektryka



kondensator

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 BaTiO<sub>3</sub>

<http://ramis.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	$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta \cdot 10^4$	wytrzym. na przebicie [kV/m] $\cdot 10^{-3}$
ceramika rutyłowa (na bazie TiO <sub>2</sub> )	70÷80	4÷6	10÷12
ceramika steatytowa	5,5÷7	12	40÷42
BaTiO <sub>3</sub>	1800	40÷60	4÷6
Pb(Zr <sub>x</sub> Ti <sub>1-x</sub> )O <sub>3</sub>	400÷700	3÷4	27÷36
Pb(Mg <sub>0,33</sub> Nb <sub>0,67</sub> )O <sub>3</sub>	2500÷8000	25÷75	20
Sr(Ti <sub>x</sub> Nb <sub>1-x</sub> )O <sub>3</sub> (półprzewodzący) + izolacyjnie cienkie warstwy SrTiO <sub>3</sub>	65000*	70	

\*  $\epsilon_{r, \text{eff}}$

NAUKA O MATERIAŁACH XII: Właściwości elektryczne

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---



**AGH** AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA  
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

**NAUKA O MATERIAŁACH**

**Dziękuję.**

JERZY LIS  
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki  
Katedra Ceramiki i Materiałów Ogniotrwałych

---

---

---

---

---

---

---

---