



PODSTAWY ELEKTRONIKI

prof. dr hab. inż. Mateusz Pasternak

<http://mpasternak.wel.wat.edu.pl>
mateusz.pasternak@wat.edu.pl

bud. 80 p. 110, tel. 261 83 76 67
bud. 45. p.102, tel. 261 83 92 23

1

Podstawowe własności fizyczne

1. Prądu elektrycznego
2. Przewodników
3. Izolatorów
4. Półprzewodników

Zaliczenie na podstawie kolokwium końcowego, ocen z ćwiczeń laboratoryjnych

Konsultacje w czwartki po południu, piątki do 15.00 oraz poprzez dostępne media elektroniczne.
Inne dni po uzgodnieniu.

2

LITERATURA



Podstawowa

Antoni Rogalski, Podstawy fizyki dla elektroników, http://www.wtc.wat.edu.pl/wp-content/uploads/2018/04/podstawy_fizyki_dla_elektronikow.pdf, 2002.

Aldert Ziel, Podstawy fizyczne elektroniki ciała stałego, WNT 1980.

Uzupełniająca

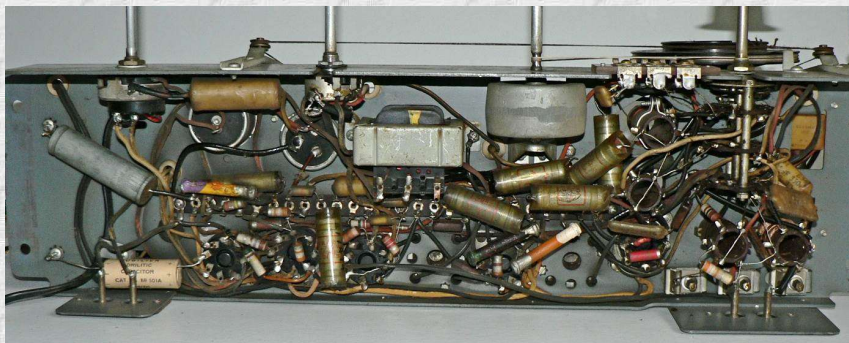
Zdzisław Celiński, Materiałoznawstwo elektrotechniczne, Oficyna Wyd. PW, wyd. 4, 2011.

3

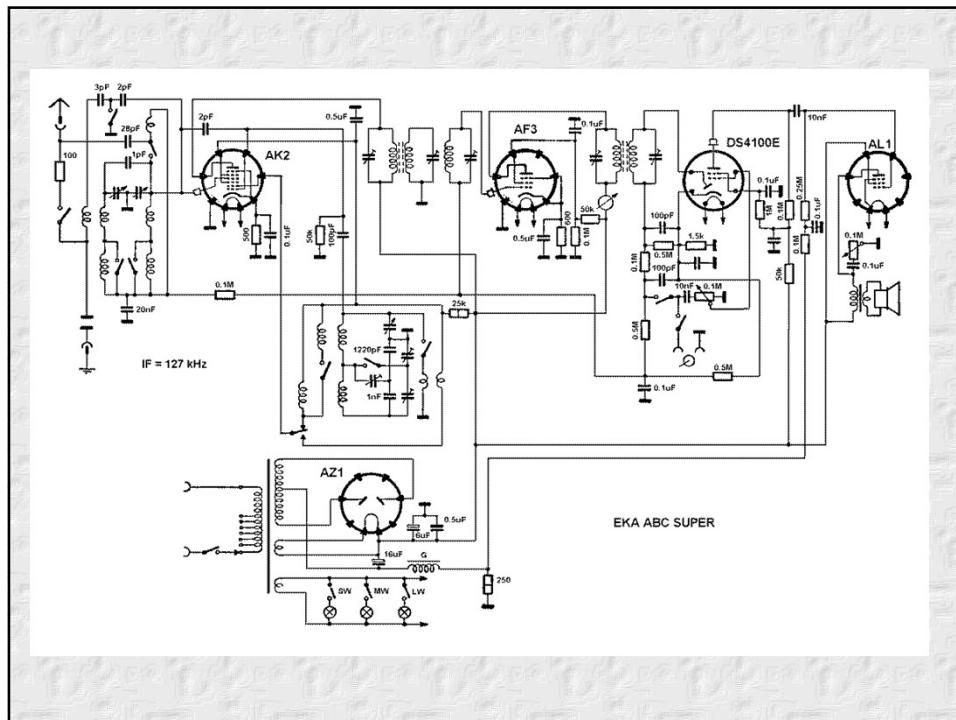
Elektronika szybko się zmienia



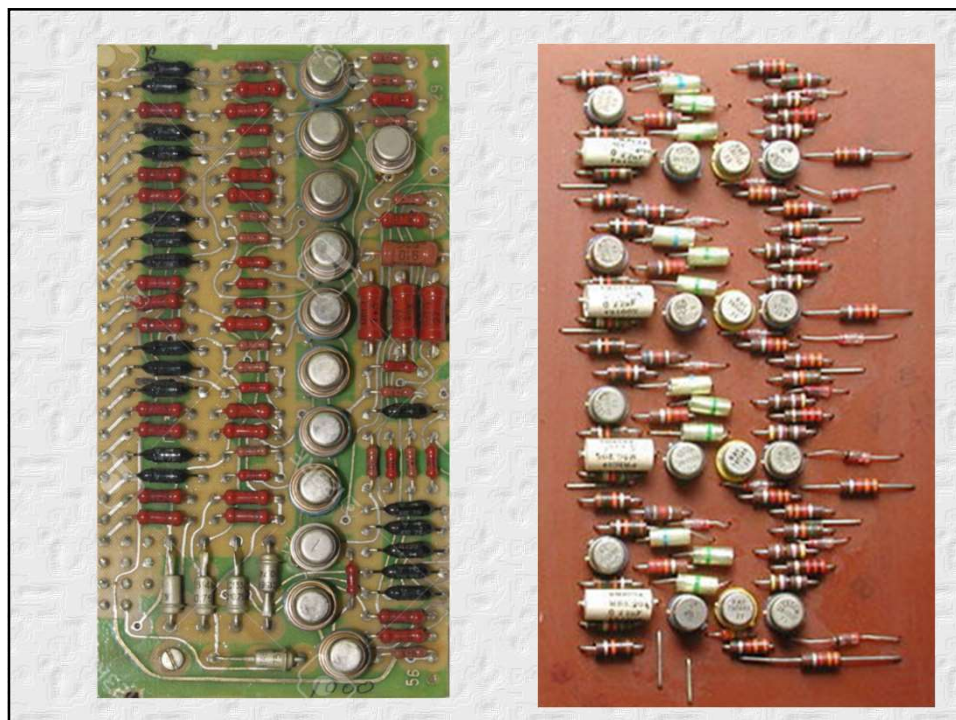
Prawa fizyki pozostają niezmiennie



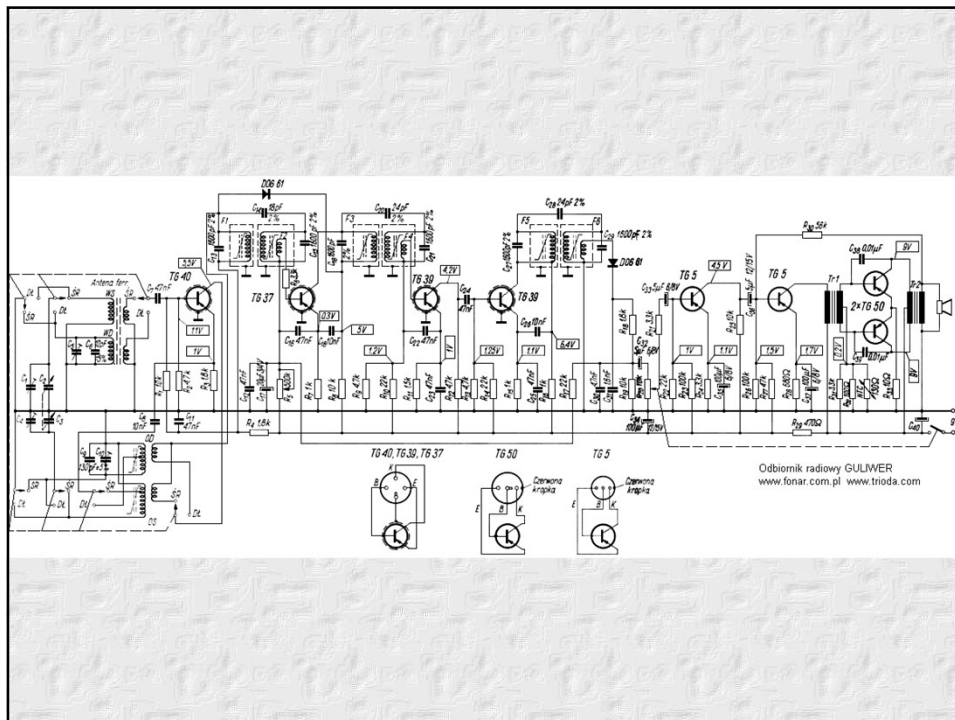
4



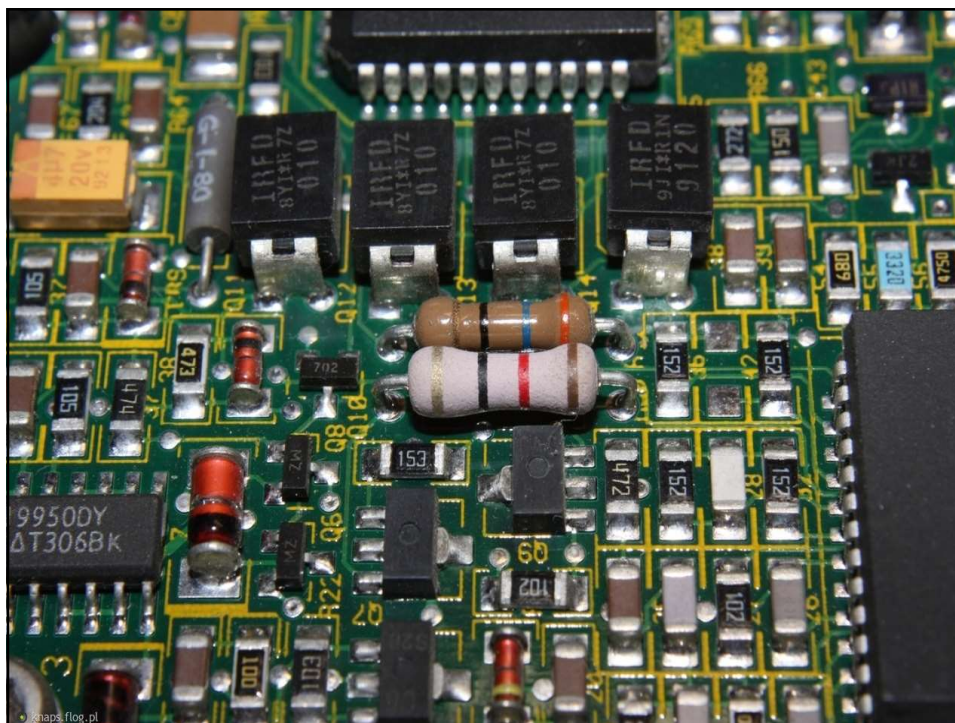
5



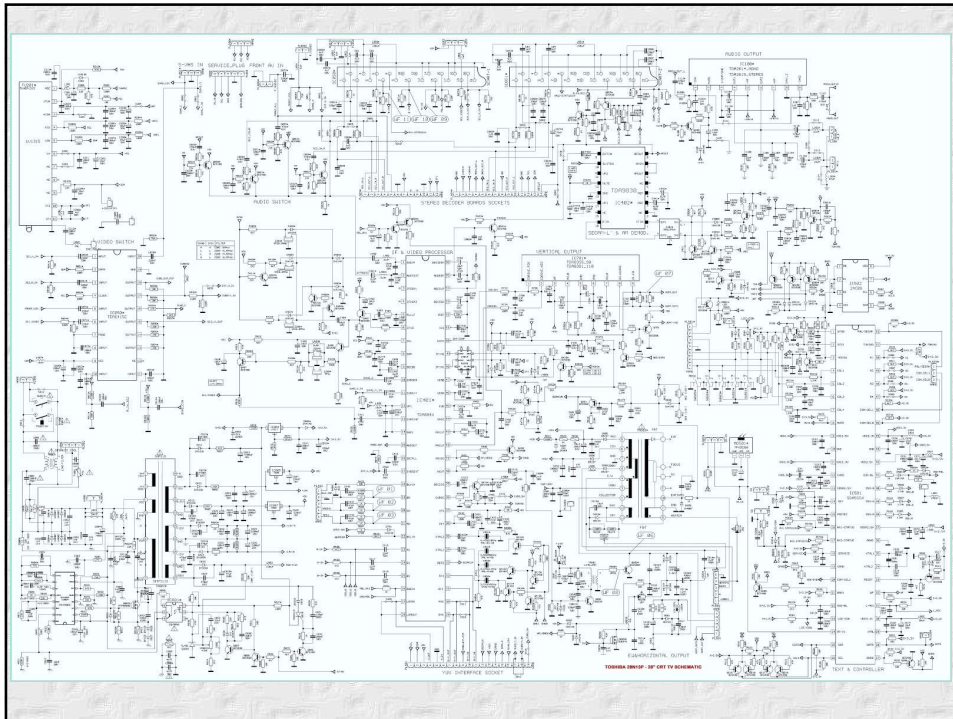
6



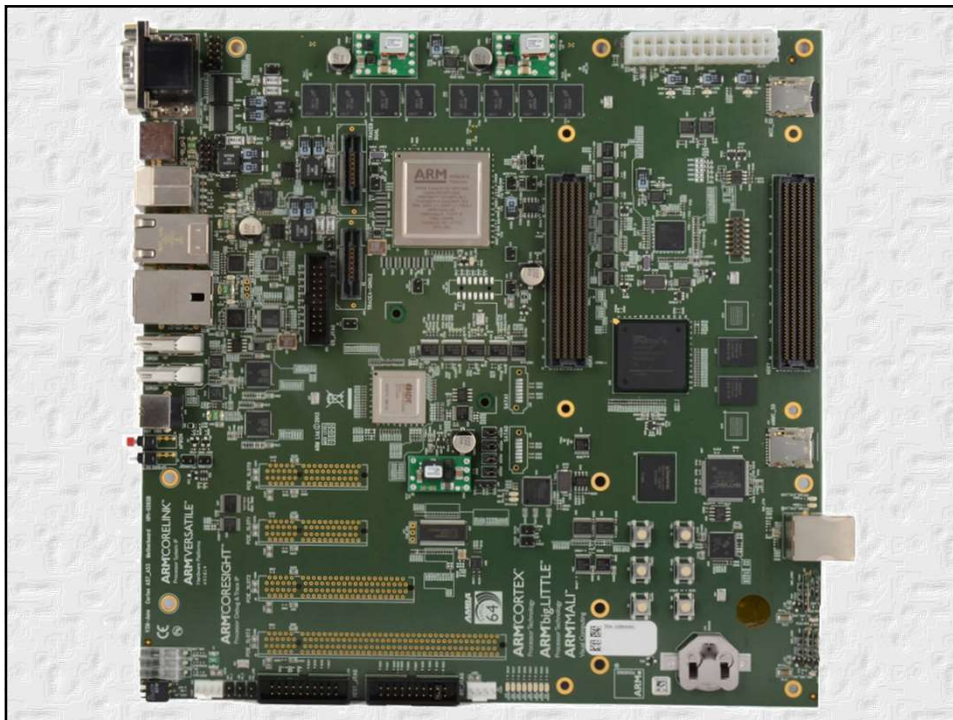
7



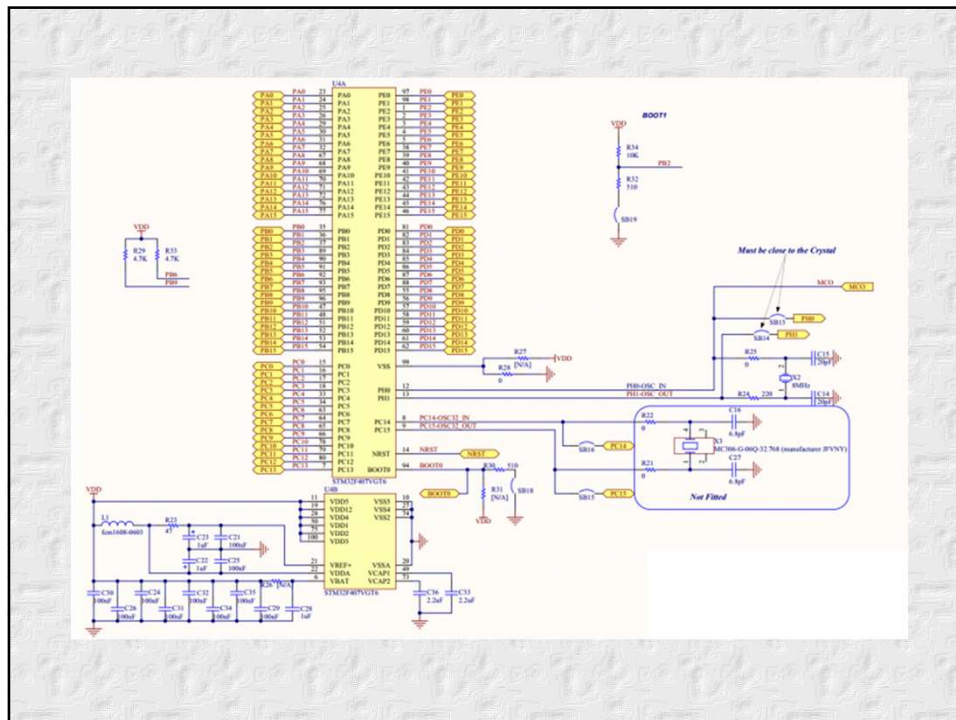
8



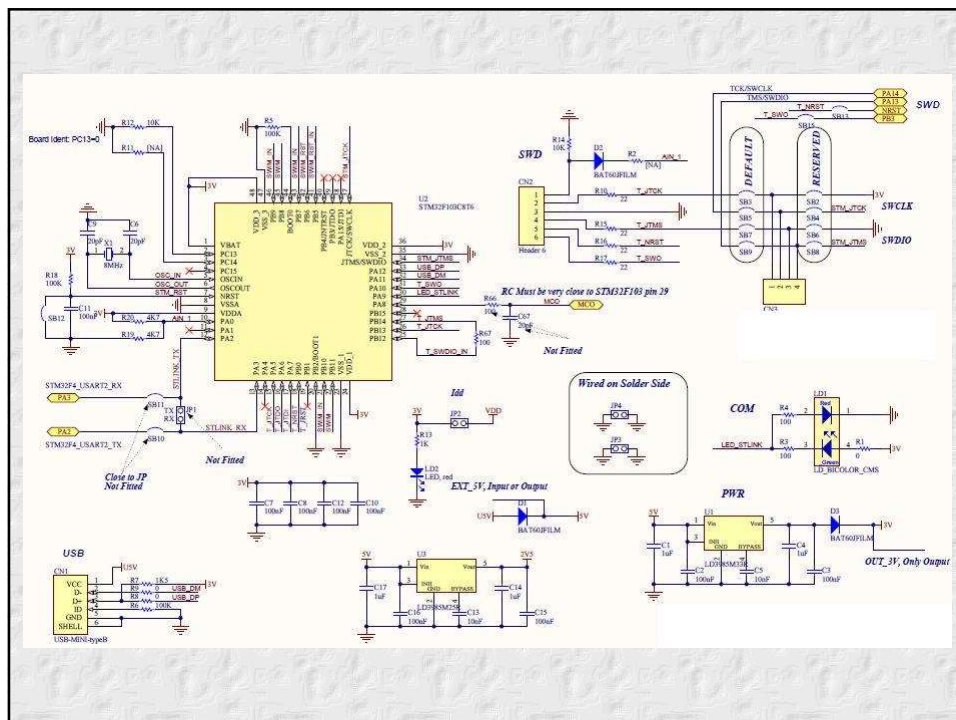
9



10

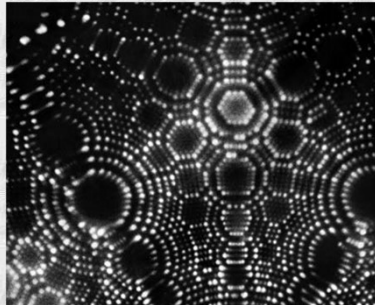


11

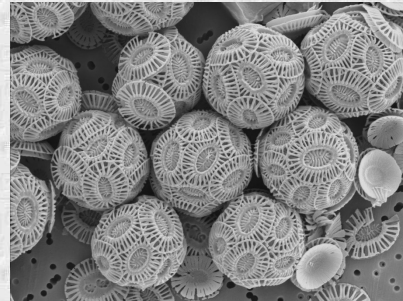


12

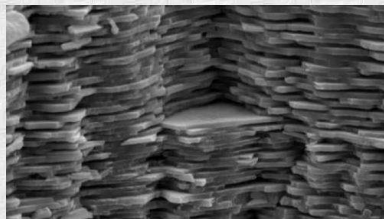
Własności elektryczne materiałów wynikają zarówno z ich struktury atomowej, nanostruktur jak i struktury makroskopowej



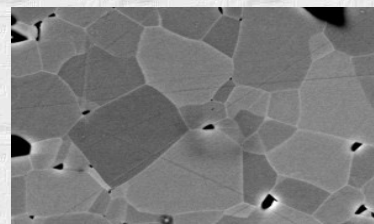
wolfram



kreda



macica perłowa



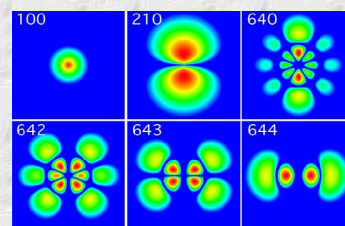
piezoceramika

13

Atomy i ładunki

Jądro atomu składa się z protonów i neutronów. Ładunek dodatni protonów jest równy co wartości ładunkowi krążących wokół jądra elektronów.
Neutrony nie posiadają ładunku – atom jest elektrycznie obojętny.

Atom pozbawiony co najmniej jednego elektronu ma ładunek dodatni i nosi nazwę **JONU DODATNIEGO (KATIONU)**



Atom (cząsteczka), do którego dołączył się co najmniej jeden elektron nosi nazwę **JONU UJEMNEGO (ANIONU)**

ŁADUNKI = elektrony lub jony

Oznaczenie ładunków jest umowne

- za dodatnie uważa się takie, które gromadzą się na pręcie szklanym pocieranym jedwabiem
- za ujemne, ładunki gromadzące się na pręcie żywicznym pocieranym wełną

14

Elektron

e^- , β^- – trwała cząstka elementarna z rodziny leptonów będąca jednym z elementów atomu

elementarny ładunek elektryczny równy $e = -1,602\,176\,6208(98) \cdot 10^{-19}$ [C]

masa spoczynkowa $m_e \approx 9,109\,382\,91 \cdot 10^{-31}$ [kg]

promień $< 10^{-22}$ [m]

elektrony w atomach zajmują określony obszar (orbital) w przestrzeni wokół stosunkowo małego dodatniego jądra

parametry orbitali zależą od oddziaływań elektronów z jądrem i pomiędzy sobą

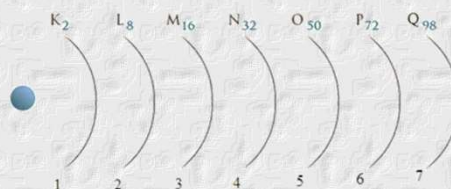
rozmiary orbitali atomowych są rzędu 10^{-10} m – 1 Å czyli (w tzw. stanach wzbudzonych) mogą być kilkadziesiąt razy większe)

rozmiary orbitali są od 10 do 100 tysięcy razy większe od jądra atomowego, którego średnica wynosi od 10^{-15} do 10^{-14} m

15

Jeżeli ilość energii dostarczonej do atomu jest dostatecznie duża (np. energii cieplnej), to elektrony położone najdalej od jądra (tzw. elektrony walencyjne lub in. peryferyjne) mogą pokonać siły wiążące je z jądrem.

nr powłoki = n	1	2	3	4	5	6	7
symbol	K	L	M	N	O	P	Q
maksymalna liczba elektronów walencyjnych = $2n^2$	2	8	18	32	50	72	98



16

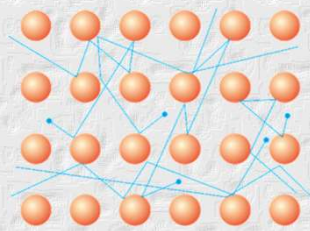
Założenia modelowe:

elektrony swobodne:

- są niezwiązane bądź słabo związane z atomami
- nie oddziałują ze sobą
- przeskakują między orbitalami
- poruszają się w sposób przypominający zderzenia z kationami
- poruszają się w sposób analogiczny do cząstek gazu doskonałego
- są cząstkami punktowymi – praktycznie nie mają rozmiarów
- w próżni mają masę spoczynkową około $m_e \approx 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg
- w ośrodku mają masę mniejszą niż w próżni z uwagi na oddziaływania pól (tzw. masa efektywna) w skrajnych przypadkach może być ona ujemna (w Si $m_e^* = 0,36 m_e$, w InP $m_e^* = 0,08 m_e$) ponieważ masa zależy od energii kinetycznej może być różna w różnych kierunkach

19

Maksymalna liczba elektronów swobodnych w jednostce objętości metalu (dobrego przewodnika prądu) może być oszacowana z zależności:



$$n = \frac{ZN_{Av}\rho}{A}$$

Z - liczba elektronów walencyjnych

N_{Av} - stałą Avogadro

ρ - gęstość metalu

A - masa atomowa metalu

$$l_{z/s} = \frac{e^2 n}{2m\sigma}$$

$2 \cdot 10^{13}$ zderzeń/s w Cu

$0,9 \cdot 10^{22} / \text{cm}^3$ dla cezu

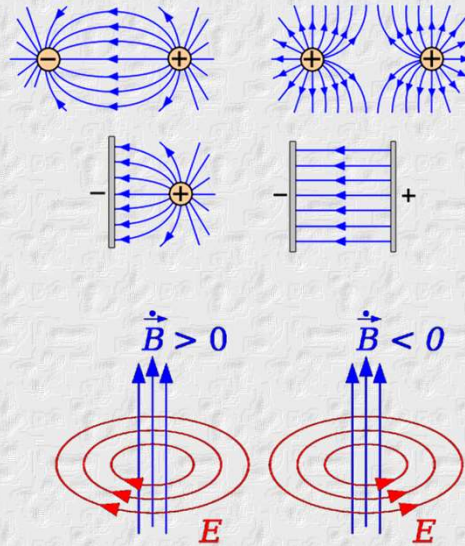
$8,4 \cdot 10^{22} / \text{cm}^3$ dla miedzi

$24,7 \cdot 10^{22} / \text{cm}^3$ dla berylu

$7 \cdot 10^{20}$ szacunkowa liczba ziarenek piasku na świecie

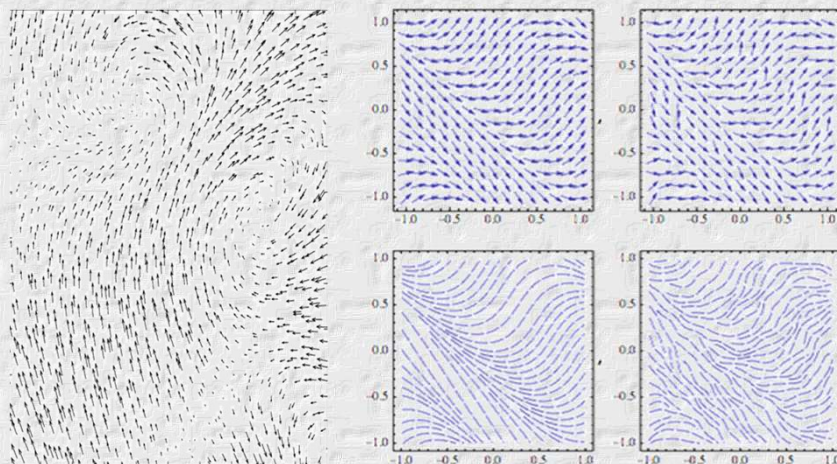
20

Ładunki elektryczne oraz zmienne pola magnetyczne generują pola elektryczne.



21

Pole elektryczne – pole wektorowe określające w każdym punkcie siłę działającą na jednostkowy, spoczywający ładunek elektryczny.

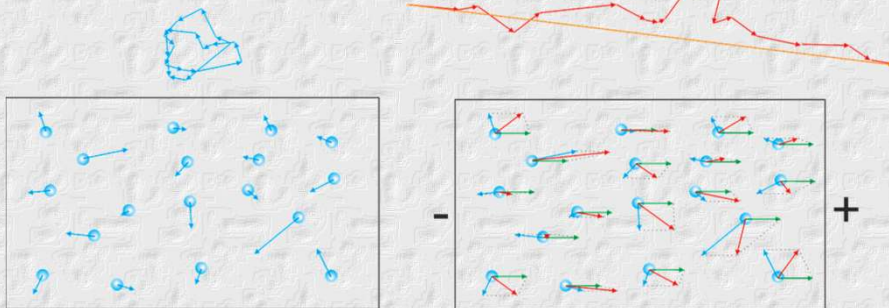


Linie sił pola to linie, do których wektory sił są styczne w każdym punkcie przestrzeni

22

Prąd jest ruchem ładunków wywołanym poprzez działanie pola elektrycznego

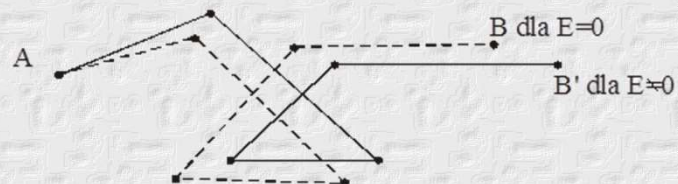
Ruch ładunków jest chaotyczny – pod działaniem pola elektrycznego w pewnym stopniu się porządkuje



prąd nie płynie – suma prędkości = 0
(aczkolwiek w małym wycinku przewodnika nieznacznie różni się ona od zera
- Jest to powód powstawania szumów)

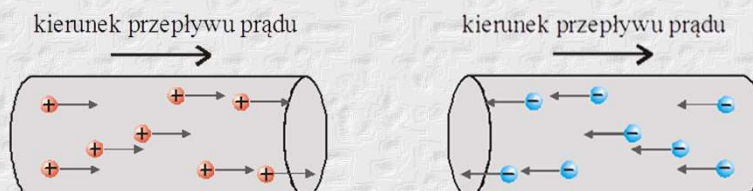
prąd płynie – suma prędkości
jest różna od zera

23

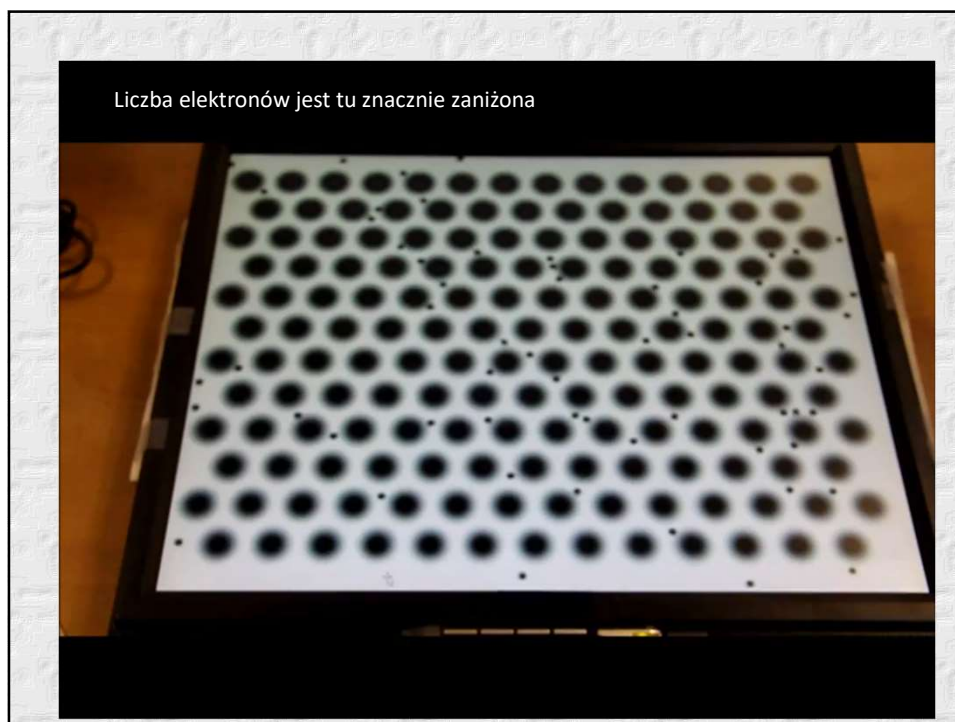


Prąd elektryczny wyraża więc pewien ogólny, statystyczny trend kierunkowego ruchu ładunków.

Kierunek przepływu prądu jest umowny.
Przyjęto, że jest on zgodny z ruchem ładunków dodatnich (jonów).



24



25

W rzeczywistości dla temperatur pokojowych ruch termiczny elektronów ma średnią wartość wielokrotnie wyższą niż ruch wynikający z istnienia zewnętrznego pola elektrycznego

Średnia prędkość elektronów w ruchu cieplnym wynosi

$$v_c = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}} \quad E_{ke} = \frac{m_e v_c^2}{2} = \frac{3}{2} kT$$

k – stała Boltzmann $k \approx 1,38 \cdot 10^{-23} [\text{J/K}] \approx 2,08 \cdot 10^{10} [\text{Hz/K}]$

Średnią prędkość elektronów, przyspieszanych polem elektrycznym o natężeniu E , nazywa się **prędkością unoszenia**

$$v_u = \frac{eE}{m_e} \bar{\tau} = \mu E$$

e – ładunek elektronu
 m_e – efektywna masa elektronu (Cu $\Rightarrow$ 1, Al $\Rightarrow$ 0,97, Zn $\Rightarrow$ 0,85, Be $\Rightarrow$ 1,6 wart. dla próżni)
 $\bar{\tau}$ – średni czas relaksacji (średni czas pomiędzy kolejnymi zderzeniami)
 μ – ruchliwość elektronu

przez dowolny przekrój przewodnika S w czasie t może więc przepłynąć ładunek

$$q = S e n v_u t$$

26

natężenie prądu wyniesie zatem

$$i = \frac{q}{t} = enSv_u = \frac{e^2 n S \bar{\tau}}{2m_e} E$$

gęstość prądu

$$j = \frac{i}{S} = enSv_u = \frac{e^2 n \bar{\tau}}{2m_e} E = en\mu E = \sigma E$$

gęstość prądu nie zależy od pola przekroju przewodnika, a jedynie od koncentracji elektronów ich średniego czasu relaksacji oraz wartości zewnętrznego pola elektrycznego

współczynnik proporcjonalności $\sigma = \frac{e^2 n \bar{\tau}}{2m_e}$ nosi nazwę **konduktywności**
lub inaczej **przewodności** elektrycznej

a jego odwrotność nazywana jest rezystywnością $\rho = \frac{1}{\sigma} = \frac{2m_e}{e^2 n \bar{\tau}}$

27

Proporcja

$$j = \sigma E$$

jest równoważna prawu Ohma

uwzględniając zależności: $i = jS \quad E = \frac{U}{l} \quad U = Ri$

Otrzymuje się związek opisujący rezystancję przewodu o długości l i polu przekroju S

$$R = \frac{l}{\sigma S} = \rho \frac{l}{S}$$

Przykład 1 km przewodu o średnicy 1 mm
(pole przekroju $7,854 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2$)



srebro	20,4 Ω
miedź	22,7 Ω
złoto	31,1 Ω
glin (aluminium)	36,3 Ω
wolfram	71,3 Ω
nikiel	89,0 Ω
żelazo	127,3 Ω
cyna	146,4 Ω

28

Rezystywność i konduktywność można powiązać z ruchem cieplnym elektronów

$$\bar{\lambda} = v_c \bar{\tau}$$

$\bar{\lambda}$ - średnia droga swobodna

$$\rho = \frac{2}{e^2 n \bar{\lambda}} \sqrt{3 m_e k T}$$

co uwidacznia zależność tych parametrów od temperatury oraz możliwość nadprzewodnictwa w temperaturze 0 K

Ilość ciepła, które wydziela się podczas przepływu prądu elektrycznego przez przewodnik elektryczny określa prawo Joule'a-Lenza:

$$Q = R i^2 t$$

Jeżeli ciepło nie byłoby odprowadzane do otoczenia, to nawet małe prądy mogłyby doprowadzić do stopienia przewodnika.

Z drugiej strony przez każdy przewodnik mogą płynąć bardzo duże prądy, ale dostatecznie krótko

29

Przewodnictwo elektryczne materiałów – rezystywność i konduktywność

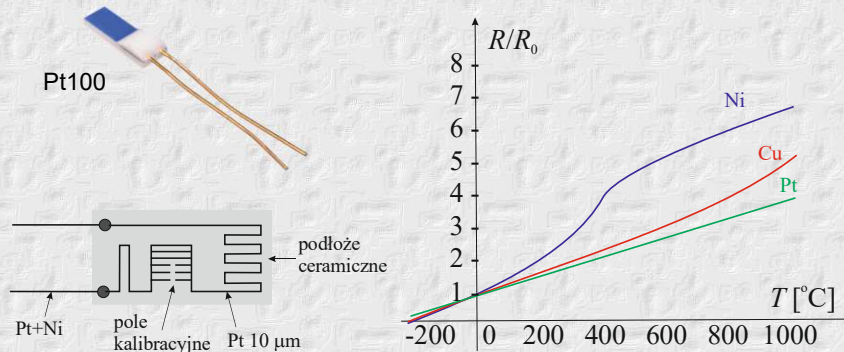
Materiał przy 20 °C	Rezystywność ρ [Ωm]	Konduktywność σ [$1/\Omega\text{m}$]=[S/m]	Temperaturowy wsp. rezystancji α_{20} [1/°C] TWR
Aluminium	$0,0285 \cdot 10^{-6}$	$35 \cdot 10^6$	$4,1 \cdot 10^{-3}$
Cyna	$0,115 \cdot 10^{-6}$	$8,7 \cdot 10^6$	$4,4 \cdot 10^{-3}$
Miedź	$0,0178 \cdot 10^{-6}$	$56 \cdot 10^6$	$3,9 \cdot 10^{-3}$
Srebro	$0,016 \cdot 10^{-6}$	$62,5 \cdot 10^6$	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Chromonikielina	$1,0 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^6$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
Konstantan	$0,5 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^6$	$3 \cdot 10^{-5}$
Węgiel elektrotechniczny	$2 - 4 \cdot 10^{-5}$	$2,86 \cdot 10^4$	$-2 \cdot 10^{-3}$

Rezystancja przewodników zmienia się wraz z temperaturą: $R_t = R_{20} [1 + \alpha_{20} (t - 20^\circ)]$

1. Metale nieferromagnetyczne np. aluminium, miedź, cyna, srebro zmieniają swoją rezystywność w sposób liniowy $\alpha_{20} = 0,0004 \text{ 1/}^\circ\text{C}$
2. Metale ferromagnetyczne w temperaturze poniżej punktu Curie (temperatura utraty właściwości magnetycznych, żelazo ok. 760°C) zmieniają współczynnik w znacznym stopniu w zależności od temperatury $\alpha_{20} = 0,0006 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, jednak w temperaturze pokojowej można go przyjąć jako stały
3. Materiały oporowe: chromonikielina, konstantan wykazują niezależność rezystancji od temperatury
4. Półprzewodniki np. tlenki miedzi i tlenki manganu mają współczynnik α_{20} ujemny, stosowane jako termistory, ograniczają wartość prądu po włączeniu

30

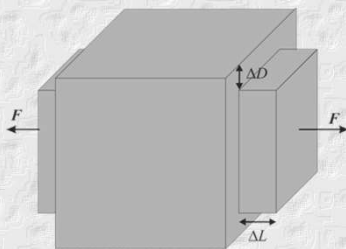
Zależność rezystancji od temperatury wykorzystuje się do budowy czujników. Najczęściej wykorzystuje się nikiel, miedź oraz platynę.



Platyna zachowuje się liniowo w bardzo dużym zakresie temperatur i jest odporna na utlenianie. Standardowe czujniki Pt100 i Pt1000 mają w temperaturze 0°C rezystancje odpowiednio 100 i 1000 Ω. Każdy czujnik tego typu projektowany jest na określony zakres temperatur.

31

Efekt piezorezystancyjny



Liczba (stała) Poissona - stosunek odkształcenia poprzecznego do odkształcenia podłużnego przy osiowym stanie naprężenia

$$\nu = - \frac{\Delta D}{\Delta L}$$

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

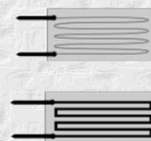
Jeżeli rezystancja zależy od geometrii $R = \rho \frac{l}{S}$ to rozciąganie (ściskanie) materiału przewodzącego będzie miało wpływ na jego rezystancję (efekt piezorezystancyjny).

Po rozpisaniu wyrażenia na rezystancję w szereg Taylora i ograniczeniu się do początkowych członów rozwinięcia otrzyma się:

$$\frac{\Delta R}{R} \approx \underbrace{\frac{\Delta \rho}{\rho}}_{\text{dominuje w półprzewodnikach}} + \underbrace{\frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta S}{S}}_{\text{dominuje w metalach}}$$

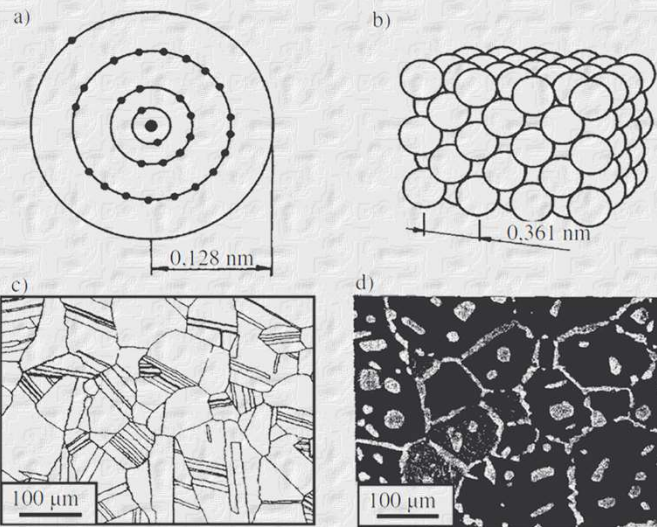
dominuje w półprzewodnikach

dominuje w metalach



32

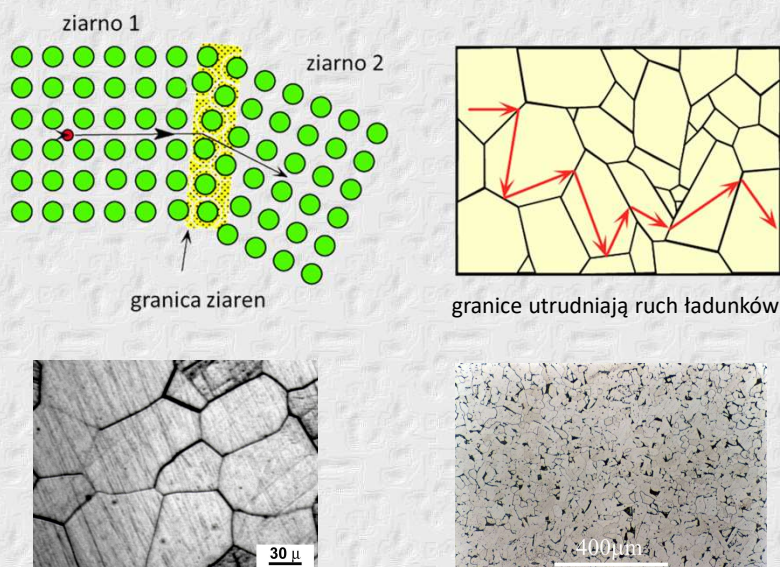
Metale mają strukturę polikrystaliczną



a) struktura atomu miedzi, b) struktura kryształu miedzi, c) struktura ziarnista miedzi (jednofazowa), d) struktura ziarnista dwufazowa stopu miedzi z cynkiem (mosiądzu)

33

Struktura polikrystaliczna zwiększa rezystywność metali i stopów



34

Podstawowe cechy metali

- substancje proste (pierwiastki chemiczne) tworzące układy krystaliczne o wysokim stopniu wypełnienia przestrzeni atomami
- w temperaturze pokojowej występują w stanie stałym (z wyjątkiem Hg)
- dobre przewodnictwo elektryczne – dzięki temu są nieprzezroczyste
- (wysoka zdolność odbijania promieniowania elektromagnetycznego)
- dobre przewodnictwo cieplne
- niskie tłumienie dźwięku
- wysoka wytrzymałość mechaniczna
- dość wysoka twardość
- wysoki moduł sprężystości
- duża gęstość
- dobra kowalność
- wysoka temperatura topnienia
- wysoka reaktywność chemiczna (za wyj. metali szlachetnych)

35

Stopy metali

Pozwalają na modyfikację parametrów fizycznych metali poprzez wprowadzenie w ich strukturę innych pierwiastków.

Osnową stopu jest metal, a w jego skład wchodzi co najmniej jeden dodatkowy składnik zwany dodatkiem stopowym.

Dodatki są wprowadzane w celu poprawienia mechanicznych właściwości materiału.

Zwykle pogarszają plastyczność, przewodnictwo elektryczne i przewodnictwo cieplne.

Często zmniejszają również odporność na korozję.

Stopy otrzymuje się najczęściej przez stapianie składników w stanie ciekłym i odlewanie, po którym w czasie chłodzenia i dodatkowych zabiegów obróbki cieplnej powstaje struktura decydująca o właściwościach stopu.

Są stosowane również inne techniki wytwarzania stopów, tj. spiekanie, elektroliza lub nasycanie dyfuzyjne w stanie stałym.

Dla powierzchni stosuje się azotowanie, nawęglanie, węgloazotowanie (cyjanowanie), kaloryzowanie, aluminowanie, naborowywanie, chromowanie, siarkowanie, fosforowanie, kadmowanie, cynkowanie i in.

36

Miedź

- liczba atomowa równa 29, masa atomowa wynosi 63,5463
- w związkach chemicznych miedź jest jedno- lub dwuwartościowa.
- nie wykazuje odmian alotropowych i krystalizuje w sieci ściennie centrowanej układu regularnego o parametrze 0,3617 nm
- temperatura topnienia miedzi wynosi 1084,88°C, a wrzenia ok. 2595°C
- gęstość 8,93 g/cm³ w 20°C
- wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 200 \div 250$ MPa
- granica plastyczności $R_e = 35$ MPa
- twardość 45 HB (w skali Brinella)
- wydłużenie $A = 30 \div 35\%$.
- W wyniku obróbki plastycznej na zimno wytrzymałość miedzi zwiększa się do 400÷450 MPa, a twardość do 120 HB, przy zmniejszeniu wydłużenia do 1÷2%.
- dobra przewodność cieplna i elektryczna
- wysoka odporność na korozję atmosferyczną dzięki pokrywaniu się patyną, tj. zasadowym węglanem miedziowym, i na działanie wody,
- brak odporności na działanie amoniaku
- miedź dobrze się lutuje

37

Zastosowanie miedzi

- w elektrotechnice na przewody, gdzie wykorzystuje się jej wysoką przewodność elektryczną,
- w energetyce i przemyśle chemicznym na chłodnice i wymienniki ciepła – ze względu na dużą przewodność cieplną,
- w budownictwie są stosowane rury z czystej miedzi (min. 99,9%), z których wykonuje się instalacje ciepłej i zimnej wody, ogrzewania, gazowe, ciekłego paliwa, sanitarne i in.

38

Mosiądze

Stopy miedzi z cynkiem, jako głównym pierwiastkiem stopowym, są nazywane **mosiądzami**. Mosiądze dwuskładnikowe – ze względu na skład fazowy – dzieli się na:

- jednofazowe – o strukturze roztworu α i stężeniu od 2 do 39% Zn, - bardzo duża plastyczność - na wyroby głębokotłoczne (tombaki – zawierają 5 – 20% Zn)
- dwufazowe o strukturze mieszaniny $\alpha + \beta$ i stężeniu od 39 do 45% Zn. Wytrzymałość mosiądzów zawierających ok. 30 do 45% Zn zwiększa się przy znacznym zmniejszeniu plastyczności
- mosiądze charakteryzują się dobrą odpornością na korozję, szczególnie atmosferyczną i w wodzie morskiej. Odporność na korozję stopów miedzi z cynkiem zwiększa się wraz ze wzrostem stężenia Cu.
- najczęściej spotykanymi rodzajami korozji mosiądzów jest **odcynkowanie** oraz **korozja naprężeniowa**, zwana pękaniem sezonowym mosiądzów

39

Glin (aluminium)

- występuje w przyrodzie w bardzo wielu minerałach i jest trzecim (po tlenie i krzemie) pierwiastkiem pod względem udziału w skorupie ziemskiej, liczba atomowa 13 (liczba protonów w jądrze=liczbie elektronów przy braku jonizacji), masa atomowa 26,9815 (razy $1,66 \cdot 10^{-24}$ g czyli 1/12 masy węgla ^{12}C)

- nie wykazuje odmian alotropowych jedyny stabilny izotop to ^{27}Al
- krystalizuje w sieci regularnej ściennie centrowanej typu A1 o parametrze 0,40408 nm
- temperatura topnienia 660,37°C, wrzenia 2494°C
- gęstość 2,6989 g/cm³ w 20°C

W stanie wyżarzonym cechuje się:

- wytrzymałością na rozciąganie wynoszącą $R_m = 70 \div 120$ MPa,
- granicą plastyczności $R_e = 20 \div 40$ MPa,
- wydłużeniem $A = 30 \div 45\%$, przewężeniem $Z = 80 \div 95\%$.

40

Glin na powietrzu pokrywa się cienką warstwą Al_2O_3 , dobrze chroniącą przed korozją, działaniem wody, stężonego kwasu azotowego, licznych kwasów organicznych, a także siarkowodoru

Jest to metal nie nadający się do lutowania, trudno spawalny

Kwasy redukujące HCl i HF , słona woda, pary i jony rtęci powodują przyspieszenie korozji aluminium

W celu polepszenia odporności na korozję aluminium może być poddane tzw. anodowaniu, tj. elektrolitycznemu procesowi wytwarzania powłoki tlenkowej, np. w roztworze 10% kwasu siarkowego, połączonemu z barwieniem powierzchni metalu na różne kolory

Sproszkowany glin używany jest w hutnictwie do otrzymywania metali z ich tlenków w procesie aluminotermii. Stosowana w tym procesie mieszanina glinu oraz tlenków metali jest znana pod nazwą termit, który m. in. jest używany do spawania oraz jako surowiec do produkcji broni

Pył glinowy jest często składnikiem farb metalicznych odpowiedzialnym za charakterystyczny połysk.

Glin jest dobrym przewodnikiem ciepła i prądu

41

Żelazo i jego stopy

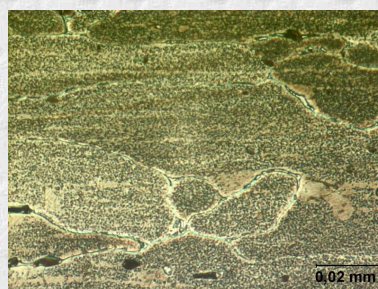
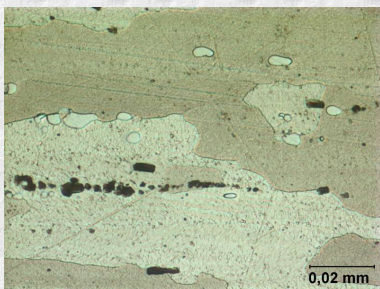
- Posiada 25 izotopów z przedziału mas 45–69. Trwałe są izotopy 54, 56, 57 i 58. najbardziej rozpowszechniony jest izotop 56 (ok. 92%)
- liczba atomowa równa 26
- w związkach chemicznych może być nawet sześciowartościowy
- rozróżnia się cztery odmiany alotropowe α , β , γ i δ krystalizujące w sieci regularne ściennie lub przestrzennie centrowane
- temperatura topnienia wynosi 1538°C , a wrzenia ok. 2861°C
- gęstość 7874 kg/m^3 w 20°C
- wytrzymałość na rozciąganie od 400-1500 MPa
- wysoka twardość
- dobra przewodność cieplna i elektryczna (konduktywność rzędu 7 MS/m)
- jest wysoce reaktywne, łatwo koroduje, brak odporności na działanie kwasów
- od ok. XV w p.n.e. jest stosowane w formie stopów z węglem
- do wytwarzania stopów żelaza (tzw. stałe stopowe) stosuje się też mangan, chrom, molibden, wanad, krzem i in.

42

W stopach żelaza z węglem węgiel może występować w postaci czystej (grafit), roztworu stałego w sieci krystalicznej czyli ferrytu lub austenitu albo jako węglik żelaza (cementyt)

Stopy zawierające poniżej 2,11% (wg PN, 1,75% wg EN) węgla to stale lub staliwa, zaś powyżej tego stężenia - żeliwa.

Przy zawartości węgla poniżej 0,0218% uzyskuje się niemal czyste żelazo α zwane ferrytem, przy 0,77% uzyskuje się perlit będący mieszaniną ferrytu i cementytu, przy zawartości węgla 4,3% powstaje ledeburyt



43

Najważniejsze zastosowania żelaza i jego stopów w elektronice

- wytrzymały materiał konstrukcyjny (chassis, obudowy, śruby i nakrętki), **wzmocnienie przewodów**, ekrany elektryczne, styki, sprężyny, trzpienie, i in.
- stop z niklem (79%) nazywany jest **permalojem** magnetycznie miękkim materiałem wykorzystywanym do budowy rdzeni prądnic, silników, transformatorów i cewek
- stop z niklem (79%), molibdenem (5%) i manganem (~0,5%) pozwala na uzyskanie **superpermaloju** o przenikalności magnetycznej dochodzącej do 900 000 (dla max. wartości pól magnetycznych) do jego rozmagnesowania wystarcza pole rzędu 0,3 A/m
- stopy z niklem (36-46%) z niewielkim dodatkiem węgla i chromu noszą nazwę **inwarów** charakteryzujących się bardzo niską rozszerzalnością cieplną i wysoką temperaturą stałości stałych sprężystych - super inwar Fe63Ni32Co5 ma praktycznie zerową rozszerzalność w zakresie 20-215 °C
- żelazo stosowane jest także jako składnik bimetalu i domieszka do stopów oporowych

44

Stop żelaza z kobaltem i niewielkimi dodatkami wanadu (do 2%), tantalu i niobu nazywa się **permendurem**. Permendur ma najwyższą znaną wartość indukcji nasycenia dla materiałów magnetycznie miękkich. Dochodzi ona do 2,43 T.

Permendur stosowany jest tam, gdzie zachodzi konieczność uzyskania maksymalnej sprawności maszynach elektrycznych używanych w samolotach lub satelitach

Mumetal to stop niklu (75%) i żelaza (15%) z niewielkimi dodatkami miedzi i molibdenu. Stop ten wykazuje bardzo dużą względną przenikalność magnetyczną (nawet powyżej 10^6), co jest wykorzystywane do ekranowania statycznych i wolnozmiennych pól magnetycznych.

Mumetal poddany ścisaniu znacznie obniża swą przenikalność magnetyczną, dlatego elementy wykonane z tego stopu muszą być odpowiednio zabezpieczone.

Istnieje wiele modyfikacji tego stopu (np. super mumetal), które różnią się nieznacznie przede wszystkim właściwościami magnetycznymi.

45

Spoiwa lutownicze miękkie

Zgodnie z unijną dyrektywą Restriction of Hazardous Substances (2002/95/EC) od 1 lipca 2006 w stopach lutowniczych (poza określonymi wyjątkami) nie może się znajdować ołów, który wcześniej stanowił 20-60% ich zawartości:

Używano stopów np:

Sn63Pb37 (183 °C)

Sn62Pb36Ag2 (179 °C)

Obecnie w produkcji sprzętu elektronicznego stosuje się **stopy bezołowiowe**, w których skład wchodzi cyna z niewielkimi dodatkami srebra, miedzi, bizmutu i antymonu.

Temperatura topnienia stopów używanych przy lutowaniu bezołowiowym wynosi 215-230 °C.

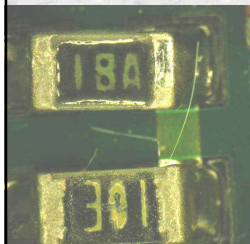
Najczęściej używa się :

SnAg3,5 (221 °C)

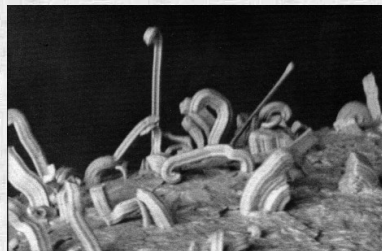
SnAg2,0 (221-226 °C)

SnCu0,7 (227 °C)

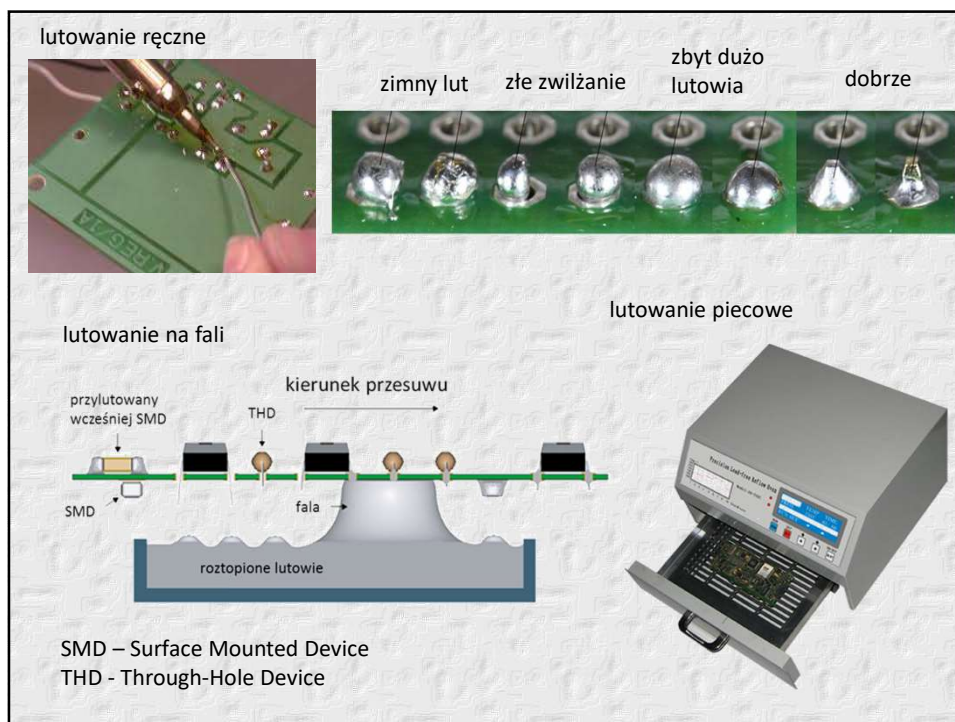
SnAg3,5Bi3,0 (206-213 °C)



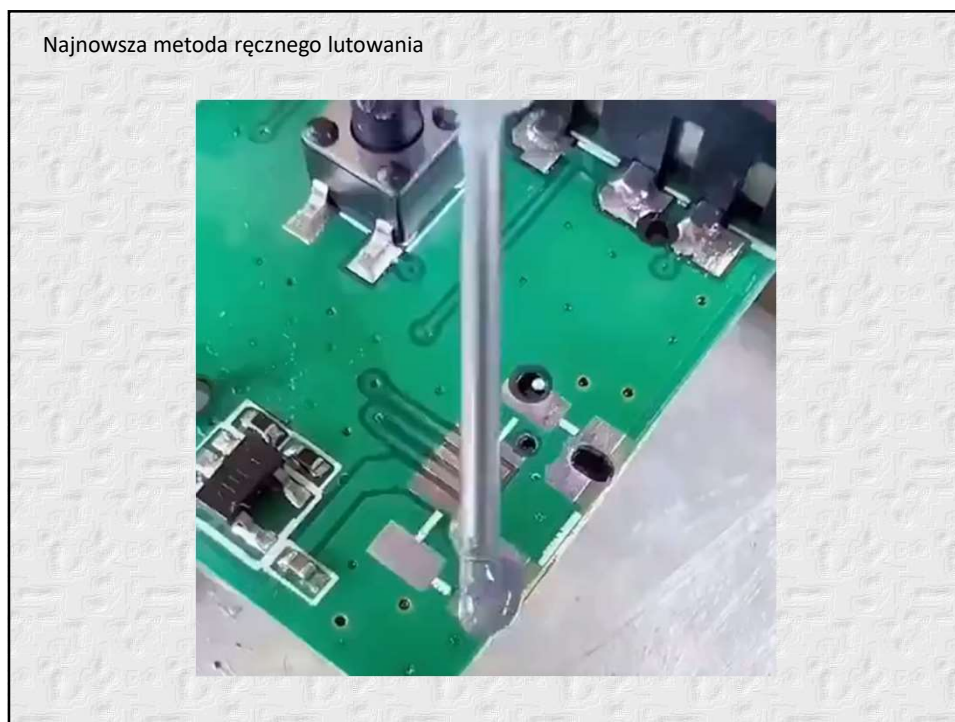
Wąsy cynowe



46



47



48

Spoiwa lutownicze twarde

brązowe	SBK31	2,8÷3,5% Si 1,0÷1,5% Mn reszta Cu	1015	łączy miedz, brąz i stopy niklu, spawanie elementów przyrządów elektrotechnicznych
miedziane	SMS1	0,5÷1,0% Ag reszta Cu	1070	łączy miedz, stal i spieki, spawanie przewodów elektrycznych
srebrne	LS70	69÷71% Ag 24÷26 Cu reszta Zn	715÷770	lutowanie połączeń o małej rezystancji, wykonanych z niklu, stopów niklu, miedzi i stopów miedzi
	LS71F	70,5÷71,5% Ag 0,8÷1,2 P reszta Cu	645÷795	lutowanie styków elektrycznych

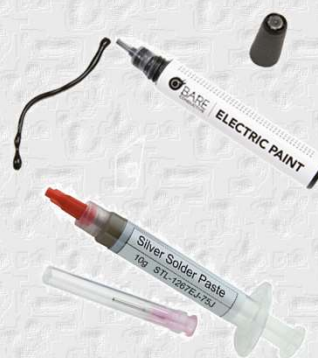
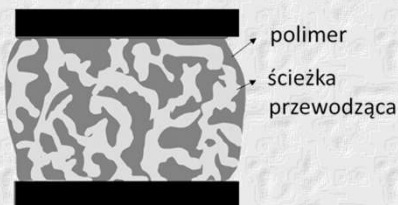
Stopy niskotemperaturowe

nazwa stopu	temp. top.	Bi	Pb	Sn	In	Cd	Tl	Ga	Sb
stop Rosa	98 °C	50%	25%	25%	–	–	–	–	–
Cerrosafe	74 °C	42,5%	37,7%	11,3%	–	8,5%	–	–	–
stop Wooda	70 °C	50%	26,7%	13,3%	–	10%	–	–	–
stop Fielda	62 °C	32,5%	–	16,5%	51%	–	–	–	–
Cerrolow 117	47.2 °C	44,7%	22,6%	8,3%	19,1%	5,3%	–	–	–
Bi-Pb-Sn-Cd-In-Tl	41.5 °C	40,3%	22,2%	10,7%	17,7%	8,1%	1,1%	–	–
Galinstan	-19 °C	<1,5%	–	9,5- 10,5%	21-22%	–	–	68-69%	<1,5%

49

Kleje przewodzące wytwarza się na bazie żywicy i srebra

Właściwości	Jednostka	Wartość
sposób utwardzania	–	chemiczny
Zakres temperatur pracy ciągłej	[°C]	od -40 do +140
Rezystywność po utwardzeniu	[Ω x m]	(2 - 8) · 10 ⁻⁶
Wytrzymałość mechaniczna spoiny na ścinanie	[N/mm ²]	18 - 22



Połączenia klejone z czasem pogarszają swe własności przewodzące – stosuje się je dość rzadko i tylko wtedy gdy nie ma możliwości stosowania innych rodzajów połączeń

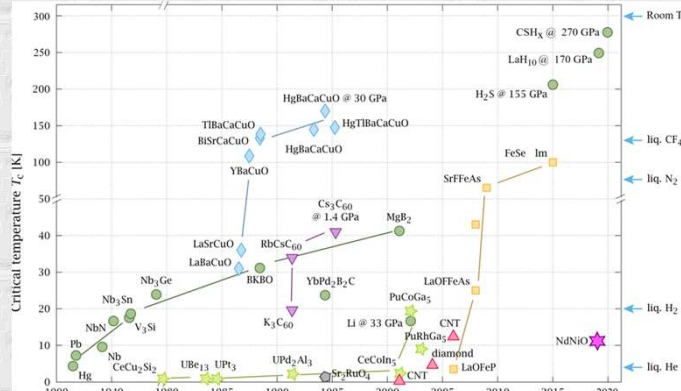
50

Nadprzewodniki

Są to materiały zdolne do osiągnięcia zerowej rezystancji (kolektywne zjawiska kwantowe nośnikami nie są pojedyncze elektrony ale pary Coopera)

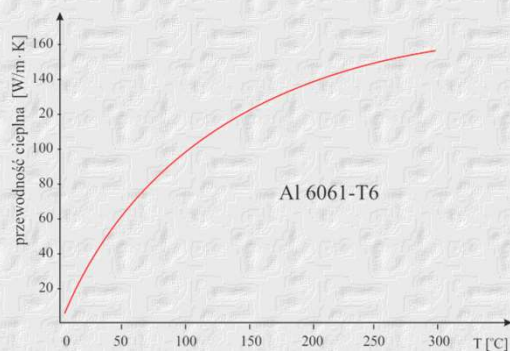
materiały takie są też idealnymi diamagnetykami w stanie nadprzewodzenia wypychając ze swej objętości linie sił pola magnetycznego (efekt Meissnera).

Nadprzewodnictwo jest obserwowane w różnorodnych materiałach takich jak: rtęć (po raz pierwszy - wykryte w 1911 przez Kamerlingha Onnesa), cyna i ołów, stopach, ceramikach tlenkowych i w materiałach organicznych.



51

Przewodność cieplna



Przewodność cieplna to zdolność substancji do przewodzenia ciepła.

W tych samych warunkach więcej ciepła przepłynie przez substancję o większej przewodności cieplnej. Własność ta charakteryzowana jest współczynnikiem proporcjonalności λ .

$$Q(t) = \lambda \frac{S \Delta T t}{d}$$

Q – ilość ciepła przepływająca przez ciało w czasie t

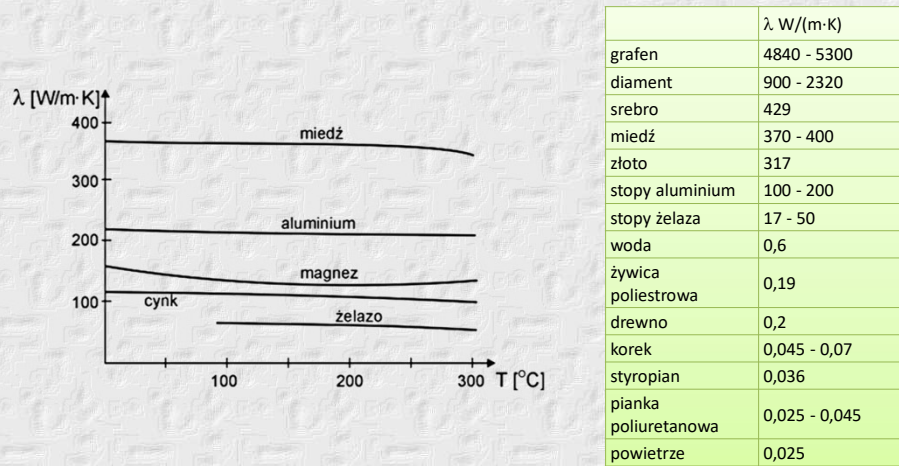
S – pole przekroju próbki przez który przepływa ciepło

ΔT – różnica temperatur w kierunku przewodzenia ciepła

d – grubość próbki

52

Przewodność cieplna wybranych materiałów

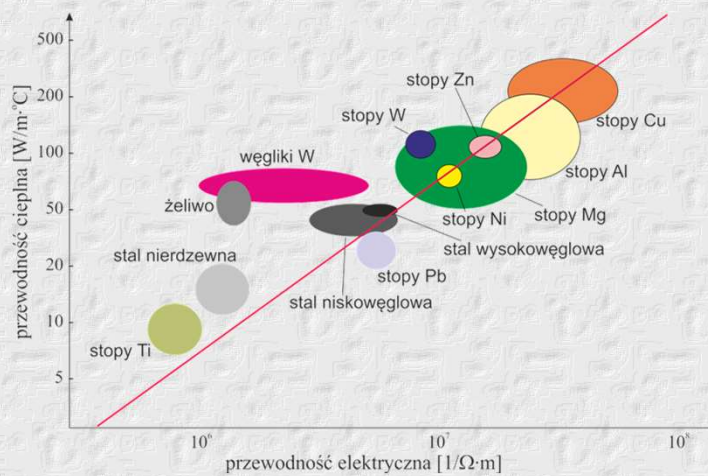


53

prawo Wiedemanna – Franza
związek między własnościami elektrycznymi a termicznymi materiałów

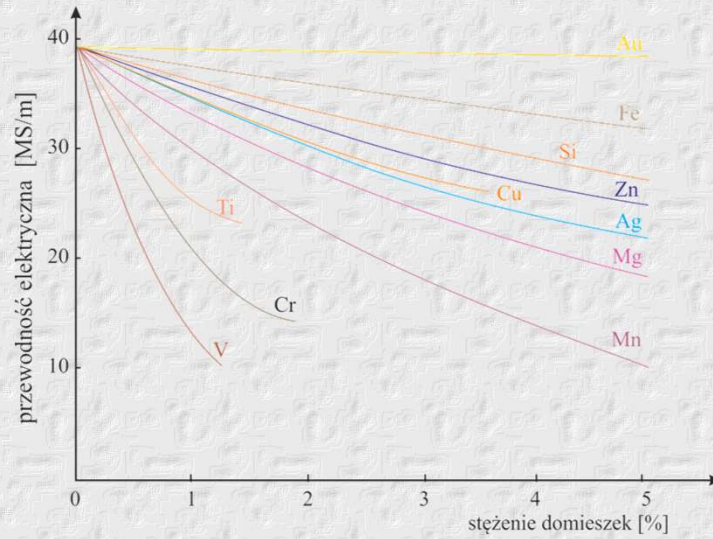
$$LT = \frac{\lambda}{\sigma} \quad L = 2,45 \cdot 10^{-8} \text{ [W}\Omega\text{K}^{-2}\text{]}$$

współczynnik L jest nazywany liczbą Lorentza



54

Domieszki pogarszają przewodnictwo elektryczne i cieplne metali



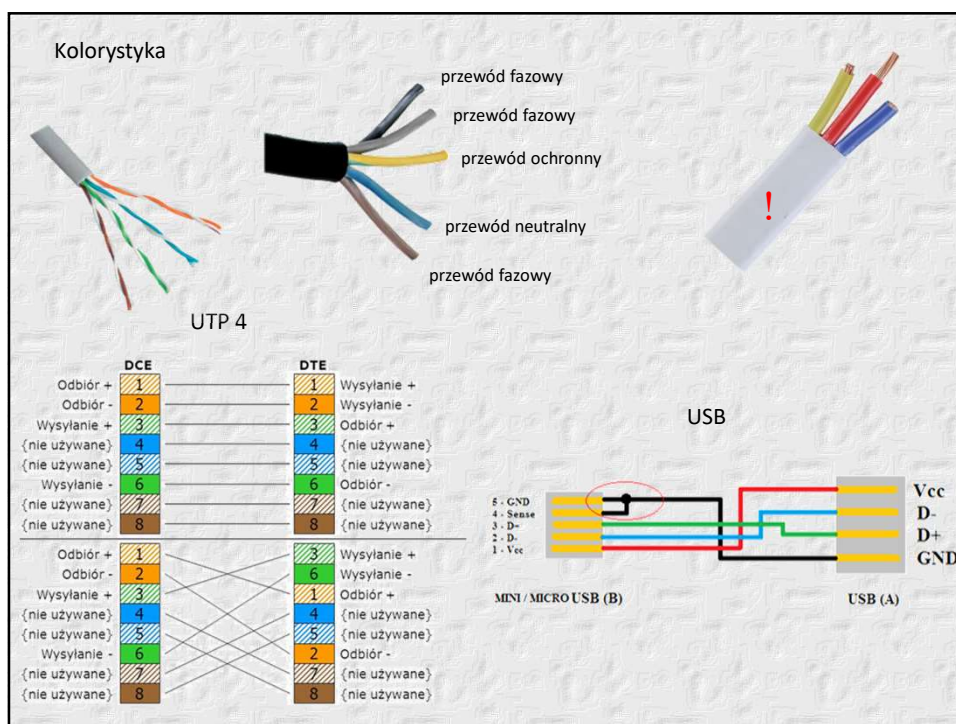
55

Zastosowania materiałów przewodzących

56



57



58

Zjawisko naskórkowości

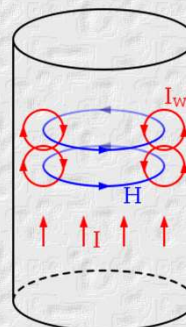
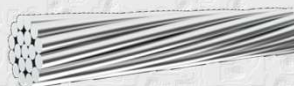
Prąd przemienny płynący w przewodniku powoduje powstawanie prądów wirowych. Mają one, w centralnej części przewodnika kierunek przeciwny do prądu w przewodniku, który je wzbudza. W efekcie w centralnej części przewodu przepływ prądu jest mniejszy, a w skrajnych sytuacjach nawet odwrócony

Podstawowym parametrem opisującym naskórkowość jest głębokość wnikania zwana też głębokością dyfuzji magnetycznej.

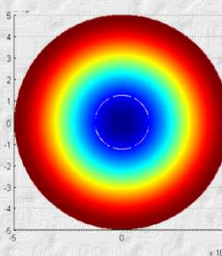
$$\delta \approx \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

μ – bezwzględna przenikalność magnetyczna przewodnika
 f – częstotliwość prądu

Głębokość wnikania - odległość od powierzchni przewodu, na której gęstość prądu osiąga wartość $1/e$ (~ 37%) swojej wartości maksymalnej.



$R = 0,5 \text{ mm}$ $i = 1 \text{ A}$ $f = 50 \text{ Hz}$



59

Porównanie parametrów najbardziej rozpowszechnionych materiałów przewodowych

parametr	oznaczenie	jednostka	Al	Cu
konduktywność	σ	MS/m	34,5	55-56
gęstość	ρ	kg/m ³	2700	8930
wsp. rozszerzalności liniowej	α_L	1/K	$23 \cdot 10^{-6}$	$16,4 \cdot 10^{-6}$
wsp. rozszerzalności radialnej	α_R	1/K	$4 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-3}$
wytrzymałość na rozciąganie	R_R	MPa	150-170	250-500
przewodność cieplna	λ	W/mK	200	380
ciepło właściwe	c_W	J/kgK	930	380
temp. topnienia	T_{top}	K	660	1356

Należy pamiętać o **zjawisku pełzania Al**.

Pełzanie to wzrost odkształceń przy niezmiennych naprężeniach

Pełzanie prowadzi do obluźniania styku -> wzrost rezystancji przejścia -> silniejsze nagrzanie i intensywniejsze utlenianie powierzchni stykowych -> przerwa w obwodach małej mocy lub wytopienie styku w obwodach dużej mocy

konieczność stosowania stalowych podkładek sprężynujących

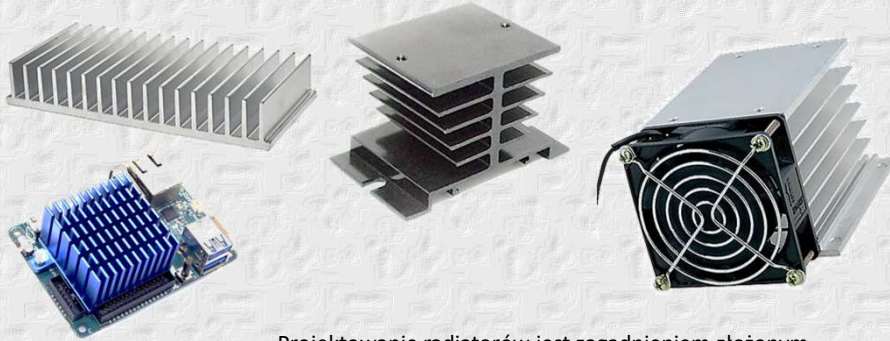
60

Radiatory

Radiator jest bryłą z materiału o wysokiej przewodności cieplnej i rozwiniętej powierzchni od strony zewnętrznej maksymalizującej oddawanie ciepła.

Radiatory wykonuje się najczęściej z aluminium lub miedzi.

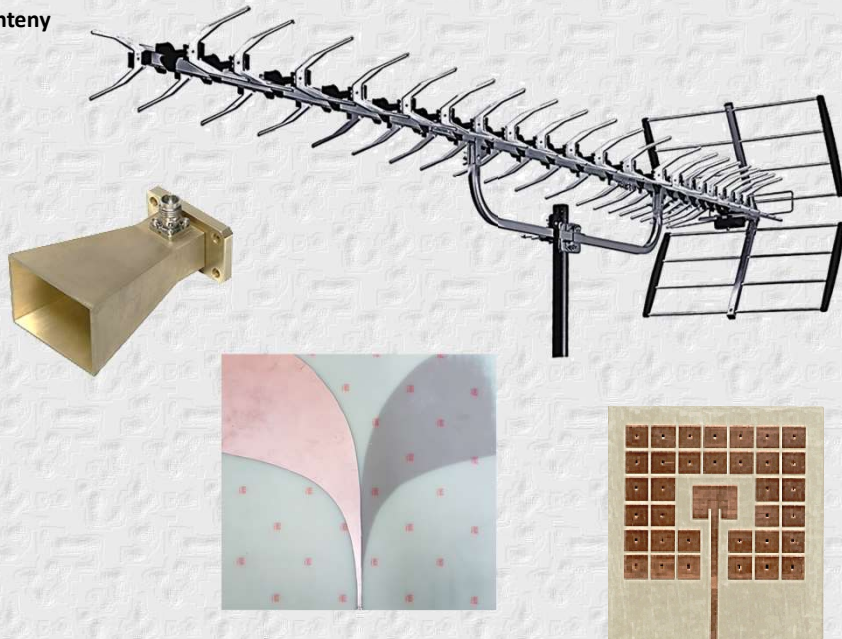
Są konieczne jeśli duża ilość ciepła wydzielana jest na niewielkiej powierzchni elementu.



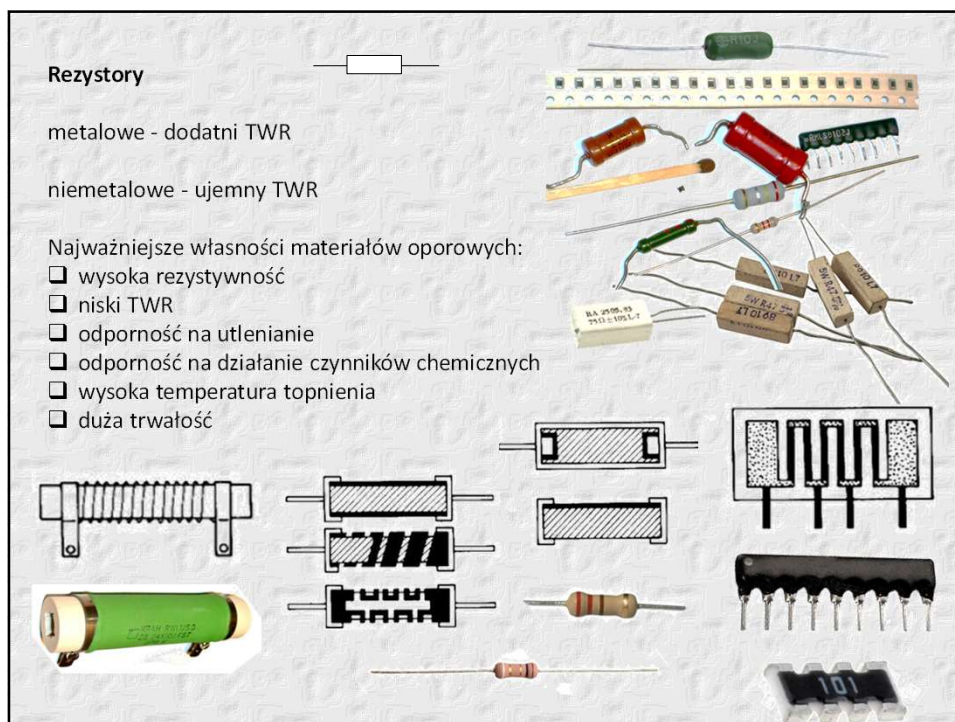
Projektowanie radiatorów jest zagadnieniem złożonym - zasadniczo może stanowić temat odrębnego wykładu

61

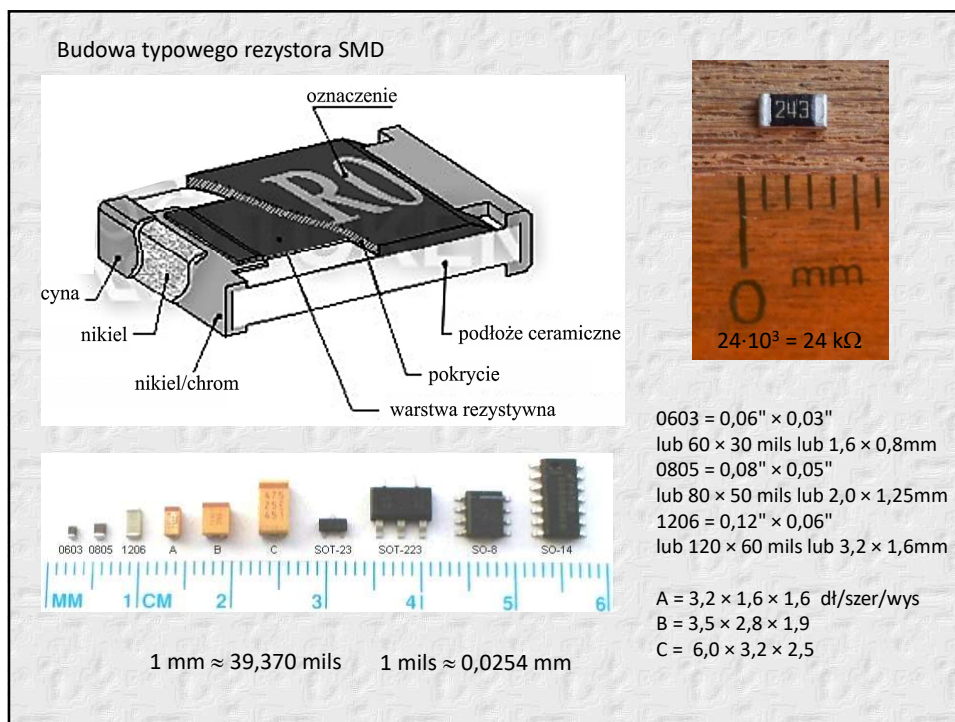
Anteny



62



63



64

Własności materiałów oporowych

		gęstość [g/cm ³]	rezystywność temp. pok. [Ω m]	l. wsp. rozsz. [1/K]	temp. topn. [°C]
stopy Cu	konstantan	8,9	$0,5 \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	1225-1300
	manganin 86Cu12Mg2Ni	8,4	$(0,43-0,48) \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	960
	miedzionikle	8,9	$(0,19-0,5) \cdot 10^{-6}$	10^{-5}	-
stopy Ni	chromonikieliny	8,4	$(1,0-1,5) \cdot 10^{-6}$	$14 \cdot 10^{-6}$	1400
stopy Fe	kantale	7,1-7,9	$(1,04-1,45) \cdot 10^{-6}$	$(14-18) \cdot 10^{-6}$	~1450
ceramika	sylity (SiC+Si+gliceryna)	2,5-2,9	10^{-3}	$4,5 \cdot 10^{-6}$	~1800



65

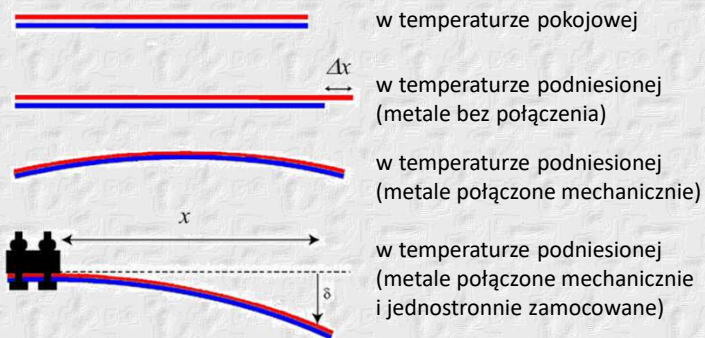
Bimetale

- trwałe mechaniczne połączenie dwóch metali lub stopów o możliwie najbardziej różnych rozszerzalnościach cieplnych.

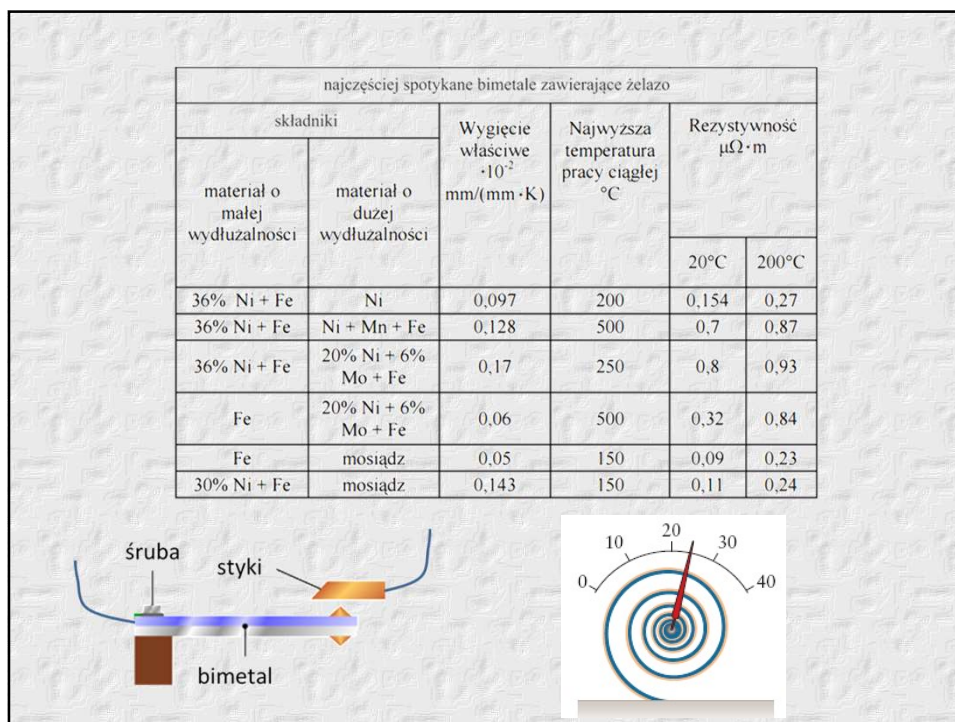
Najczęściej wykorzystuje się stopy **żelaza i niklu**

Powszechnie wykorzystywanym bimetalem nie zawierającym żelaza jest **kupal (Cu+AL)**. Zawiera on zwalcowane na gorąco warstwę aluminium i jedną lub dwie warstwy miedzi.

Stosowany jest do budowy torów przewodowych wysokiej częstotliwości, radiatorów oraz na złącz przewodów elektrycznych wykonanych z tych metali (celem eliminacji korozji elektrochemicznej).



66



67

Cewki indukcyjne

Gromadzą energię w postaci pole magnetyczne – zachowują się jak magnesy

Cewką nazywa się szereg pętli przewodzących.

Podstawowym parametrem cewki jest indukcyjność L czyli zdolność do wytwarzania strumienia magnetycznego Φ

$$\Phi = L \cdot i$$

Indukcyjność prostego przewodu: $L_{pp} \approx 0,0046 \cdot l \cdot \log \frac{1,47 \cdot l}{d}$

Indukcyjność pojedynczej pętli: $L_{petli} \approx 0,0145 \cdot D \cdot \log \frac{1,08 \cdot D}{d}$

68

Indukcyjność cewki powietrznej o stałym D :
$$L_{\text{cewki}} \approx 0,01 \frac{Dn^2}{\frac{l_c}{d} + 0,45}$$

Indukcyjność wyraża się w Henrach [H]

$$[H] = \left[\frac{\text{Wb}}{\text{A}} \right] = \left[\frac{\text{Vs}}{\text{A}} \right] = \left[\frac{\text{s}^2}{\text{F}} \right] = [\Omega\text{s}]$$

Chwilowe napięcie elektryczne u_L występujące na cewce o indukcyjności własnej L jest zależne od chwilowego prądu i płynącego przez tę cewkę:

$$u_L = L \frac{di}{dt}$$

Reaktancja $X_L = \omega L = 2\pi f L$



Jeśli prąd nie zmienia się w czasie to napięcie wynosi 0 (zwarcie).

Jeśli cewka ma blokować prądy wysokiej częstotliwości nazywana jest często dławikiem

69

Indukcyjność cewki można znacznie zwiększyć poprzez zastosowanie rdzeni o wysokiej przenikalności elektrycznej.

Dla jednowarstwowej cewki z rdzeniem otwartym:

$$L \approx \frac{S\mu n^2}{l}$$



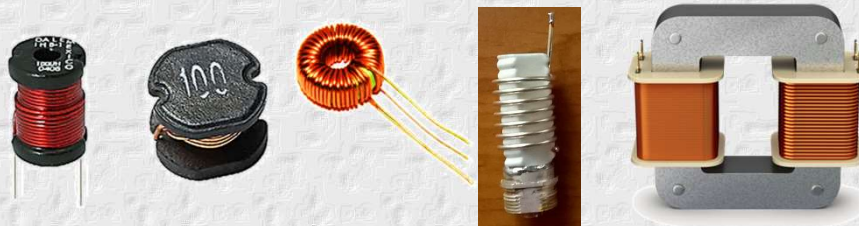
S - pole przekroju poprzecznego cewki

μ - bezwzględna przenikalność magnetyczna materiału rdzenia

n - liczba zwojów

l - długość cewki

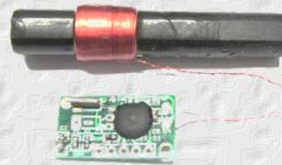
Cewki wielowarstwowe oraz z rdzeniem o bardziej złożonym kształcie wymagają indywidualnego podejścia.



70

Rdzenie ferrytowe

f (MHz)	0,1	1	10	100
ρ [Ωm] dla MnZn	≈ 2	$\approx 0,5$	$\approx 0,1$	$\approx 0,01$
ρ [Ωm] dla NiZn	$\approx 10^5$	$\approx 5 \cdot 10^4$	$\approx 10^4$	$\approx 10^3$



f (MHz)	0,001	0,01	0,1	1	10	100
względna przenikalność elektryczna dla MnZn	-	-	$\approx 2 \cdot 10^5$	$\approx 10^5$	$\approx 5 \cdot 10^4$	$\approx 10^4$
względna przenikalność elektryczna dla NiZn	≈ 100	≈ 50	-	≈ 25	≈ 15	≈ 12

Względna przenikalność magnetyczna ferrytów zależy od pola magnetycznego i dochodzi do 10^4

Ferryty znajdują liczne zastosowania – **więcej przy omawianiu materiałów ceramicznych**



71

Współczynnik AL pozwala obliczyć indukcyjność cewki z rdzeniem

Współczynnik ten jest podawany w nH



Cewka o indukcyjności 1 mH na rdzeniu AL 1000 będzie wymagała

$$N = \sqrt{\frac{1 \text{ [mH]}}{1000 \text{ [nH]}}} \sqrt{\frac{10^6 \text{ [nH]}}{10^3 \text{ [nH]}}} = \sqrt{10^3} = 31,6 \rightarrow 37 \text{ zwojów}$$

W niektórych katalogach zamiast wartości AL można znaleźć wartość analogicznego parametru α . Informuje on ile zwojów należy nawinąć na rdzeń, aby uzyskać indukcyjność równą 1 mH.

$$\alpha = \frac{N}{\sqrt{L}} = \frac{1000}{\sqrt{AL}}$$

Własności ferrytów omówione będą dokładniej w dalszej części wykładu

72

Kondensatory



Kondensator stanowią dwie odizolowane płyty przewodzące (okładki) gromadzące energię w postaci pola elektrycznego (gromadzące ładunki)

Kondensatory charakteryzuje się pojemnością C wyrażaną w faradach [F]. Jest to współczynnik proporcjonalności prądu chwilowego do zmian napięcia.

$$i_c = C \frac{du}{dt} \quad X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

Jeśli napięcie nie zmienia się w czasie to prąd nie płynie – reaktancja jest nieskończenie wielka (rozwarcie)

Pojemność kondensatora oblicza się z zależności: $C = \varepsilon \frac{S}{d}$

S - pole powierzchni okładki (wspólne z drugą okładką)

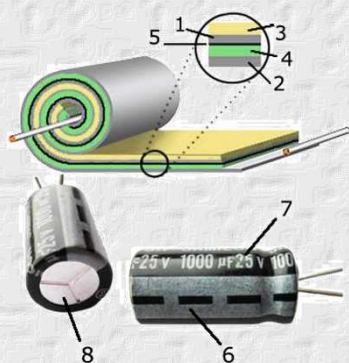
ε – bezwzględna przenikalność elektryczna izolatora okładek

d – odległość okładek

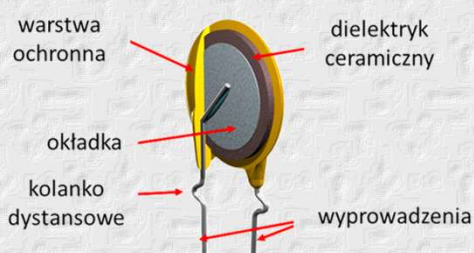
73

Jako materiały izolujące stosuje się:

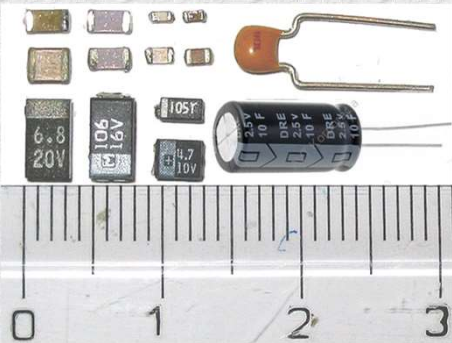
- powietrze
- papier
- papier nasączony elektrolitem
- ceramikę ferroelektryczną



- 1,2 folia Al.
- 3 izolator (zwykle papier)
- 4 elektrolit
- 5 tlenek Al.
- 6 oznaczenie minusa (elektrolit!)
- 7 oznaczenie pojemności - napięcia znamionowego
- 8 obudowa z zabezpieczeniem



74



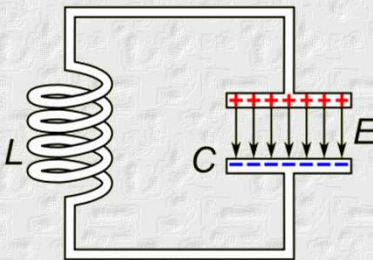
obudowa	dł x szer x wys (mm)
A	3,2 × 1,6 × 1,6
B	3,5 × 2,8 × 1,9
C	6,0 × 3,2 × 2,5
D	7,3 × 4,3 × 2,8
E	7,3 × 6,0 × 3,6



1, 2 – tantalowe; 3, 4 – elektrolityczne;
 5, 6, 7 - ceramiczne (rozm. Jak dla rezystorów);
 8 - porcelanowy RF (wysokie Q) RF;
 9 – trymer;
 (rezystor 0,125 W dla porównania rozmiarów)

75

Połączenie cewki i kondensatora



$$W_{L\max} = \frac{LI^2}{2}$$

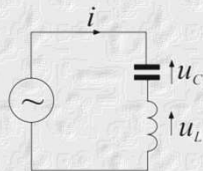
$$W_{C\max} = \frac{CU^2}{2}$$

Dla częstotliwości, dla której reaktancje indukcyjna i pojemnościowa są równe wymiana energii jest najbardziej efektywna tj. płynie największy prąd – następuje rezonans:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \rightarrow f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

76

Dwa rodzaje obwodów rezonansowych – zależne od sposobu dołączenia źródła



szeregowy
w rezonansie

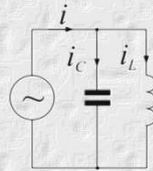
$$u_L + u_C = 0$$

rezonans napięć

$$i = \max$$

zwarcie

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



równoległy
w rezonansie

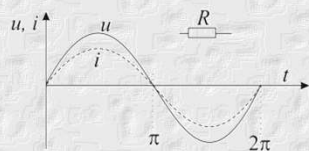
$$i_L + i_C = 0$$

rezonans prądów

$$i = 0$$

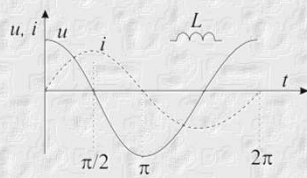
rozwarcie

77



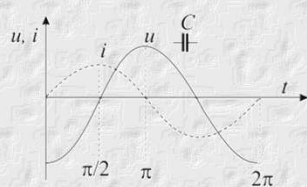
$$i = I_{\max} \sin(\omega t)$$

$$u = Ri \quad R = \frac{u}{i}$$



$$u = L \frac{di}{dt} = LI_{\max} \omega \cos(\omega t) = LI_{\max} \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

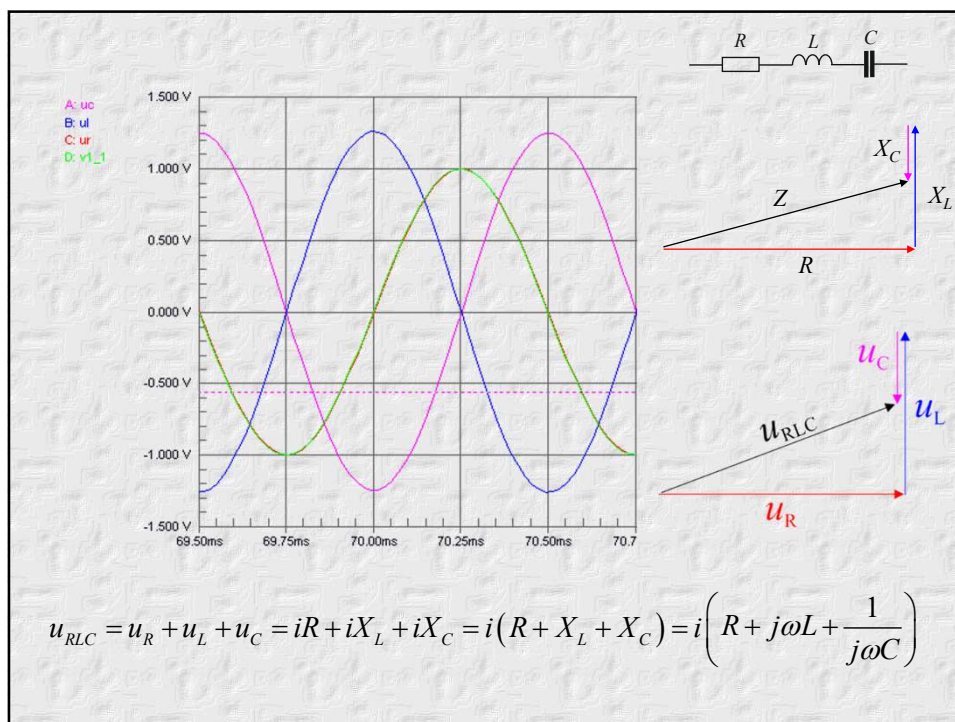
$$X_L = \frac{u}{i} = j\omega L \quad j = \sqrt{-1}$$



$$i = C \frac{du}{dt} \rightarrow u = \frac{1}{C} \int i dt = -\frac{I_{\max}}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$X_C = \frac{u}{i} = -j \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{j\omega C}$$

78



79

Termopary (termoogniwa, termoelementy, ogniwa termoelektryczne)

Zasada działania oparta jest na zjawisku Seebecka:
 liczba elektronów swobodnych w metalu zależy od temperatury, a zatem na końcu zimniejszym koncentracja elektronów będzie wyższa - powstanie różnica potencjałów.

The diagram shows a rectangular bar representing a thermocouple. The left end is labeled 'koniec gorący' (hot end) and is shaded red. The right end is labeled 'koniec zimny' (cold end) and is shaded blue. A horizontal arrow labeled 'napięcie' (voltage) points from the hot end to the cold end. Inside the bar, there are many small circles with '+' signs (representing positive ions) and many small dots (representing free electrons). The density of electrons is higher at the cold end than at the hot end.

Łącząc dwa różne metale można to zjawisko wzmocnić, ponieważ istnieją przewodniki o ujemnym i dodatnim współczynniku Seebecka.

Termoparę stanowią dwa przewodniki połączone na końcach.

Napięcie na termoparze zależy od iloczynu różnicy współczynników Seebecka oraz różnicy temperatur.

$$V = (S_A - S_B)(T_B - T_A)$$

80

przewodnik	wsp. Seebecka [μV/K]
antymon	47
molibden	10
nikiel	-15
konstantan	-35
bismut	-72
miedź	1,2

termopara	wsp. Seebecka [μV/K]
chromel* - konstantan	60
żelazo - konstantan	51
miedź - konstantan	40
chromel – alumel**	40

* stop 90% Ni + 10% Cr)

** stop Ni + 2,5% Al + ~2% Mg + 2% Si
+ dodatki stopowe Fe, Co ...

Termopary wykorzystuje się jako czujniki temperatury do temperatur dochodzących nawet do 2300 °C, rzadziej jako źródło zasilania o bardzo niskim napięciu i relatywnie wysokim prądzie (niemal zwarcie).

Zalety:

wysoka temperatura pracy ciągłej
wysoka odporność na czynniki zewnętrzne
generatywność
niski TWR
stałość parametrów w czasie
prostość konstrukcji

Wady:

mechaniczna nietrwałość złącza
niskie wartości wsp. Seebecka
(w metalach – w półprzewodnikach mogą sięgać 2000)

81

Zjawisko Thomsona (Kelwina)

W przewodniku z gradientem temperatury, przez który płynie prąd wydzielą się lub jest pochłaniane ciepło (niezależnie od ciepła Joule'a-Lentza).

Gradient temperatury wywołuje różnicę koncentracji nośników i odpowiadające jej wewnętrzne pole elektryczne. Jeżeli jego kierunek jest zgodny z polem wywołującym prąd (zewnętrznym), to pole wewnętrzne wspomaga dryft nośników kosztem cieplnej energii atomów przewodnika, co prowadzi do jego ochładzania.

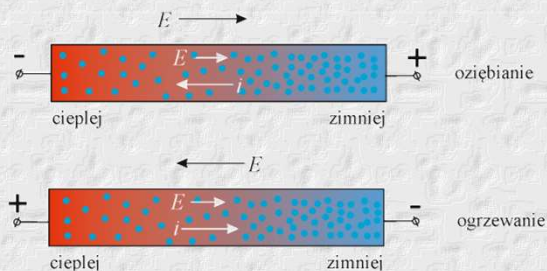
Jeśli pola mają kierunek przeciwny, to pole wewnętrzne wykonuje dodatkową pracę, co wiąże się z wydzielaniem dodatkowego ciepła.

$$Q = -\kappa j \Delta T$$

κ – współczynnik Thomsona

ΔT – zmiana temperatury

j – gęstość prądu



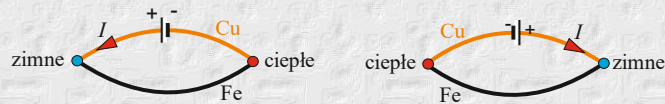
82

Efekt Peltiera

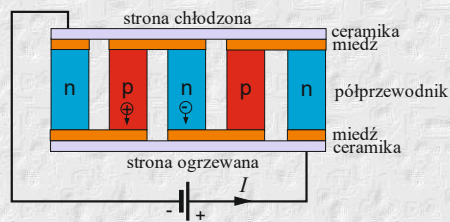
Efekt przeciwny do Seebecka - zachodzi na granicy dwóch różnych przewodników (półprzewodników) połączonych dwoma złączami.

Przewodniki są tak dobrane, że podczas przepływu prądu jedno ze złącz się ogrzewa, a drugie ochładza.

Po zmianie kierunku przepływu prądu na przeciwny, zjawisko ulega odwróceniu.



Efekt Peltiera na złączach półprzewodnikowych jest znacznie silniejszy niż na metalowych



od -40 do +200 °C

83

Zjawiska termoelektryczne Seebecka, Thomsona i Peltiera łączy relacja Thomsona:

$$\kappa = \frac{d\Pi}{dT} - S \quad \kappa = T \frac{dS}{dT}$$

$$\Pi = TS$$

κ – współczynnik Thomsona

Π – współczynnik Peltiera

S – współczynnik Seebecka

T – temperatura

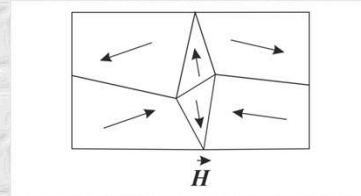
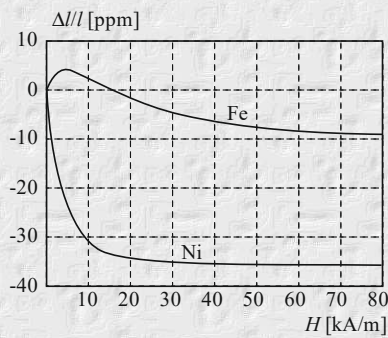
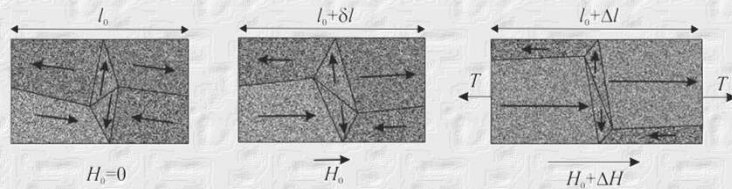
Zjawiska termoelektryczne są szczególnie silnie w półprzewodnikach.

Zjawisko Peltiera wykorzystywane jest w chłodziarkach termoelektrycznych.

84

Magnetostrykcja

Odkrycie Joule'a. Zmiana geometrii ferromagnetyków pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego.



85

W konkretnym kierunku magnetostrykcja opisywana jest równaniem macierzowym:

$$\begin{bmatrix} S \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C^H & d \\ d^* & \mu^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T \\ H \end{bmatrix}$$

$S = \Delta l/l$ wydłużenie względne elementu o długości l w wybranym kierunku

C^H współczynnik sprężystości w danym kierunku przy stałej wartości natężenia pola magnetycznego H działającego w tym kierunku

μ^T przenikalność magnetyczna materiału w wybranym kierunku przy stałym naprężeniu osiowym T

$d \approx d^*$ współczynniki magnetostrykcji w danym kierunku

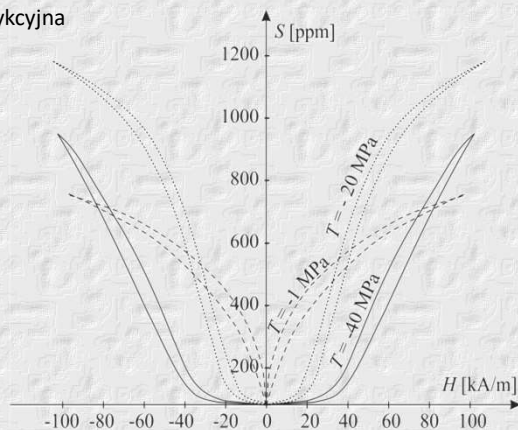
Magnetostrykcję opisuje się też za pomocą współczynnika sprzężenia magnetomechanicznego.

$$k = \frac{E_{mM}}{\sqrt{E_m E_M}} = \frac{d}{\sqrt{C^H \mu^T}}$$

E_{mM} jest wewnętrzną energią sprzężenia mechaniczno-magnetycznego, E_m energią mechaniczną, E_M energią magnetyczną. Wartość tego współczynnika waha się od 0,5 nawet do ok. 0,97 dla szkieł metalicznych.

86

Histeresa magnetostrykcyjna



Dla dostatecznie małych odkształceń i pól magnetycznych:

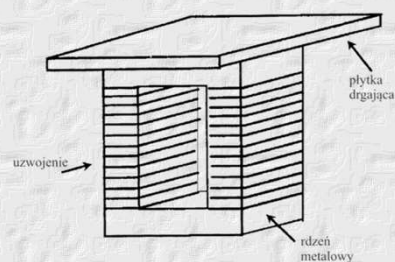
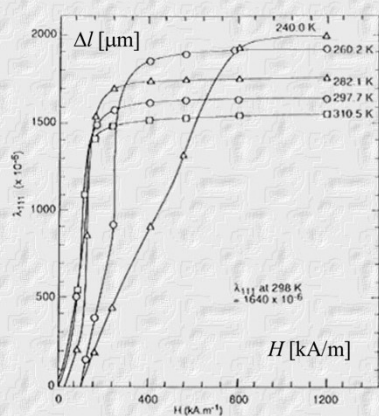
$$\frac{\Delta l}{l} = dB^2$$

B – indukcja magnetyczna

87

Terfenol-D – najsilniej magnetostrykcyjny stop metali o składzie $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$ ($x \approx 0,3$)

opracowany w latach 70. XX wieku w Naval Ordnance Laboratory



Sonarowy przetwornik ultradźwiękowy
Osiąga się częstotliwości do ok. 100 kHz –
dwukrotność częstotliwości prądu
wzbudzającego i bardzo wysokie wartości
mocy akustycznej.

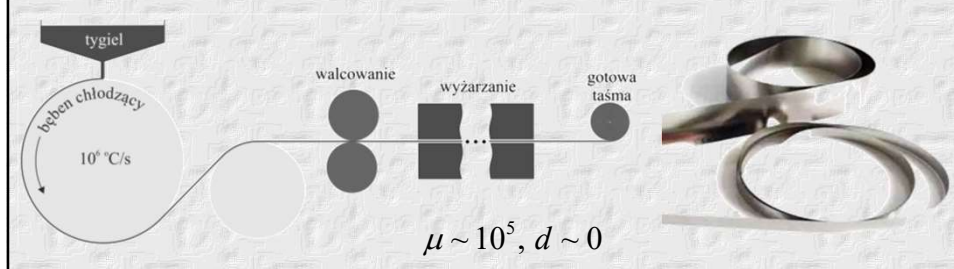
Zjawisko stosuje się także w czujnikach magnetyczno-mechanicznych.

88

Magnetostrykcja wybranych materiałów

materiał	maksymalne osiągnięte wydłużenie względne $\cdot 10^{-6}$ [m]
Fe	-7
Ni	-33
Co	-62
CoFeO ₄	-110
Galfenol Fe _{1-x} Ga _x $x \approx 0,12 - 0,33$	400
SmFe ₂	-1560
TbFe ₂	1753
Terfeol-D Tb _x D _{1-x} Fe ₂ $x \approx 0,3$	2400

Magnetostrykcja jest odpowiedzialna za brzęczenie transformatorów – poszukuje się zatem materiałów o zerowej magnetostrykcji i wysokiej przenikalności



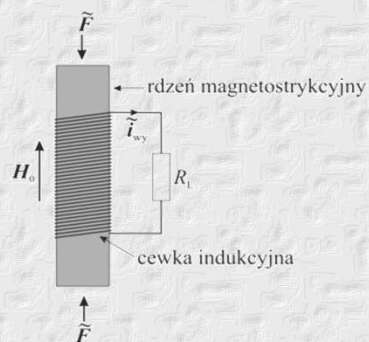
89

Efekt Villariego

Deformacja mechaniczna ferromagnetyka wywołana działaniem siły zewnętrznej skutkuje zmianą rozmiarów domen i podatności magnetycznej ferromagnetyka lub jego stanu namagnesowania.

Generator magnetostrykcyjny

Zmienna siła powoduje zmianę podatności magnetycznej rdzenia cewki i tym samym zmianę przechodzącego prądu strumienia magnetycznego. Zmiana strumienia na zasadzie indukcji generuje prąd w cewce.



90

dielektryki czyli izolatory

Są to materiały **bardzo słabo przewodzące prąd elektryczny** z powodu niskiej koncentracji lub niskiej ruchliwości ładunków swobodnych. W dielektrykach rzeczywistych obydwie te cechy występują zwykle równocześnie.

1

Podział materiałów dielektrycznych stosowanych w elektrotechnice według Międzynarodowej Komisji Elektrotechnicznej (IEC):

gazy szlachetne i nieszlachetne

dielektryki ciekłe

dielektryki stałe organiczne

łatwotopliwe

dielektryki wielkocząsteczkowe nieobrabialne cieplnie

termoplasty

duroplasty

dielektryki stałe nieorganiczne

nietopliwe

stapialne

wypalane

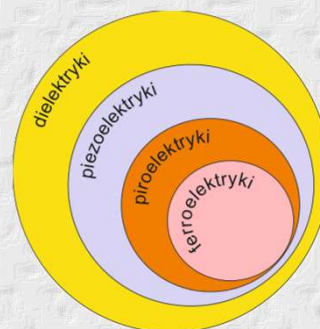
dielektryki stałe o polaryzowalności specjalnej

ferroelektryki

elektrety

piezoelektryki

piroelektryki



2

Podstawowe parametry techniczne charakteryzujące dielektryki

Parametry elektryczne:

polaryzowalność
 przenikalność elektryczna (in. stała dielektryczna)
 współczynnik strat (tangens kąta stratności)
 przewodnictwo właściwe (prąd upływu)
 czas relaksacji
 wytrzymałość na przebicie (wytrzymałość elektryczna)

Parametry magnetyczne

przenikalność magnetyczna
 Podatność magnetyczna

Parametry termiczne:

temperatura Curie
 temperatura topnienia

Parametry optyczne/mikrofalowe:

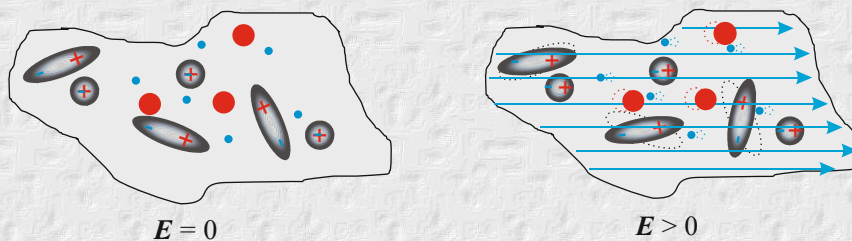
współczynnik transmisji/absorpcji
 dyspersja
 kolor
 indeks refrakcji

Parametry mechaniczne:

gęstość
 stała Poissona
 moduł sprężystości
 stała Poissona

3

Od strony makroskopowej w dielektryku istnieją ładunki obydwu znaków. Przy braku pola elektrycznego środek ciężkości wszystkich ładunków obu znaków jest w tym samym punkcie i dielektryk nie wykazuje żadnych własności elektrycznych



W polu elektrycznym E układ ten ulega deformacji co powoduje powstawanie ustawionego w kierunku pola, makroskopowego **momentu dipolowego**

$$\mu_M = \alpha_M E$$

E – zewnętrzne pole elektryczne

α_M – polaryzowalność makroskopowa materiału

4

polaryzowalność mogą umożliwiać różne mechanizmy

polaryzowalność deformacyjna α_d

- elektronowa $\Rightarrow$ przesunięcie chmury elektronowej względem jądra
- atomowa $\Rightarrow$ zmiana położeń atomów w molekule

polaryzowalność orientacyjna α_{dip}

- dipolowa $\Rightarrow$ zgodna orientacja trwałych dipoli molekularnych

polaryzowalność ładunków swobodnych α_{sc}

- przemieszczenie ładunków swobodnych w dielektryku

polaryzowalność materiału jest sumą polaryzowalności składowych

$$\alpha_M = \alpha_d + \alpha_{dip} + \alpha_{sc}$$

5

Wektorem polaryzacji $\mathbf{P}$ nazywa się wektorową sumę momentów dipolowych przypadających na jednostkę objętości:

$$\mathbf{P} = \frac{\mathbf{m}}{V} = \frac{N}{V} \langle \mathbf{m} \rangle_E$$

$\mathbf{m}$ - całkowity moment dipolowy molekuły

N - liczba molekuł w dielektryku

$\langle \mathbf{m} \rangle_E$ - rzut na kierunek pola $\mathbf{E}$

Całkowity wektor polaryzacji składa się z sumy wektorów polaryzacji deformacyjnej (elektronowej i atomowej) i orientacyjnej (dipolowej)

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}^{def} + \mathbf{P}^{or} = \mathbf{P}_e + \mathbf{P}_a + \mathbf{P}_d$$

W bardzo silnych polach elektrycznych praktycznie wszystkie dipole mają orientację zgodną z kierunkiem pola - dalsze zwiększanie natężenia pola elektrycznego nie może zwiększyć polaryzacji orientacyjnej. Stan taki nazywa się **nasyceniem**.

Polaryzacja deformacyjna nie doznaje nasycenia.

6

Indukcja elektryczna (przesunięcie elektryczne)

Opisuje pole elektryczne wewnątrz dielektryka zaindukowane przez zewnętrzne pole elektryczne

Pod wpływem pola zewnętrznego dochodzi w dielektryku do rozsunienia ładunków dodatnich i ujemnych (ładunek indukowany).

Wektor indukcji elektrycznej jest zgodny co do kierunku z wektorem pola zewnętrznego i co do długości równy stosunkowi ładunku indukowanego przez pole elektryczne na powierzchni ciała, do pola przekroju tej powierzchni.

Dla pola prostopadłego do powierzchni:

$$|D| = \frac{q}{S}$$

Jeśli pole elektryczne z powierzchnią tworzy mniejszy kąt α wówczas:

$$|D| = \frac{q}{S \cos \alpha}$$

7

Wektor indukcji elektrycznej jest sumą wektorów natężenia pola elektrycznego i polaryzacji

$$D = \varepsilon E + P$$

współczynnik ε nazywany jest przenikalnością elektryczną

Parametr ten charakteryzuje dielektryki

powietrze	1,0006
olej	2,0 – 2,4
papier	1,8 – 2,6
szkło	5,0 – 16
diament	12
alkohol etylowy	26
woda	81
tytanian baru	1 000 – 10 000

Stosunek polaryzowalności do przenikalności elektrycznej jest wielkością bezwymiarową zwaną **podatnością elektryczną**

$$\chi = \frac{\mu}{\varepsilon}$$

8

Po umieszczeniu dielektryka między okładkami kondensatora pole elektryczne w nim zawarte maleje ϵ razy

$$Q = C_0 U_0 = C \frac{U_0}{\epsilon}$$

a więc

$$C = \epsilon C_0 = \frac{\epsilon S}{d}$$

kondensator z dielektrykiem

kondensator bez dielektryka

Wprowadzenie dielektryka do naładowanego określonym ładunkiem kondensatora obniża jego energię (ponieważ maleje natężenie pola) - dielektryk jest wciągany w pole kondensatora

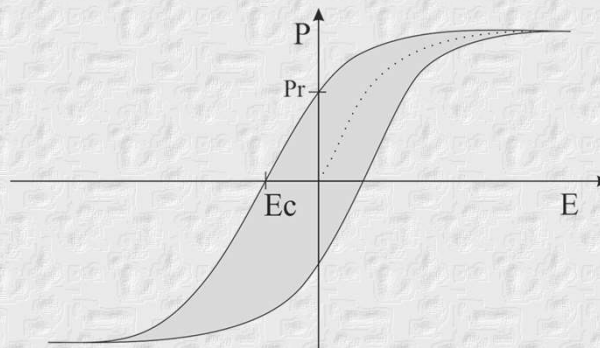
Dielektryki poprzeczne i podłużne

- w poprzecznych pole zewnętrzne ulega zmniejszeniu
- w podłużnych pozostaje bez zmian

9

Procesy polaryzacji dielektryków są dość wolne i w zmiennym polu elektrycznym może zdarzyć się, że polaryzacja dielektryka przestanie nadążać za zmianami pola

Zmiana polaryzacji wiąże się też ze **stratami energii**

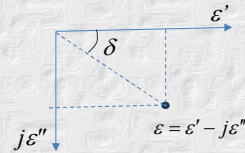


10

Straty energii w dielektryku związane są z różnymi procesami

Aby je wyrazić liczbowo wprowadzono zespoloną postać przenikalności elektrycznej

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$$

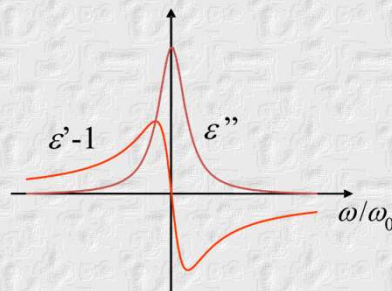


- tangens kąta strat:

$$\operatorname{tg} \delta \equiv \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{\varepsilon_s + \varepsilon_\infty \omega^2 \tau_D^2} \omega \tau_D$$

11

- przesunięcie przez pole elektryczne ładunków przeciwnych znaków, związanych ze sobą sprężystości, wywołuje polaryzację ośrodka,
- po usunięciu pola ładunki wracają do położeń równowagi wykonując drgania, które zanikają z szybkością określoną tłumieniem,
- gdy polaryzację deformacyjną wywołuje pole przemienne układ złożony z oscylatorów może przy pewnej charakterystycznej częstotliwości ω_0 absorbować energię
- jest to zjawisko analogiczne do rezonansu w obwodzie RLC



12

Wytrzymałość elektryczna dielektryków

Jeśli pole elektryczne w dielektryku przekroczy pewną wartość krytyczną następuje tzw. przebicie elektryczne czyli nagły przepływ prądu

Wartość krytycznego pola elektrycznego nazywana jest odpornością na przebicie.

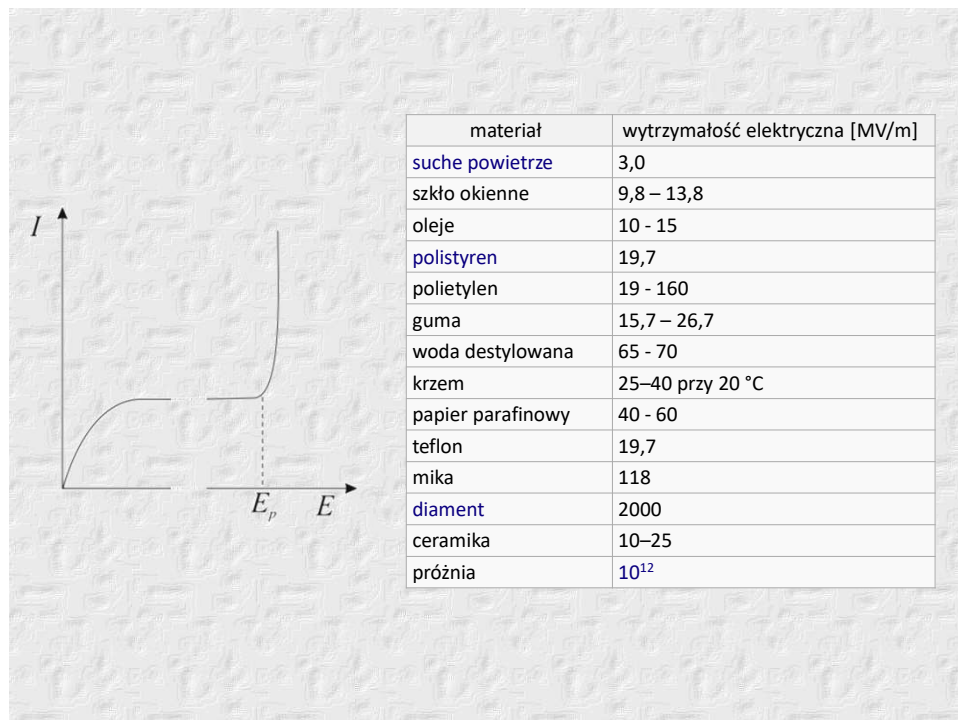
Parametr ten nie jest związany z innymi parametrami elektrycznymi dielektryka.

Jego wartość zależy od czystości, koncentracji defektów, ciśnienia, temperatury, wilgotności, geometrii dielektryka, rodzaju napięcia, kształtu elektrod i in.

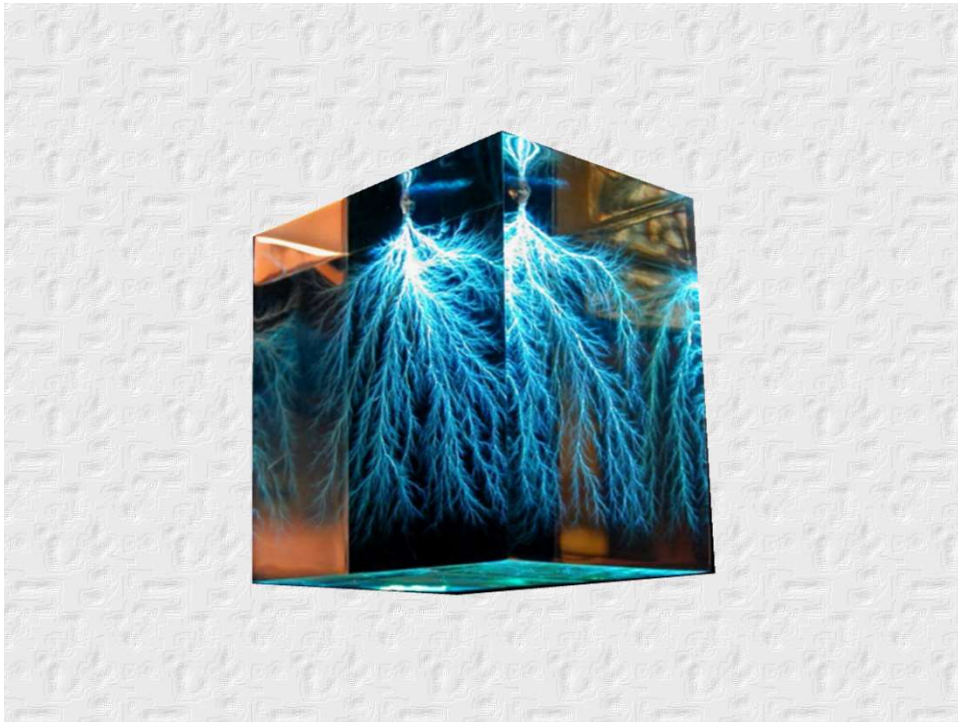
Istnieją cztery podstawowe mechanizmy przebicia:

- **termiczny** (ciepło => defekty => przewodnictwo => wzrost wydzielania ciepła...)
- **lawinowy** (przyspieszane nośniki => generacja nowych nośników => przyspieszane...)
- **wyładowczy** (łuk elektryczny w porach => erozja porów => powiększanie się łuku...)
- **elektrolityczny** (ścieżki przewodzenia utworzone na skutek przewodnictwa jonowego)

13



14



15



16

Ferroelektryki (Seignetto-elektryki) charakteryzują się strukturą domenową, tj. posiadają obszary gdzie elementarne momenty dipolowe są ustawione zgodnie. Dlatego poniżej pewnej temperatury (tzw. temperatury Curie), gdy ruchy termiczne nie burzą tego uporządkowania, zachowują się one podobnie jak ferromagnetyki. Zjawisko to wykryto po raz pierwszy w soli Seignetta. Najbardziej rozpowszechnionym obecnie ferroelektrykiem jest BaTiO_3 .



Dla tytanianu baru ferroelektryczność zanika powyżej temperatury $T=485\text{ K}$, a $C=1,8 \cdot 10^5\text{ K}$. Ferroelektryki charakteryzują się bardzo dużą przenikalnością elektryczną nawet rzędu 10^4 .

17

Związek pomiędzy polaryzacją i natężeniem pola elektrycznego w ferroelektrykach ma postać:

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_0 + \chi \mathbf{E}$$

$\mathbf{P}_0$ - stały wektor polaryzacji spontanicznej

χ - podatność elektryczna

$\mathbf{E}$ - natężenie zewnętrznego pola elektrycznego

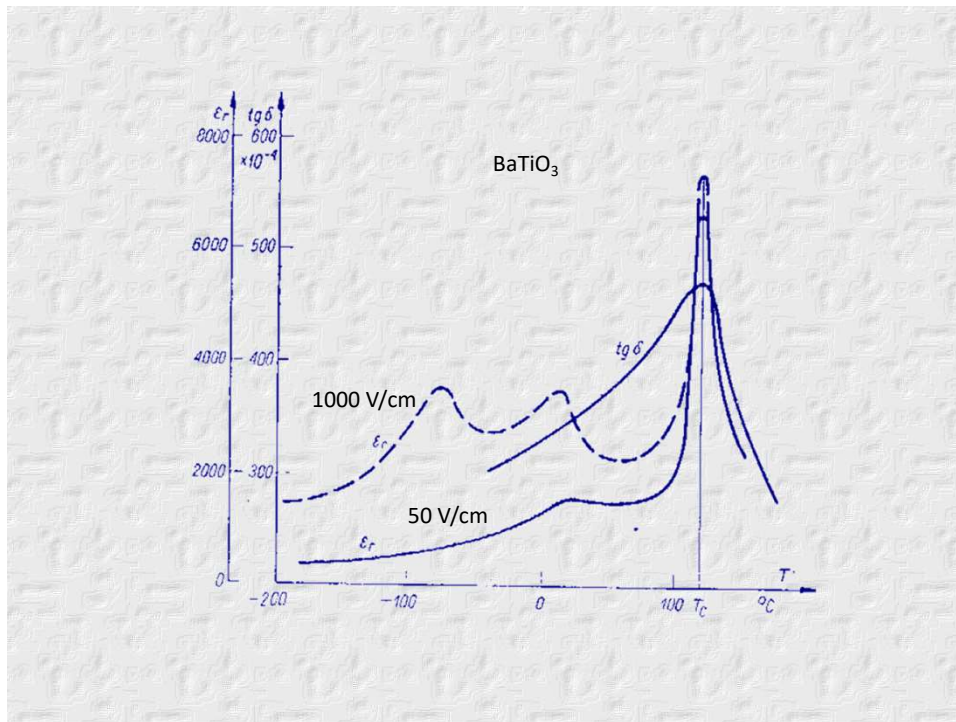
Zależność przenikalności elektrycznej od temperatury dla ferroelektryka:

$$\varepsilon - 1 = \frac{C}{T - T_C}$$

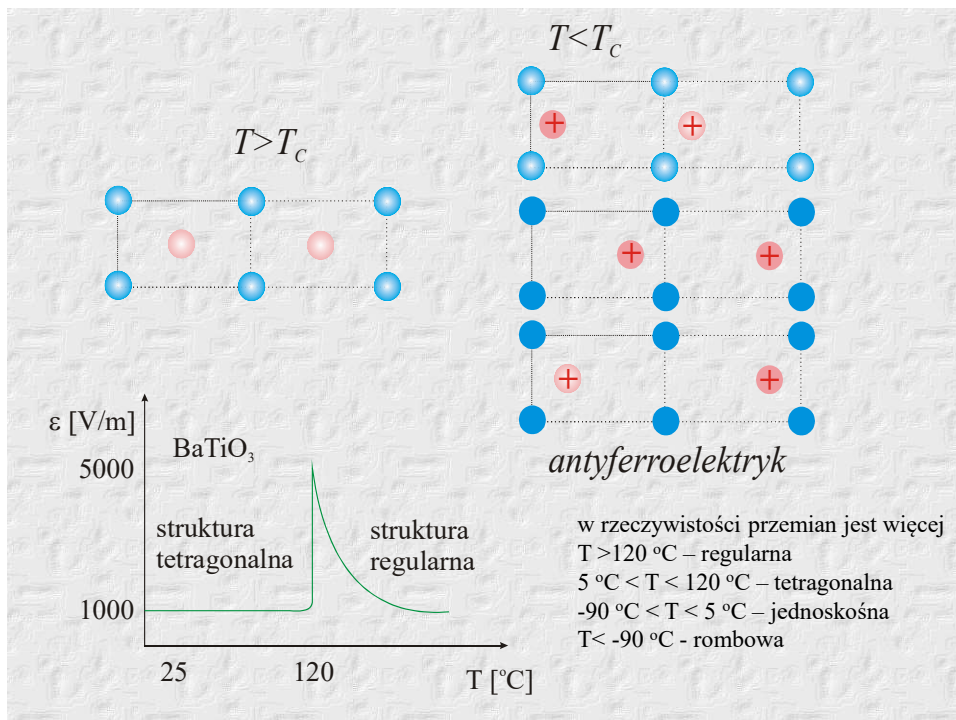
Zależność ta nosi nazwę prawa Curie-Weissa.

Od temperatury zależy też $\tan \delta$ – najsilniejsza zależność występuje w pobliżu temperatury Curie

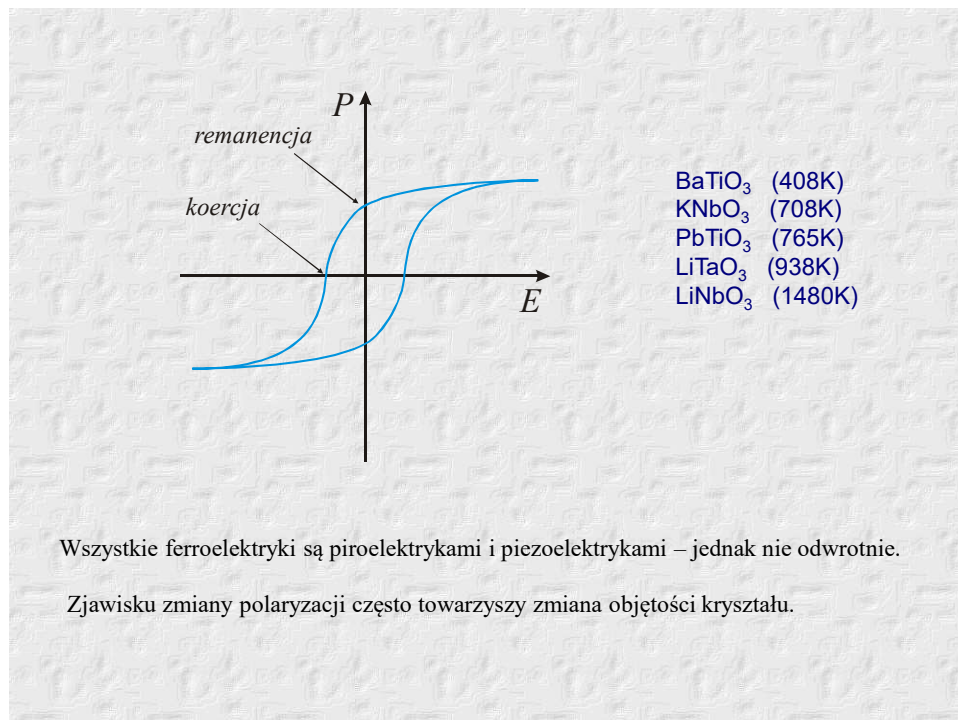
18



19



20



21

Efekt piroelektryczny polega na powstawaniu ładunków elektrycznych na powierzchni kryształów pod wpływem zmiany ich temperatury. Gdy podczas ogrzewania jeden koniec próbki piroelektryka staje się dodatni, a drugi ujemny, to przy ochładzaniu zajdzie zjawisko odwrotne.

Zjawisko piroelektryczne zostało odkryte w 1756 roku przez Aepinusa.

Wartość ładunku piroelektrycznego zależy od szybkości zmian temperatury i zwykle wynosi ok. 10^{-15} C/cm²/°C).

brak zmian temp.
 $dT/dt = 0$

ogrzewanie
 $dT/dt > 0$

studzenie
 $dT/dt < 0$

metalowe elektrody

Efekt odwrotny nosi nazwę efektu elektrokalorycznego

22

Piroelektryk jest ferroelektrykiem o bardzo wysokiej temperaturze Curie - nie obserwuje się go w stanie paraelektrycznym (niespolaryzowanym) do zmiany jego polaryzacji niezbędne jest bardzo silne pole elektryczne lub wysoka temperatura.

Przy szybkiej zmianie temperatury kryształu o ΔT , jego spontaniczna polaryzacja zmienia się o wartość ΔP , a na powierzchni pojawia się dodatkowy ładunek o gęstości powierzchniowej:

$$\rho_p = p\Delta T = \Delta P$$

p - współczynnik piroelektryczny

Zastosowania: czujniki termiczne, czujniki ruchu, matryce termowizyjne



Materiał, który ma być wykorzystany jako detektor w temperaturze pokojowej, powinien się charakteryzować temperaturą Curie nieznacznie wyższą od pokojowej.

Bardzo istotną cechą charakterystyczną, odróżniającą detektory piroelektryczne od klasycznych detektorów termicznych (np. termoelektrycznych) jest bardzo krótki czas reakcji rzędu mikro- a nawet nanosekund

Detektory piroelektryczne mogą być budowane zarówno z monokryształów jak i polikrystalicznych materiałów piroelektrycznych

Najbardziej rozpowszechnione są monokryształy trójglicyny w postaci tiosiarczanów lub chromianów: $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{SO}_4$ - (TGS), $(\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH})_3\text{H}_2\text{CrO}_4$ - (TGC).

23

Elektrostrykacja jest efektem polegającym na zmianie rozmiarów kryształu pod wpływem pola elektrycznego (elektryczny odpowiednik magnetostrykcji).

Odwrocenie kierunku pola nie skutkuje odwróceniem deformacji. Bez względu na kierunek pola kryształ powiększa lub pomniejsza swoją objętość.

Odwrocenie charakteru deformacji można jednak uzyskać poprzez wstępną polaryzację taki materiał nazywa się wtedy pseudo-piezoelektrykiem

Zmiana rozmiarów jest spowodowana reorientacją domen i jest zwykle niewielka.

Przy 2 MV/m można osiągnąć liniową zmianę rozmiarów rzędu 0,1% dla specjalnych materiałów ceramicznych.

Efekt do ok. 0,3 MV/m jest proporcjonalny do E^2 , a powyżej tej wartości do E

Do najbardziej znanych materiałów elektrostrykcyjnych należą ceramiki:

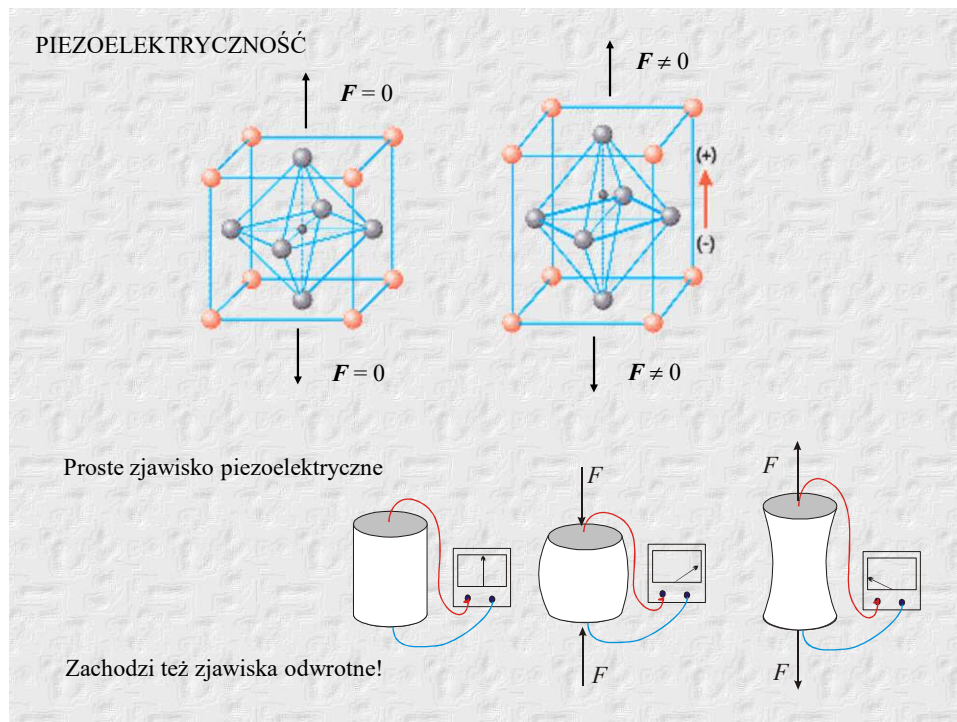
niobian ołowiowo magnezowy PMN

niobian ołowiowo magnezowy-tytanian ołowiu PMN-PT

tytanian ołowiowo lantanowo-cyrkonowy PLZT

Efekt ten jest słaby i przez to jak dotąd stosunkowo rzadko wykorzystywany

24



25

Efekty piezoelektryczne prosty i odwrotny są ze sobą ściśle powiązane.
 Obserwacja efektu nie daje możliwości rozróżnienia przyczyny od skutku

Powiązanie to sprawia, że z praktycznego punktu widzenia przydatna okazuje się jeszcze jedna wielkość opisująca własności piezoelektryka nazywana współczynnikiem sprzężenia elektromechanicznego k

$$k = \sqrt{\frac{E_e}{E_m}}$$

E_e energia elektryczna zmagazynowana w piezoelektryku
 E_m energia mechaniczna zmagazynowana w piezoelektryku
 W katalogach zamiast k często podawane jest k^2 .
 W przypadku anizotropii w każdym kierunku będzie inaczej

$$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{S_{33}^T S_{11}^E}}$$

wszystkie naprężenia zerowe oprócz T_1

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{S_{33}^T S_{33}^E}}$$

wszystkie naprężenia zerowe oprócz T_3

$$k_{33} = \frac{e_{33}}{\sqrt{S_{33}^S S_{33}^D}}$$

wszystkie deformacje zerowe oprócz S_3

	k_{33} [%]
SiO ₂	10
LiNbO ₃	17
BaTiO ₃	52
PZT	60

26

Często w zastosowaniach technicznych pole elektryczne, odkształcenie bądź naprężenie mają tylko jedną składową różną od zera i wtedy równania sprzężeniowe przechodzą w proste związki skalarne

Efekt piezoelektryczny podłużny - wektory S i E mają zgodne kierunki i zwroty
Dla przykładu w kierunku x_3

$$d_{33} = \frac{S_3}{E_3} = \frac{D_3}{T_3}$$

Efekt piezoelektryczny poprzeczny - wektory S i E są do siebie prostopadłe
W kierunkach x_1 oraz x_3 :

$$d_{31} = \frac{S_1}{E_3} = \frac{D_3}{T_1}$$

Efekt piezoelektryczny skośny – wektor E jest prostopadły do płaszczyzny ścinania
Przykładowo dla sił ścinających działających wzdłuż płaszczyzny równoległej do x_1 , x_2 lub x_2 , x_3 i pola elektrycznego w kierunku x_1 otrzyma się:

$$d_{15} = \frac{S_5}{E_1} = \frac{D_1}{T_5}$$

27

Wszystkie podane zależności zakładają niezmienność temperatury
Współczynniki podawane są dla 20 °C

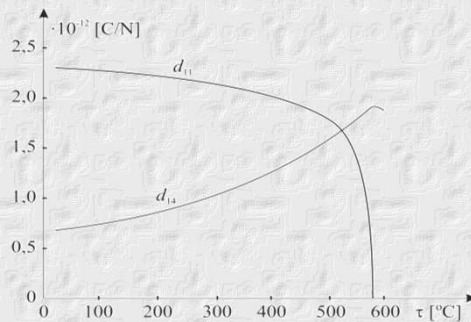
Temperaturowy współczynnik d_{ij} definiuje się następująco:

$$\text{TWd}_{ik} = \frac{1}{d_{ik}} \frac{\partial d_{ik}}{\partial \tau}$$

Dla kwarcu

$$\text{TWd}_{11} = -2,15 \cdot 10^{-4} [\text{K}^{-1}] \quad \text{TWd}_{14} = 12,9 \cdot 10^{-4} [\text{K}^{-1}]$$

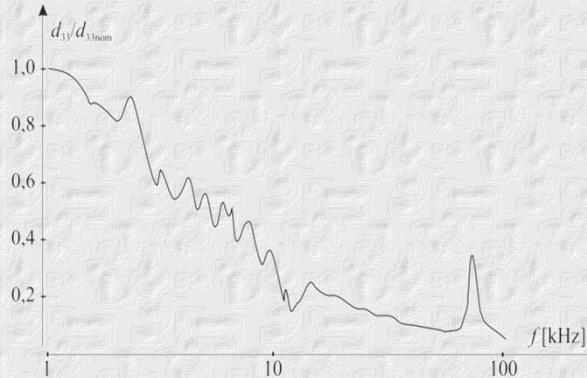
Wartości współczynników temperaturowych nie są wysokie, a ich liniowe przybliżenie może być stosowane z dala od temperatury Curie (dla kwarcu poniżej ok. 400 °C).



28

Wartości modułów maleją z częstotliwością

częstotliwościowa degradacja współczynnika d_{33} w PZT



Degradacja procesem dość złożonym.

Na krzywą spadku nakładają się liczne rezonanse elektromechaniczne związane z ziarnistą strukturą materiału.

Najwolniejszy spadek wartości współczynników piezoelektrycznych obserwowany jest w monokryształach

29

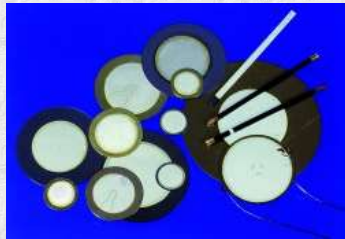
Piezoelektryki są szeroko wykorzystywane do budowy:

- układów akustoelektronicznych
- przetworników akustycznych
- układów zapłonowych
- iskrowników
- siłowników (serwomechanizmów)
- i in.

materiał	cięcie	wsp. sprzężenia [%]	ϵ_r
SiO ₂	ST (42,75° Y)	0,16	4,5
SiO ₂	- 75° Y	0,11	4,5
LiNbO ₃	Y	4,82	36,7
LiNbO ₃	128° Y	5,56	39,1
LiTaO ₃	X	0,64	44
Li ₂ B ₄ O ₇	145° X	1,0	9,6
ZnO na szkle	-	1,4	10,8
ZnO na szafirze	-	3,4	10
Pb(Sn _{1/2} Sb _{1/2})O ₃ +PbTiO ₃ +PbZrO ₃	-	2,4	270
0,1Pb(Mn _{1/3} Nb _{2/3})O ₃ +0,9Pb(Zr _{0,74} Ti _{0,26})O ₃	-	2,9	460

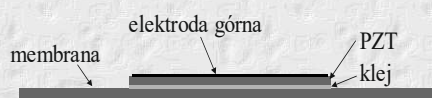
30

Materiały piezoceramiczne mogą być dowolnie kształtowane



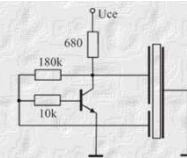
31

membrany metalowe sztywno połączone z piezoelektrykiem
zalicza się do unimorfów

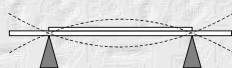


stosuje się ceramikę PZT rzadziej warstwę kwarcu lub BaTiO_3 .

górne elektrody są napyłane stopem srebra rzadziej jest to glin



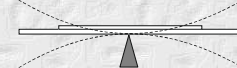
$$f_0 \approx \frac{\alpha h}{r^2} v$$



$$\alpha = 0,412$$



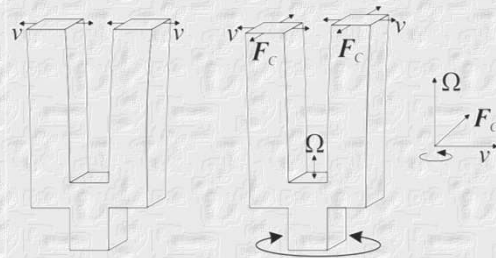
$$\alpha = 0,233$$



$$\alpha = 0,172$$

32

żyroskopy piezoelektryczne



$$F_c = ma_c = -2m \Omega \times v$$

wektor prędkości liniowej końcówek widełek cyklicznie zmienia zwrot

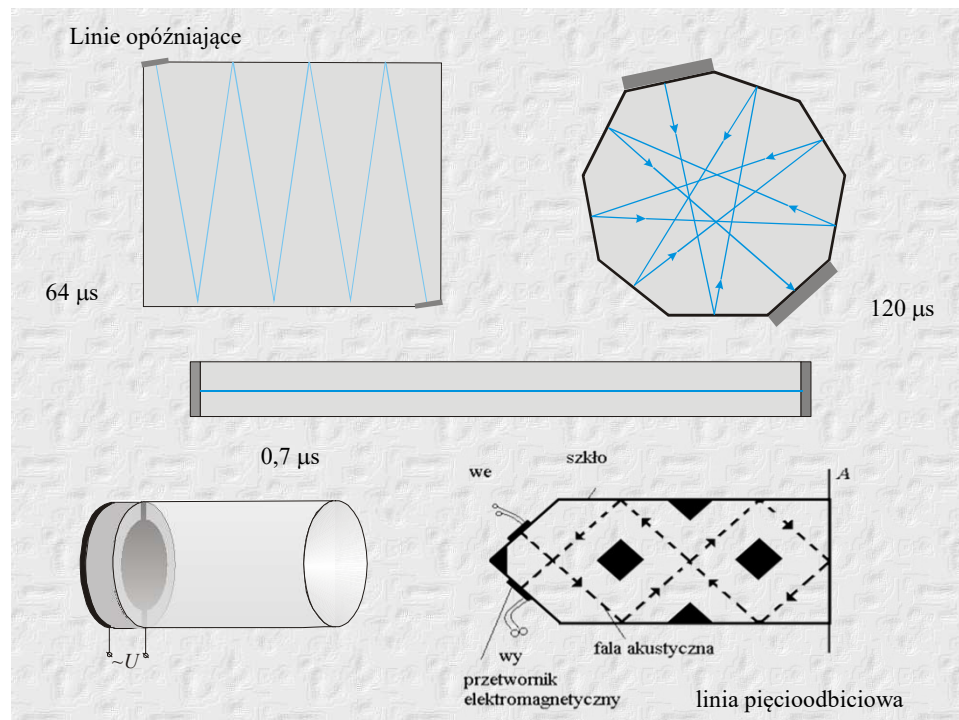
generowana siła Coriolisa także zmienia zwrot

w efekcie generowane są drgania w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu drgającego

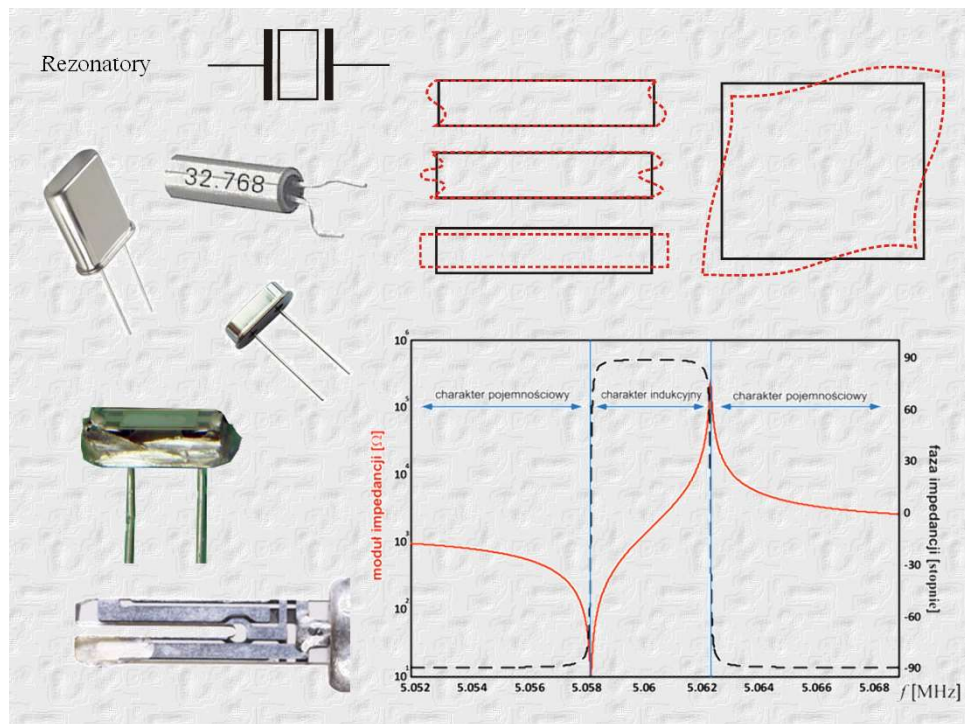
amplituda tych drgań jest proporcjonalna do prędkości ruchu obrotowego widełek

drgania w obydwu płaszczyznach separuje się częstotliwościowo odpowiednio dobierając przekrój widełek

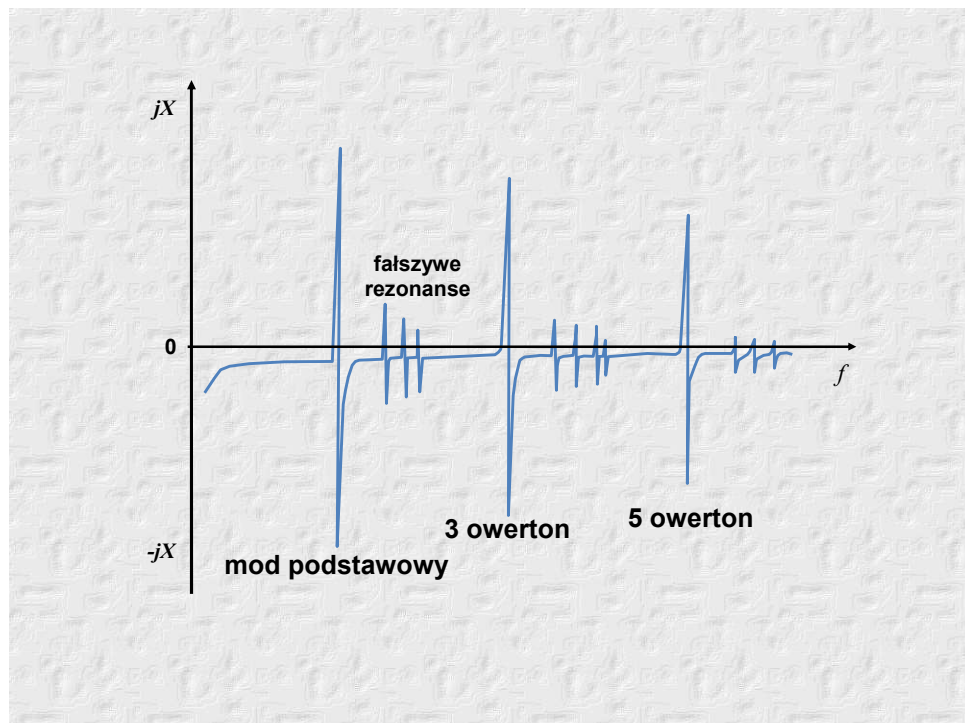
33



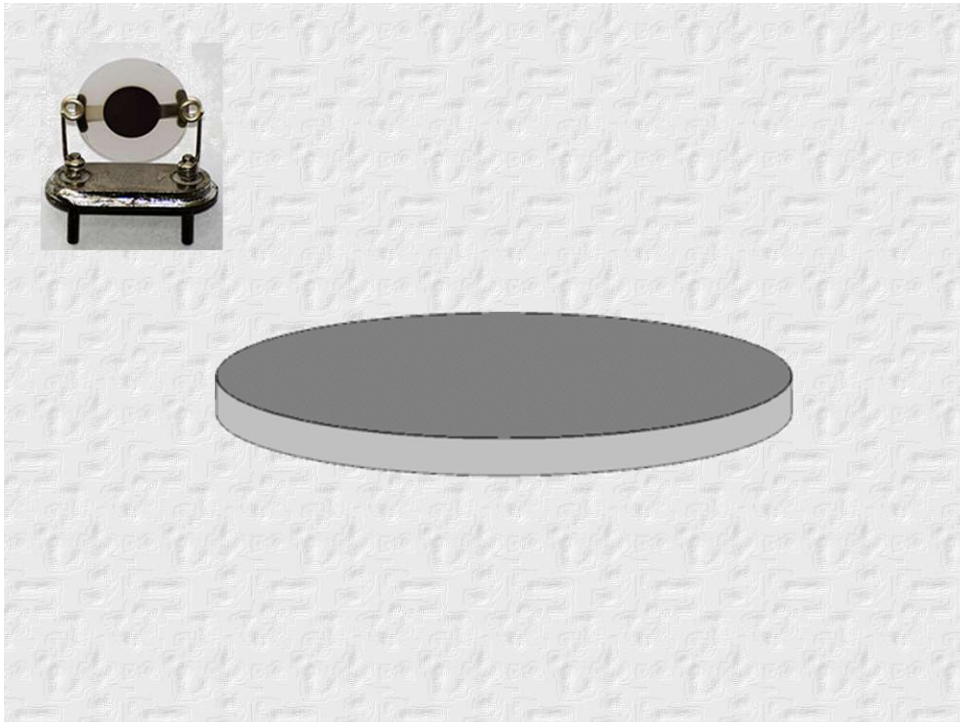
34



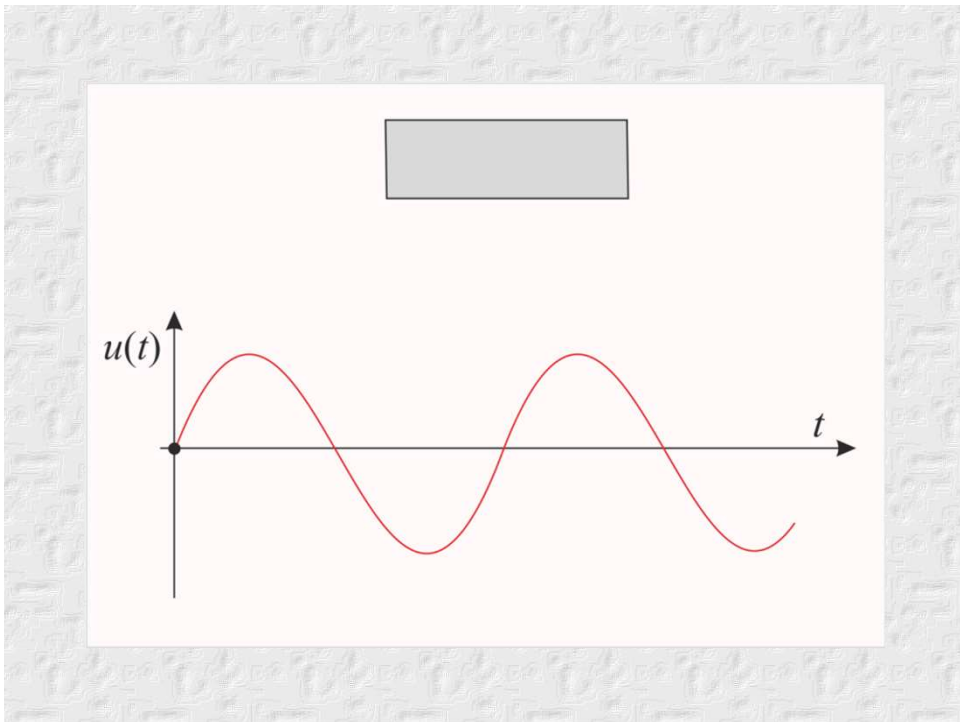
35



36

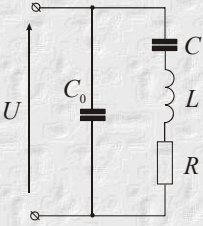


37



38

Schemat zastępczy



$$C_0 \cong \epsilon \frac{A}{h}$$

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

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}}$$

przenikalność elektryczna (dla SiO₂ ≈ 40 pF/m)
 A powierzchnia elektrod
 h grubość płytki
 r współczynnik pojemnościowy
 f_s częstotliwość rezonansu szeregowego
 f_a częstotliwość antyrezonansu
 Q dobroć
 τ opóźnienie grupowe
 φ przesunięcie fazy

$$f_a - f_s \approx \frac{f_s}{2r}$$

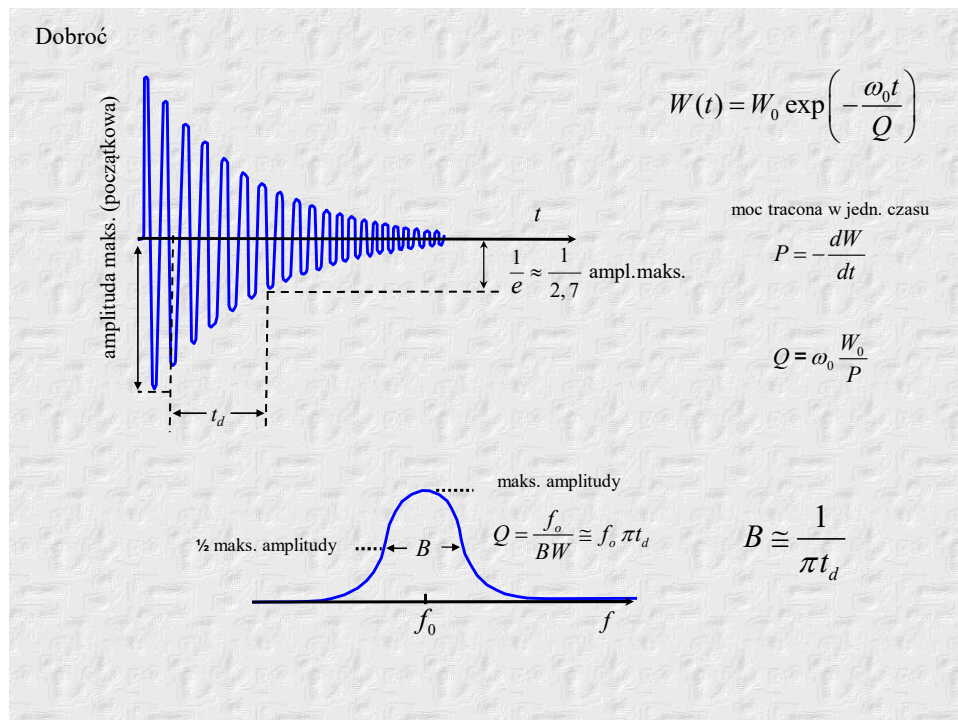
$$Q = \frac{1}{2\pi f_s RC}$$

$$\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

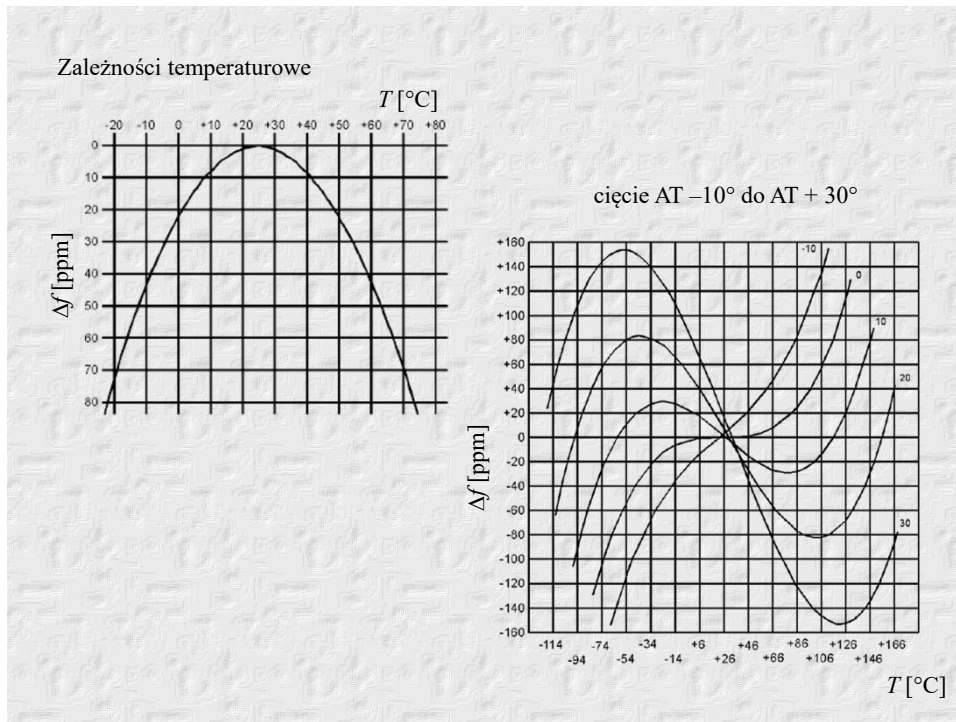
$$\tau = RC \approx 10^{-14} \text{ s}$$

$$\frac{d\varphi}{df} \cong \frac{360}{\pi} \frac{Q}{f_s}$$

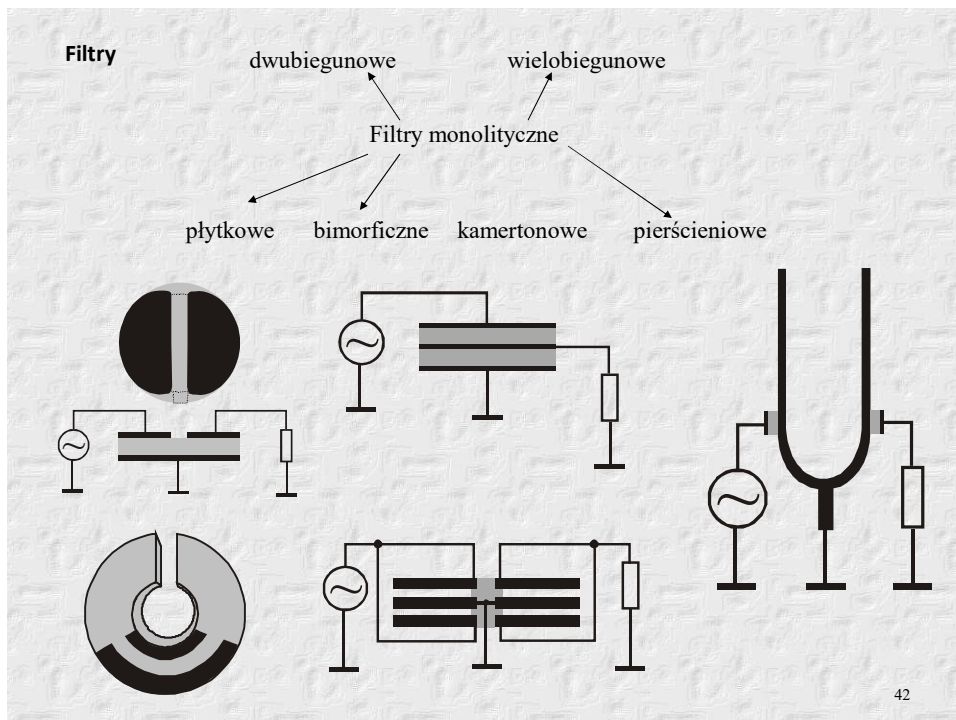
39



40

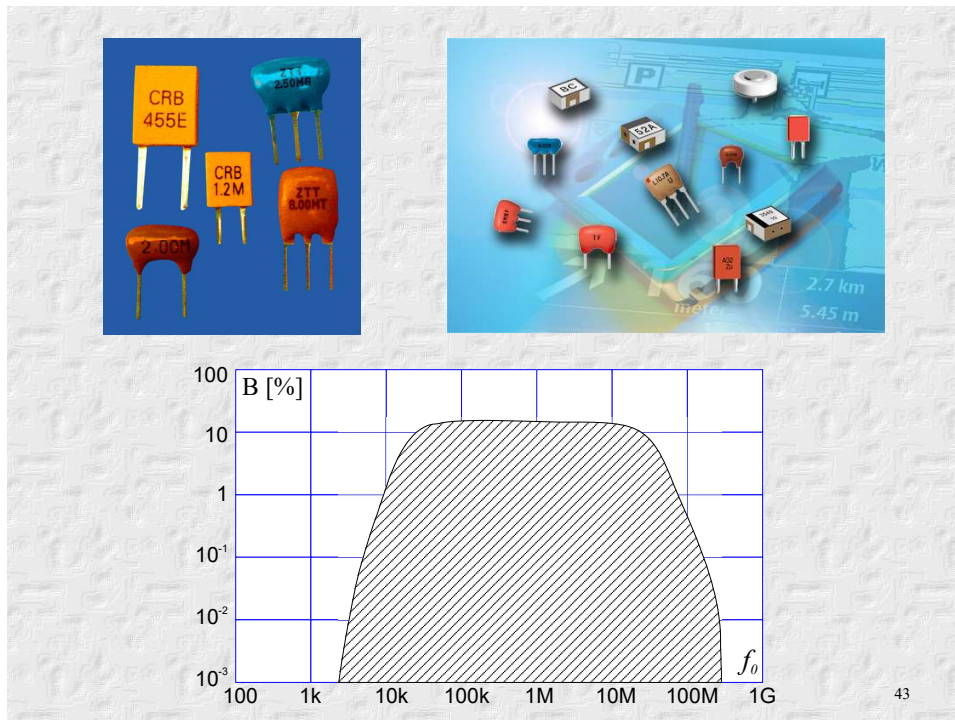


41

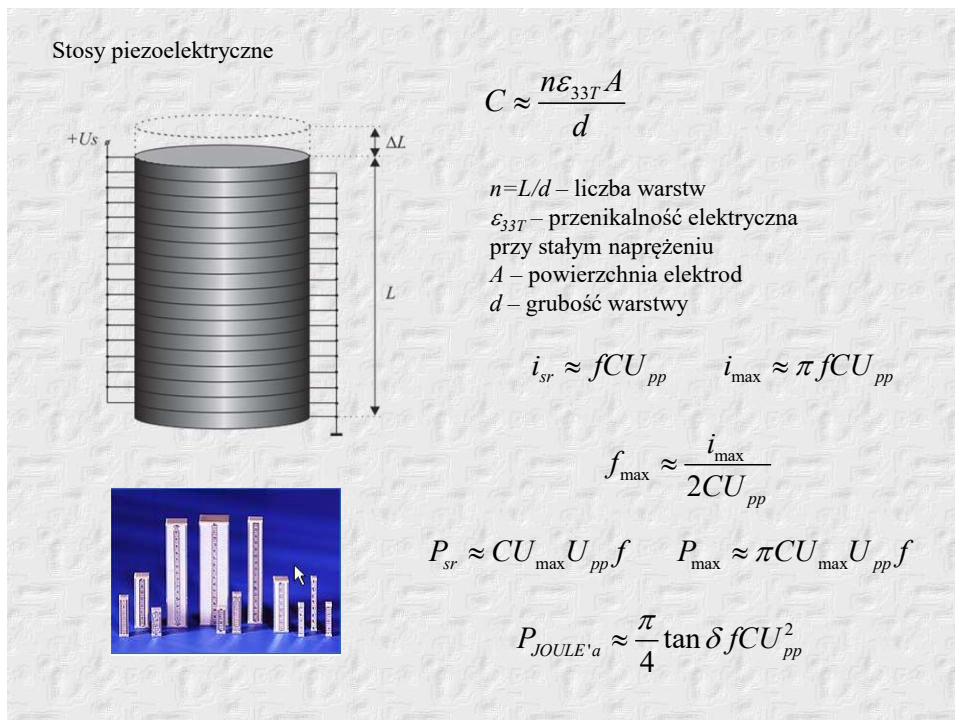


42

42

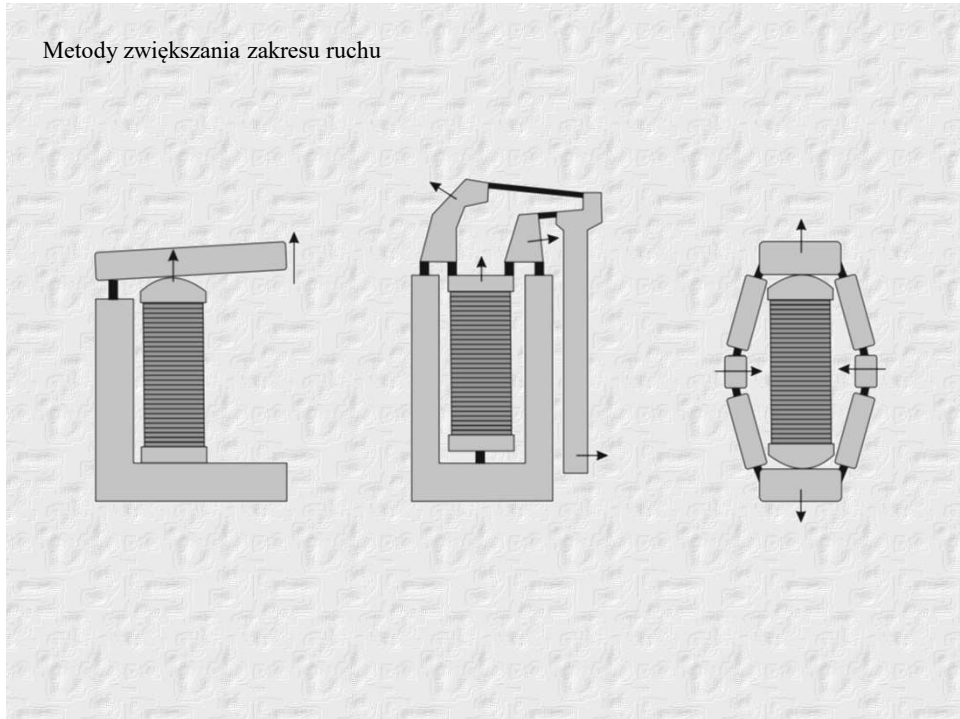


43



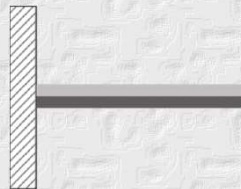
44

Metody zwiększania zakresu ruchu



45

Bimorfy



Przesunięcie końcówki bimorfu opisuje zależność
$$\Delta L \approx \frac{3}{4} \left(\frac{l}{g} \right)^2 d_{31} E$$

l – długość bimorfu, g – grubość jednego piezoelektryka, d_{31} – składową tensora podatności piezoelektrycznej (modułem piezoelektrycznym), E amplitudą pola elektrycznego

Generowana siła

$$F = \frac{2ga}{l} \frac{d_{31}}{\epsilon_{11}^E} E$$

a – szerokość bimorfu

częstotliwość rezonansowa
$$f_0 \approx 0,161 \frac{2g}{l^2} \sqrt{\frac{1}{\rho \epsilon_{11}^E}}$$

46

Moc – Energy harvesting

Liczba ładunków na jednostkę powierzchni:

$$D_3 = \epsilon \epsilon_0 E_3 + Y d_{31} S_1$$

Po scałkowaniu po grubości (S_1 , D_3 i $d_{31} = \text{const}$) otrzymamy:

$$D_3 h = \epsilon \epsilon_0 U + Y d_{31} S_1 h$$

Zakładając, że D_3 , V , S są jednakowo zmienne oraz $\epsilon \epsilon_0 \approx \epsilon$ prąd wyniesie

$$-i = j\omega A \left(\epsilon \frac{U}{h} + Y d_{31} S_1 \right)$$

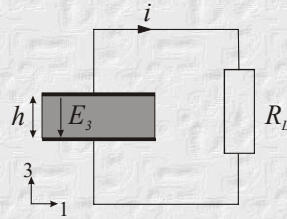
Z prawa Ohma:

$$U = \frac{-Y d_{31} A S_1 j\omega}{\frac{1}{R} - j\omega C} \quad C = \frac{\epsilon A}{h}$$

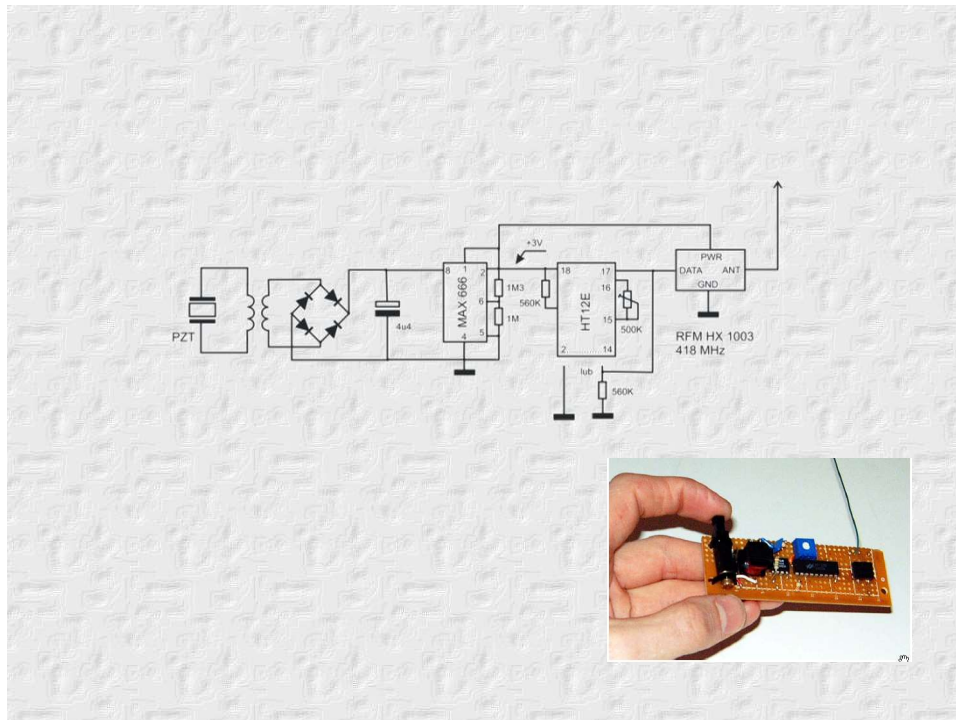
Z tego:

$$|U| = \frac{Y d_{31} A S_1 \omega R}{\sqrt{1 + \omega^2 C^2 R^2}} \quad P_p = \frac{|U|^2}{R} = \frac{(Y d_{31} A S_1 \omega)^2 R}{1 + \omega^2 C^2 R^2}$$

~ pojedyncze mW



47



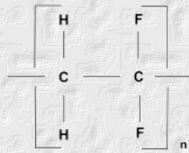
48

Polifluorek winylidenu (PVDF - Polyvinylidene fluoride)

polimer fluorowy o wysokim stopniu krystalizacji
 należy do grupy ciągliwie-sprężystych, termoplastycznych tworzyw fluorowych
 biały lub czarny (z 8% dodatkiem włókien węglowych lub sadzy przewodzi prąd)

należy do najlepszych piezoelektryków polimerowych

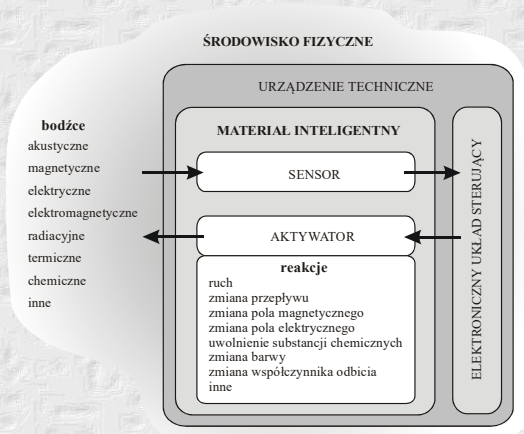
dobre własności cieplne i elektryczne
 wysoka wytrzymałość mechaniczna - wytrzymałość na ściskanie
 wysoka dopuszczalna temperatura pracy (150°C)
 zwiększona odporność na ścieranie
 wysoka odporność chemiczna
 obojętność fizjologiczna
 niska palność
 wyjątkowa odporność na działanie UV oraz czynników atmosferycznych
 dobra skrawalność oraz sprężystość zwrotna



49

Materiały inteligentne (ang. smart materials)

Są to struktury łączące własności czujnika i aktywatora



50

Zjawiska sprzężone

odpowiedź w postaci zmiany	wymuszenie			
	siła	ciepło	E statyczne	H statyczne
rozmiaru lub kształtu	sprężystość	rozszerzalność cieplna	piezoelektryczność odwrotna	piezomagnetyzm odwrotny
			elektrostrykcja (odwrotność piroelektryczności)	magnetostrykcja (odwrotność magnetosprężystości)
temperatury	piezokaloryczność	pojemność cieplna	elektrokaloryczność (odwrotność piroelektryczności)	magnetokaloryczność (odwrotność piromagnetyzmu)
polaryzacji elektrycznej	piezoelektryczność prosta	piroelektryczność (odwrotność elektrokaloryczności)	polaryzacja elektryczna	nie obserwowany
	elektrosprężystość (odwrotność elektrostrykcji)			
namagnesowania	piezomagnetyzm prosty	piromagnetyzm (odwrotność magnetokaloryczności)	nie obserwowany	namagnesowanie
	magnetosprężystość (odwrotność magnetostrykcji)			

51

Elektrety

Materiały z „zamrożoną” uporządkowaną strukturą dipolową

W 1919 r. M. Eguchi uzyskał pierwszy elektret wykorzystując twardy wosk z liści kopernicji tzw. wosk karnauba

Obecnie elektrety produkowane są z polimerów poprzez poddawanie ich działaniu silnych pól elektrycznych, bombardowanie naładowanymi cząstkami, naświetlanie i in.

W zależności od konstrukcji i sposobu wytwarzania wyróżnia się:

- termoelektrety
- fotoelektrety
- radioelektrety

Osobną kategorię stanowią elektrety foliowe gdzie struktura domenowa porządkowana jest poprzez wstrzykiwanie ładunków z zewnątrz. Osiągane różnice potencjałów między powierzchniami są ograniczone tylko wytrzymałością elektryczną folii i mogą przekraczać wartość 1 kV.

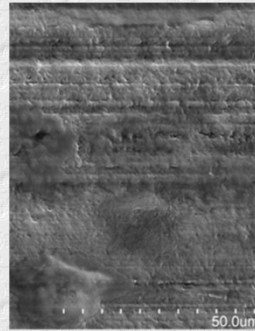
52

Do najważniejszych materiałów elektretowych zaliczane jest tworzywo fluoropochodne – politetrafluoroetylen (PTFE). Tworzywo to jest jednym z najlepszych znanych izolatorów i charakteryzuje się:

- praktycznie całkowitą odpornością na działanie związków chemicznych,
- wysoką wytrzymałością cieplną,
- bardzo niską stratność ($\text{tg}\delta \approx 10^{-4}$, aż do 10 GHz),
- wysoką rezystywnością ($\rho \approx 10^{16} \Omega\text{m}$),
- wysoką wytrzymałością elektryczną



przed polaryzacją



po polaryzacji

53

stała czasowa elektretu - czas, po którym gęstość ładunku powierzchniowego spada e - krotnie

$$\rho = \rho_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad \tau = \frac{\epsilon_r}{\sigma}$$

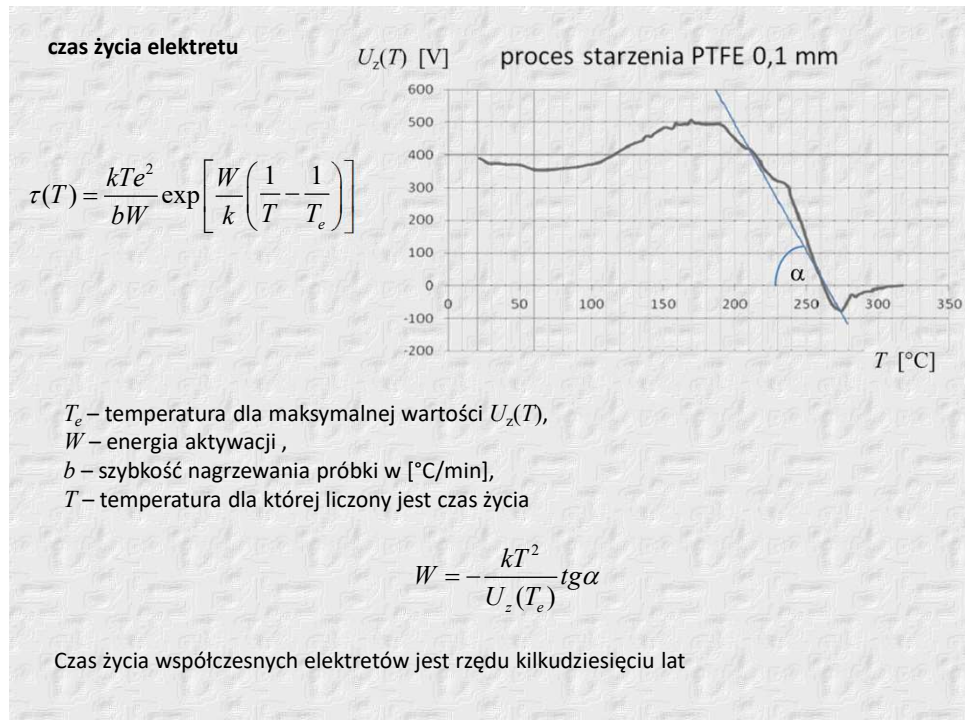
ϵ_r – bezwzględna przenikalność elektryczna elektretu
 σ – konduktywność elektretu

Ładunek zgromadzony blisko powierzchni dielektryka można wprowadzić w jego głąb za pomocą tzw. procesu starzenia. Polega on na wygrzaniu elektretu w podwyższonej temperaturze.

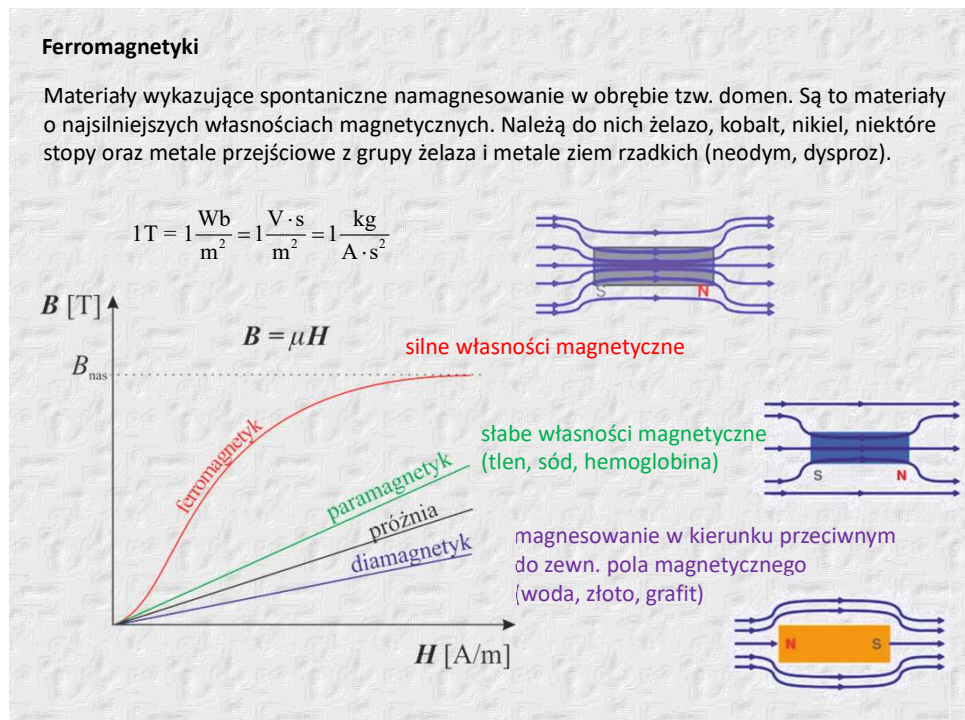
Dzięki temu procesowi zmniejsza się efektywna gęstość powierzchniowa ładunku; pozostały ładunek wykazuje większą stabilność czasową.

Elektrety niestarszone mają napięcie rzędu 1 kV, zaś do zastosowań praktycznych potrzebne są napięcia rzędu 100 V.

54



55



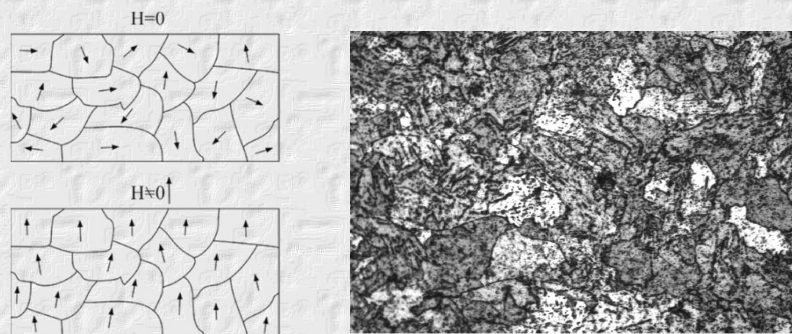
56

Materiały ferrytowe

Ferryt – międzywęzłowy roztwór stały węgla w żelazie o odmianie alotropowej α (α -Fe)
Najczęściej jest to spiek tlenku żelaza Fe_2O_3 z tlenkami Zn, Ni, Mn, Mg lub metali ziem rzadkich.

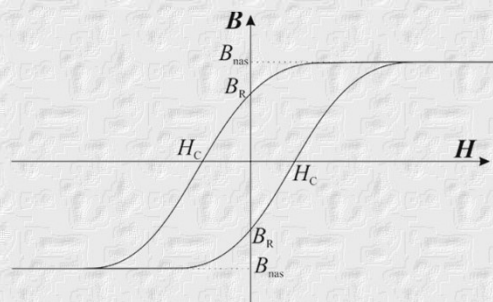
Zawartość węgla w roztworze waha się od 0,008 w temp. pokojowej do ok. 0,02 w temperaturze 723 °C, w której przechodzi on w paramagnetyczny austenit.

Ferryty są tzw. ferromagnetykami i charakteryzują się strukturą domenową z lokalnie uporządkowanymi dipolami magnetycznymi, które dość łatwo można uporządkować globalnie za pomocą zewnętrznego pola magnetycznego



57

Historia magnesowania = histereza

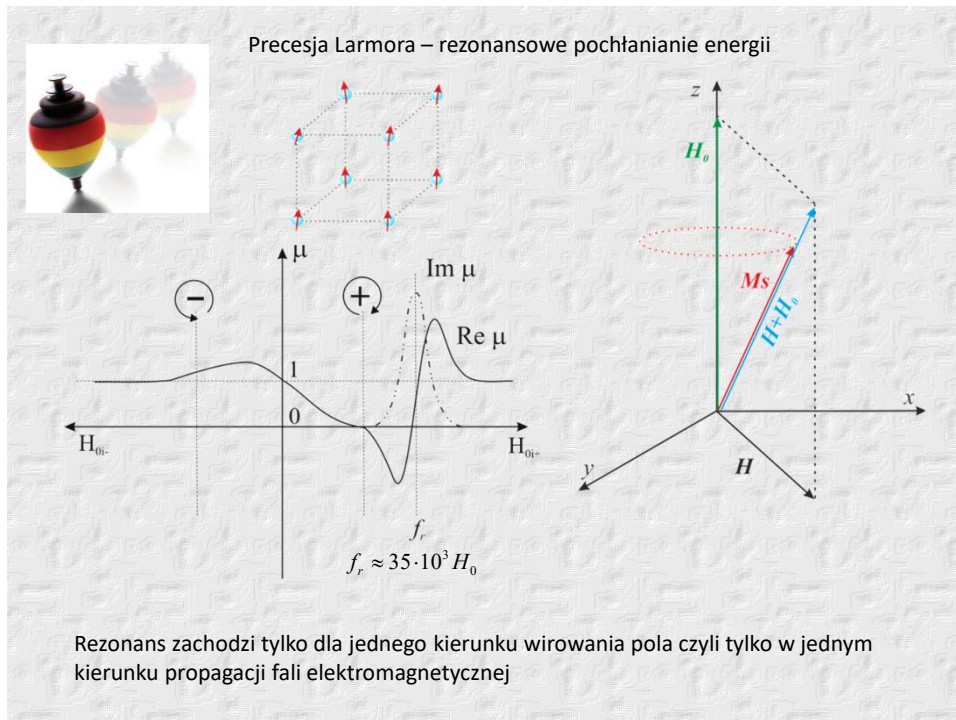


Remanencja (pozostałość magnetyczna) – wielkość namagnesowania po zaniku pola magnesującego

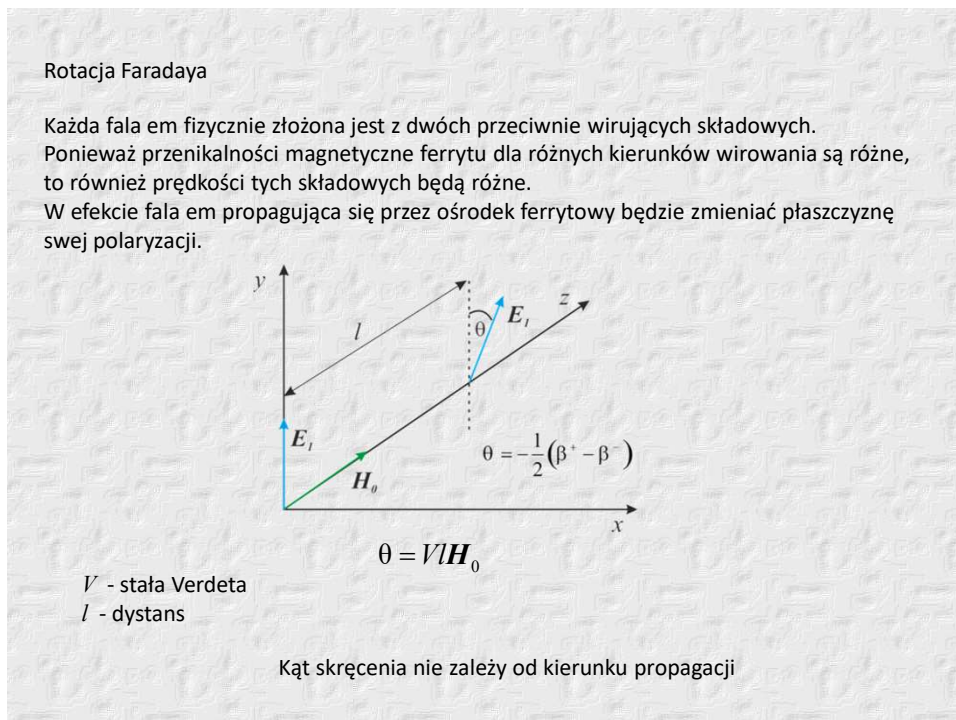
Koercja – wartość pola magnetycznego potrzebna do całkowitego zaniku namagnesowania
poniżej 1000 A/m mówi się o materiałach magnetycznie miękkich

Temperatura Curie – wartość temperatury, powyżej której zanikają własności ferromagnetyczne

58

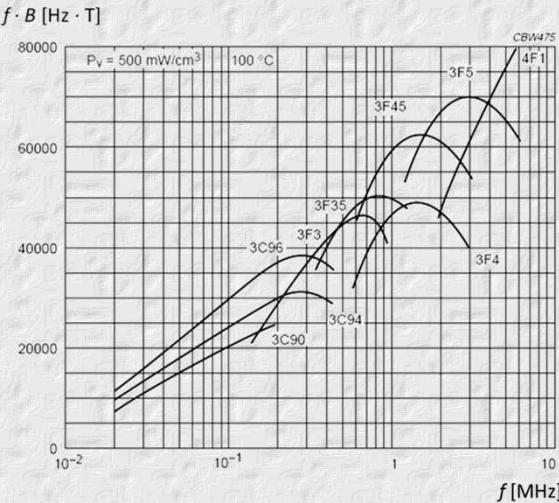


59



60

Współczynnik wydajności w funkcji częstotliwości dla różnych typów ferrytów przy mocy właściwej 500 mW/cm³ i temperaturze 100 °C



61

Materiały te można dowolnie kształtować

Studzenie lub spiekanie w silnym polu magnetycznym „zamraża” dipole magnetyczne pozwalając uzyskać magnesy stałe o wysokich wartościach pola magnetycznego



magnesy	SmCo_5	$\text{Sm}_2(\text{CoFeCuZr})_{17}$	AlNiCo	twardy ferryt
indukcyjność remanencji [T]	0,85-1,0	0,95-1,15	1,25	0,3-0,45
natężenie koercji [kA/m]	>1600	800-2000	55	240-320
gęstość energii [kJ/m³]	145-200	180-250	50	20-40
temp. wsp. remanencji [%/°C] od 20 do 100 °C	-0,04	-0,03	-0,02	-0,2
maks. temp. pracy [°C]	250	300-350	450-500	150-200

62

Materiały ferrytowe

- materiały o wysokiej mocy właściwej charakteryzujące się niskimi stratami w szerokim zakresie częstotliwości

zastosowania: transformatory, dławiki dużej mocy

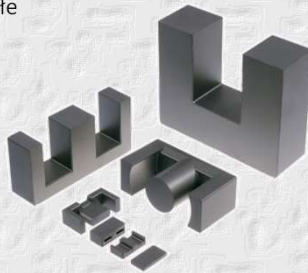
- materiały do konstrukcji filtrów charakteryzujące się niskimi stratami w szerokim zakresie częstotliwości,

wysoką stabilnością temperaturową i wysoką dobrocią

zastosowania: anteny obwody rezonansowe transformatory szerokopasmowe, dławiki i cewki

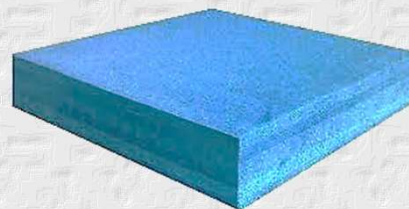
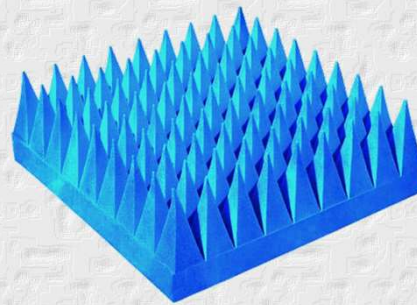
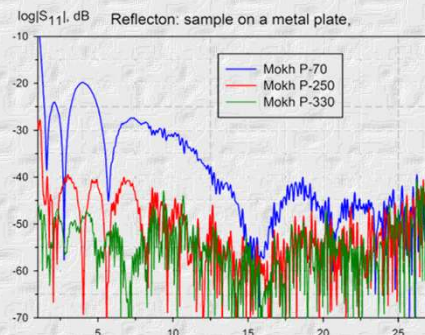
- materiały o wysokiej przenikalności magnetycznej

zastosowania: cewki o bardzo wysokiej indukcyjności, transformatory symetryzująco-dopasowujące, magnesy stałe

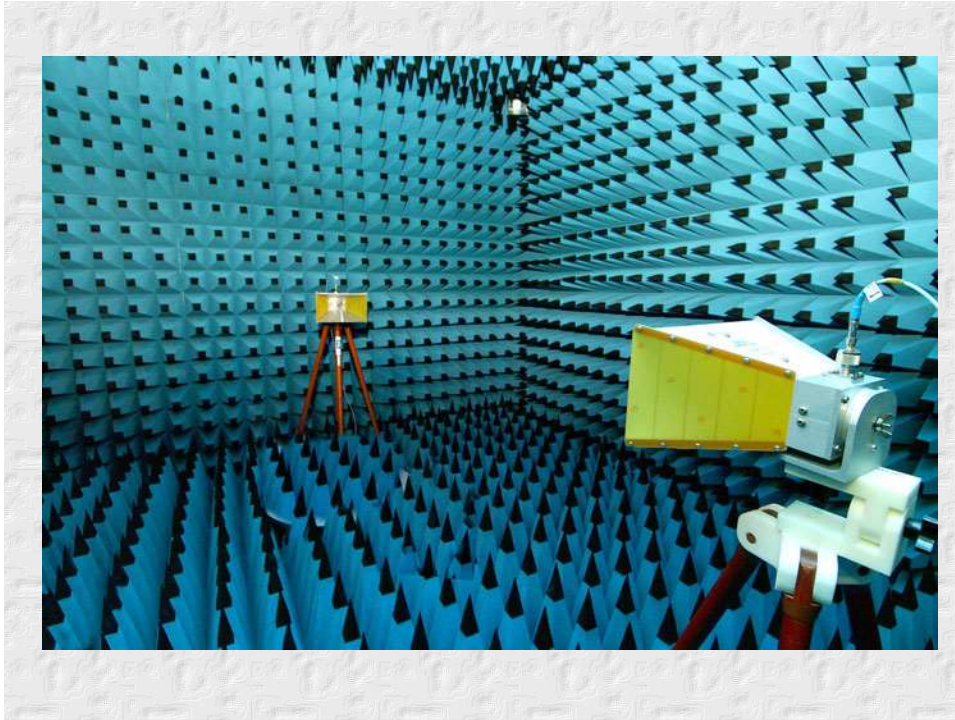


63

Proszki ferromagnetyczne



64



65

Ceramiki

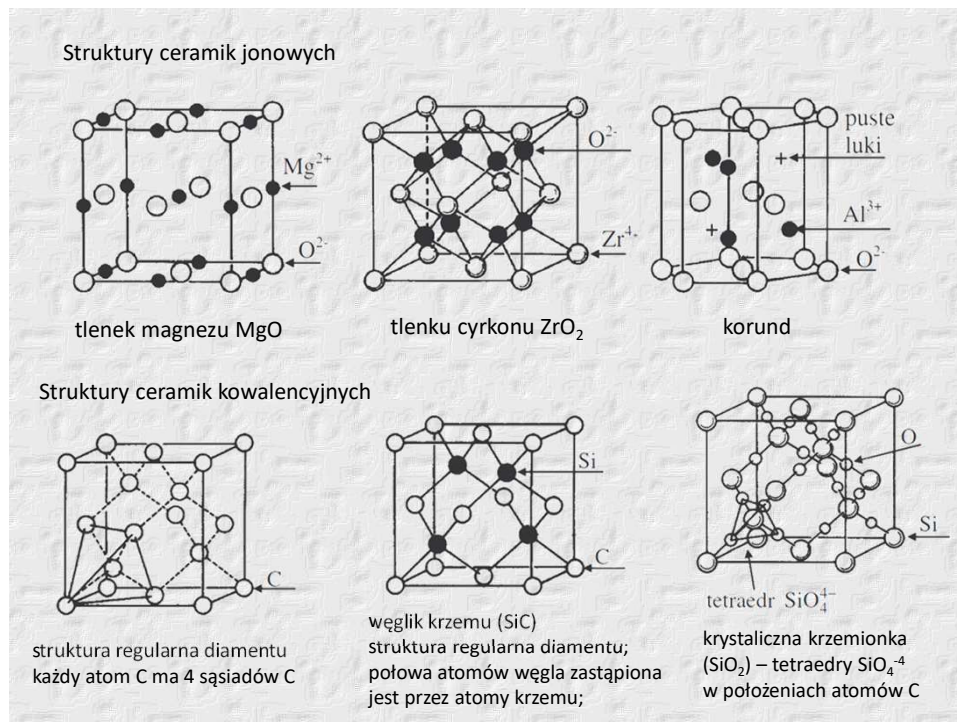
Są to nieorganiczne materiały niemetaliczne (zarówno krystaliczne jak i amorficzne), złożone głównie ze związków metali i niemetalu Al, Si, Ti, C, O, N, tworzących formy przestrzenne o jonowych, kowalencyjnych bądź mieszanych wiązaniach międzyatomowych.

Surowcem do ich wytwarzania są:

- skaleń ($K_2O \cdot Al_2O_3 \cdot 6SiO_2$)
- glina (uwodnione glinokrzemiany, takie jak: $Al_2(Si_2O_5)(OH)_4$, zmieszane z innymi minerałami obojętnymi chemicznie)
- kwarc (SiO_2)
- kaolinit ($Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$)
- krzemiany
- tlenki (np. MgO , Al_2O_3)
- azotki (np. TiN , Si_3N_4)
- węgliki (np. SiC , TiC)
- borki (np. TaB_2)



66



67

Ziarnista mikrostruktura ceramiki – granica ziarna

W stanie stałym są to materiały polikrystaliczne o silnym rozdrobnieniu struktury.

Wielkość ziaren jest często mniejsza od $1\ \mu\text{m}$, co powoduje, że ceramiki odznaczają się **dużą powierzchnią właściwą** (= łączna powierzchnia ziaren zawartych w 1 g masy)

Realne wartości dla przeciętnej ceramiki inżynierskiej wynoszą kilka m^2/g ale mogą osiągać wartości nawet rzędu $250\text{--}280\ \text{m}^2/\text{g}$

68

Współczesne materiały ceramiczne można podzielić na kilka grup różniących się techniką wytwarzania, mikrostrukturą i właściwościami:

- ceramika inżynierska (specjalna)
- ceramika funkcjonalna
- ceramika wielofazowa (porcelana, cegła, cement)
- szkła
- ceramika szklana (dewitryfikat)
- ceramika naturalna (skały, minerały, w tym również lód)

Materiały te charakteryzuje:

- wysoka wytrzymałość na ściskanie - znacznie większa od wytrzymałości na rozciąganie
- wysoki moduł Younga
- wysoka twardość i duża odporność na ścieranie
- wysoka kruchość
- gęstość mniejsza od metali
- mała odporność na szybkie zmiany temperatury (szoki cieplne)
- bardzo wysoka temperatura topnienia (2000-4000°C) i związana z tym odporność na działanie wysokich stałych temperatur
- wysoka odporność chemiczna
- niska przewodność cieplna i elektryczna
- duża stabilność cieplna (odporność na pękanie)

69

Ceramika inżynierska

jest wytwarzana poprzez spiekanie w wysokich temperaturach bardzo czystych związków, takich jak tlenki, azotki, węgliki, diament – bez lub z niewielkim udziałem fazy szklistej
W zależności od typu związku ceramikę inżynierską dzieli się na:

- tlenkową – opartą na tlenkach, np. Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2 , MgO
- azotkową – np. Si_3N_4 ; TiN , BN ,
- wgliskową – np. SiC , TiC , BC , VC , WC ,
- borkową – np. TiB_2 , ZrB_2 , TaB_2

Ceramika	Temperatura topnienia [°C]	Gęstość [Mg/m^3]
Al_2O_3	2050	3,98
ZrO_2	2700	6,27
Si_3N_4	2170	3,26
TiB_2	2900	6,08

Ceramika	Temperatura topnienia [°C]	Gęstość [Mg/m^3]
SiC	2430	3,17
WC	2530	15,7
VC	2560	5,4
TiC	2800	4,25

70

Porowatość ceramiki

Mianem porowatości określa się względne odchylenie gęstości od wartości dla materiału litego

$$\text{porowatość} = \frac{\rho_{cl} - \rho_{cp}}{\rho_{cl}} 100\% \quad \text{gdzie} \quad \rho_{cp} = \frac{m_{cs}}{m_{cpow} - m_{cwod}}$$

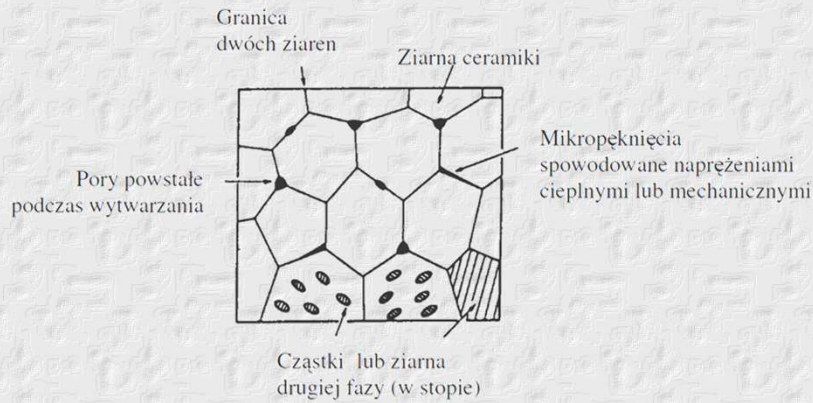
ρ_{cl} – gęstość ceramiki litej

ρ_{cp} – gęstość ceramiki porowatej

m_{cs} – masa próbki suchej

m_{cpow} – masa próbki w powietrzu

m_{cwod} – masa próbki w wodzie



71

Porównanie własności wybranych ceramik

parametr w warunkach norm.	Al ₂ O ₃	ZrO ₂	SiC	Si ₃ N ₄
gęstość [t/m ₃]	3,98	5,91	3,2	2,75
Moduł Younga [GPa]	360	205	206-308	180-310
przewodnictwo cieplne [W/mK]	10-20	1-25	23-100	15-30
maksymalna temp. użytkowania [K]	2070	1770	1620	1570
wsp. rozszerzalności liniowej [μm/m·K]	8,1	10,6	4,3-4,8	2,8-3,2
wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	210	455	175	560
wytrzymałość na ściskanie [GPa]	10	1,89	3,92	3,5
wytrzymałość na zginanie [MPa]	440	1,02	125-700	280-800
odporność na pękanie [MPa·m ^{1/2}]	5,5	9-10	4,4	6-9

72

Zastosowania typowe dla elektroniki



73

Zastosowania typowe dla elektrotechniki



74

Szkła

Jest to odmiana materiałów ceramicznych, pomimo przewagi struktury bezpostaciowej nad krystaliczną. Wg normy ASTM-162 (1983), szkło zdefiniowane jest jako nieorganiczny materiał, który został schłodzony do stanu stałego bez krystalizacji.

Materiały te ze stanu ciekłego w stan stały przechodzą w sposób ciągły. Nie są więc przechłodzoną cieczą, ale występują w osobliwym stanie materii nazywanym stanem szklistym. Szkła mają strukturę pośrednią między cieczami, a materiałami krystalicznymi, nie będąc w zasadzie ani jednym ani drugim z tych materiałów.

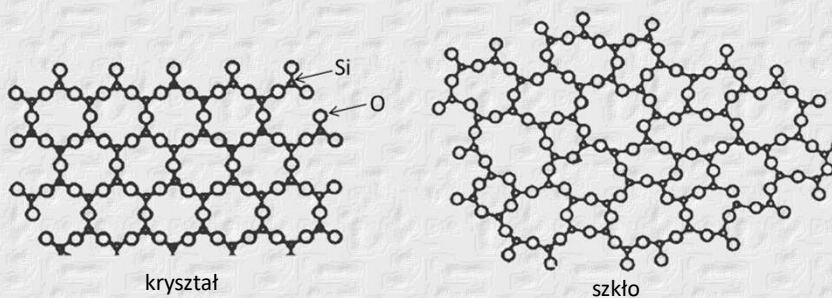
Głównymi składnikami są SiO_2 , B_2O_3 i P_2O_5 , zaś dodatkami tlenki arsenu i germanu oraz siarka, selen i tlenek ołowiu.

typowe szkła	typowy skład [% wagowe]	własności i zastosowanie
szkło krzemionkowe	100% SiO_2	odporność na szoki cieplne wysokotemp. tygle, okna pieców, elementy aparatury elektropróżniowej i chemicznej
szkło sodowo-wapniowe	75% SiO_2 15% Na_2O 10% CaO	szkła łatwe do formowania szyby, butelki, przepusty, obudowy, itp.
szkło borokrzemianowe	80% SiO_2 15% B_2O_3 10% Na_2O	Odporność na wysokie temperatury, mały współczynnik rozszerzalności cieplnej, dobra odporność na szoki cieplne; szkło laboratoryjne, obudowy lamp

75

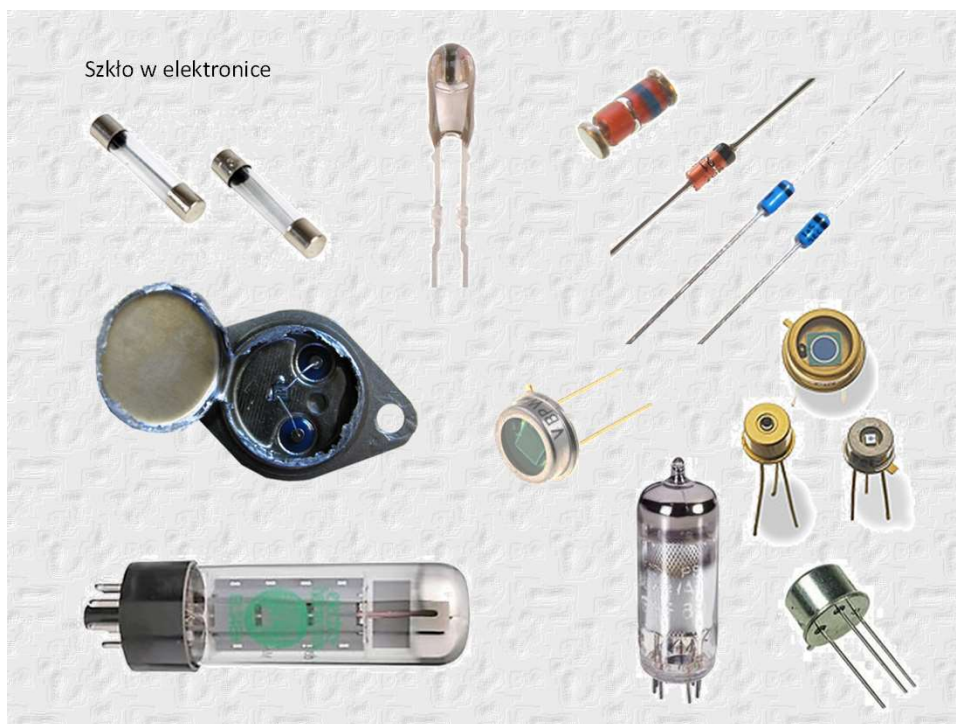
Najszerze zastosowanie znalazły **szkła krzemianowe**

W ich strukturze, podobnie jak w strukturze krzemionki krystalicznej, wszystkie naroża czworościanów SiO_4^{4-} mają wspólne naroża, jednak utworzona sieć jest nieregularna.



Czysta krzemionka w stanie szklistym ma wysoką temperaturę mięknienia, dużą wytrzymałość i stabilność oraz małą rozszerzalność cieplną.

76



77

Cermetale

Są to materiały będące **spiekami wysokotopliwych i twardych węglików, tlenków i borków z metalami**. Łączą one właściwości metali (dobre wł. mech. w temp. otoczenia, odporność na udary cieplne) z właściwościami ceramiki (niewielka zmiana własności mechanicznych pod wpływem temperatury, żarowytrzymałość i odporność na korozję).

Przykłady zastosowań cermetali:

- spieki metalowo-diaamentowe, w których ziarna diamentu znajdują się w osnowie stopów metali na bazie Fe, Cu, Mo, W lub węglików WC, TiC stosuje się na okładziny metalowo-diaamentowych ściernic lub narzędzi stalowych; umożliwiają one obróbkę najtwardszych materiałów - węglików spiekanych, ściernic korundowych. Okładziny są też stosowane na korony narzędzi wiertniczych w górnictwie i pracach geologicznych.
- spieki proszków Cu i Fe, z dodatkami Sn, Pb, grafitu oraz SiO_2 i Al_2O_3 — materiały cierne, nakładki hamulców i tarcz sprzęgieł ciernych.
- spieki z proszku metalu i Al_2O_3 oraz węglików i borków — materiały żarowytrzymałe, stosowane są na elementy silników odrzutowych

78

Tworzywa sztuczne

Są to materiały składające się z polimerów naturalnych (np. drewno) lub syntetycznych oraz dodatków modyfikujących takich jak wypełniacze, stabilizatory, plastyfikatory, uniepalniacze, środki antystatyczne, środki spieniające, barwniki itp.

Tworzywa polimerowe - głównym składnikiem jest polimer

Zalety tworzyw sztucznych: mała gęstość, odporność na czynniki zewnętrzne, wysoka trwałość, włókna z niektórych tworzyw polimerowych mogą wykazywać wysoką wytrzymałość na rozciąganie (powyżej 3500 MPa - np. aromatyczne poliamidy – Kevlar), niskie koszty wytwarzania, obróbki oraz przetwórstwa.

Wady: niska odporność na wysokie temperatury, niska twardość i podatność na pękanie, bardzo długi czas rozkładu – zanieczyszczanie środowiska

Światowa roczna produkcja sięga obecnie 300 mln ton

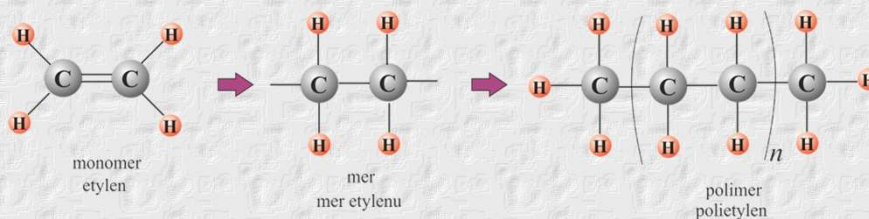
79

Tworzywem polimerowym nazywa się mieszaninę substancji wielkocząsteczkowej z dodatkami wypełniacza i barwnika. Substancjami wielkocząsteczkowymi (polimerami) nazywa się substancje o bardzo dużym ciężarze cząsteczkowym (powyżej 10^3 a.j.m).

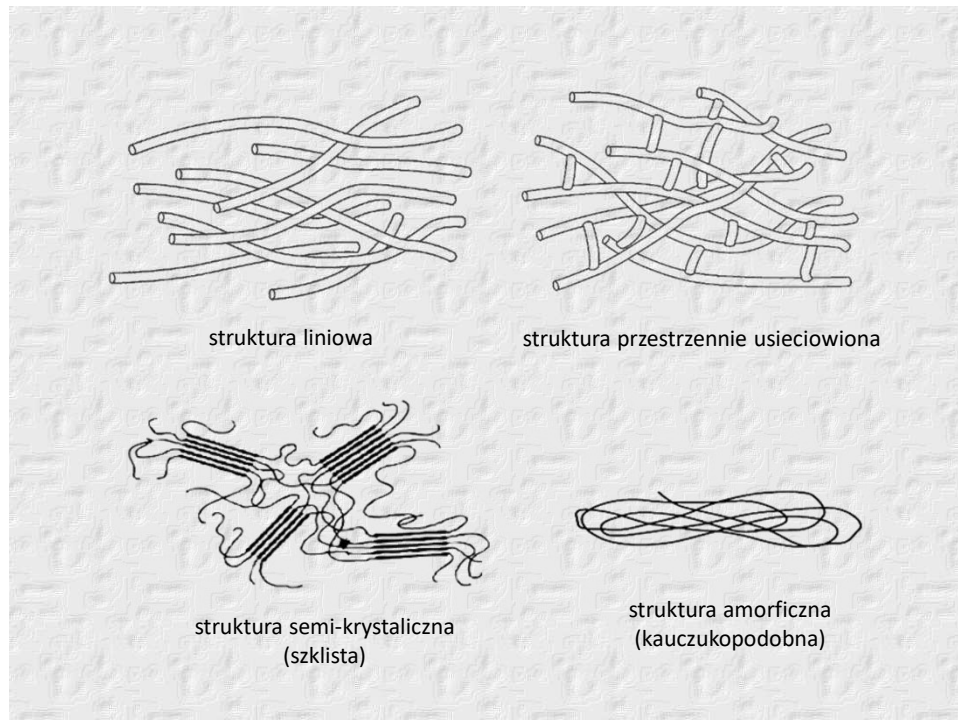
Podstawowe właściwości polimerów zależą głównie od ciężaru cząsteczkowego. Polimery o niskim ciężarze cząsteczkowym są płynne, oleiste, zaś o wielkim ciężarze cząsteczkowym są ciałami stałymi.

W skład polimeru wchodzi bardzo duża liczba dużych cząsteczek zwanych makrocząsteczkami tworzącymi określoną strukturę przestrzenną.

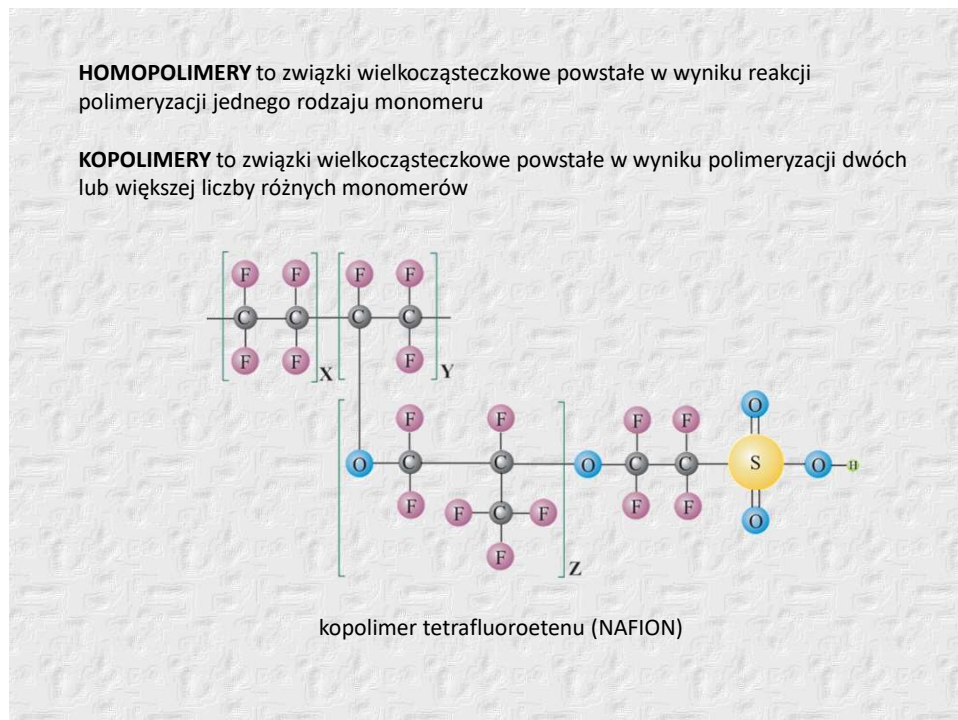
Każda makrocząsteczka składa się z elementów podstawowych zwanych merami (monomerami). Proces łączenia się merów w substancję wielkocząsteczkową nazywa się polimeryzacją, a uzyskany produkt polimerem. Proces odwrotny nosi nazwę depolimeryzacji



80



81



82

Klasyfikacja tworzyw sztucznych

Ze względu na metodę otrzymywania:

- produkty przemiany,
- produkty polikondensacji,
- produkty polimeryzacji,
- produkty poliaddycji,
- poliestry,
- żywice silikonowe.

Przykłady tworzyw sztucznych będących produktami przemian:

- fibra wulkanizowana - wynik chemicznej przemiany celulozy za pomocą ZnCl_2 lub H_2SO_4 -> przekładki elektrotechniczne, uszczelki
- celuloza regenerowana (celofan, tomofan) - modyfikacja celulozy przez działanie NaOH i CS_2 -> przekładki elektrotechniczne, opakowania foliowe, osłonki wędlin, jedwab wiskozowy
- azotan celulozy (celuloid) - wynik estryfikacji celulozy w obecności H_2SO_4 -> lakiery nitro, artykuły AGD
- octan celulozy (cellon, cellit) - modyfikacja celulozy mieszaniną kwasu octowego i bezwodnika kwasu octowego -> niepalne błony filmowe, opakowania, lakiery
- ester celulozy (Trolit) - estryfikacja celulozy różnymi alkoholami -> masy wtryskowe do produkcji artykułów elektrotechnicznych (dobre własności dielektryczne), lakiernictwo, kleje
- sztuczny róg (Galalit) - otrzymuje się przez modyfikację kazeiny formaldehydem -> zabawki, okładziny, sprzączki, guziki, itp.

83

Przykłady tworzyw sztucznych będących produktami polikondensacji (duroplastów):

- żywice szlachetne fenolowe (Dekovit) - otrzymuje się z fenolu i formaldehydu -> piankowe żywice fenolowe, wyroby galanteryjne, ozdobne
- tłoczywa fenolowe i krezolowe (Plastadur, Bakelit) - otrzymuje się z fenolu lub krezolu, formaldehydu i wypełniaczy (proszki mineralne, włókna, ścinki tekstylne, włókno szklane, itp). -> elektrotechniczne materiały izolacyjne
- laminaty fenolowe i krezolowe (Plastacart, Prestofol) - otrzymuje się z fenolu i krezolu, formaldehydu i materiałów warstwowych, np. arkuszy papieru, forniru, tkanin tekstylnych i szklanych -> płyty budowlane i dekoracyjne, materiały izolacyjne w elektrotechnice, panewki łożysk i koła zębate, itp. części maszyn.
- żywice karbamidowe (mocznikowe i melaminowe) - otrzymuje się je z mocznika i formaldehydu -> są fizjologicznie obojętne, kleje i lakiery, materiały piankowe (Piatherm) do izolacji cieplnej i akustycznej
- tłoczywa karbamidowe (Meladur) - otrzymuje się z mocznika lub melaminy, formaldehydu i wypełniaczy -> , przekładki izolacyjne, art. AGD
- laminaty karbamidowe (Sprelacart, Resopal) - otrzymuje się z mocznika lub melaminy, formaldehydu i materiałów warstwowych -> płyty dekoracyjne ścian, mebli, materiały grawerskie

84

Przykłady tworzyw sztucznych będących produktami polimeryzacji (termoplastów):

- polichlorek winylu (PVC, Ekadur, Owilit, Tarnavinył S, PCW) - otrzymuje się z acetyleny i chlorowodoru. Jest tworzywem produkowanym w największych ilościach -> folie, płyty, rury i inne wyroby profilowe oraz pasty, itp.
- polietylen (PEw, Politen, Lupolen) - otrzymuje się w procesie polimeryzacji etylenu. Zależnie od masy cząsteczkowej rozróżnia się polietylen miękki (wysokociśnieniowy) i polietylen twardy (niskociśnieniowy) -> opakowania, kształtki, i in. zastosowania bardzo szerokie we wszystkich dziedzinach techniki
- polipropylen (Malen PJ-400, Pimalen) - otrzymuje się w procesie polimeryzacji propylenu. Wysoki stopień krystaliczności tworzywa wpływa na jego wysokie właściwości mechaniczne i termiczne. Temperatura mięknienia (170 - 200°C) jest wyższa, niż większości innych termoplastów -> wyroby o wysokich wymaganiach termicznych, rury, narzędzia, aparatura
- poliizobutylen - otrzymuje się w procesie polimeryzacji produktów ropy naftowej. Zależnie od stopnia polimeryzacji może mieć postać lepkiego oleju lub twardej gumy -> dodatek uszlachetniający do smarów i klejów, folie, płyty, rurki elastyczne
- poliamid (Perlon, Dederon, Nylon, Miramid, Perfol) - otrzymuje się z pochodnych węgla, gazu ziemnego lub ropy naftowej -> niełamiwe artykuły codziennego użytku, artykuły techniczne o wysokich właściwościach wytrzymałościowych, włókna, lekkie tkaniny, itp.

85

- polistyren (Trolitul, Styroflex) - otrzymuje się z etylenu i benzenu -> nakrętki, tuby, przedmioty galanteryjne, materiały piankowe, itp.
- polimetakrylan metylu (Pleksiglas, Piacryl) - otrzymuje się z acetonu i cyjanowodoru -> światłowodowy, okna samolotów, artykuły codziennego użytku o dużej przezroczystości, itp.
- polioctan winylu - otrzymuje się z acetyleny, ropy naftowej i gazu ziemnego. Zależnie od stopnia polimeryzacji otrzymuje się substancje oleiste, kleiste lub twarde żywice -> roztwory dyspersyjne, mieszanki do powlekania, przemysł lakierniczy, tekstylny, itp.
- poliakrylonitryl (Wolpryla, Orion) - otrzymuje się z acetyleny i chlorowodoru. Tworzywo produkowane jest jako półprodukt w postaci włókien i przędzy -> tkaniny odporne na działanie czynników atmosferycznych, światła i chemikaliów, o bardzo dużej wytrzymałości i dużej zdolności ocieplającej, itp.
- policzterofluoroetylen (PTFE – Teflon, Algoflon, Soreflon) Posiada nadzwyczaj dużą odporność na ścieranie, niską chłonność wilgoci, wysoką odporność termiczną -> aparatura termoodporna, zawory, uszczelki, łożyska ślizgowe, itp.
- poliwęglan (Makrolon) - otrzymuje się z fożgenu i dianu. Półwyroby wytwarza się w postaci włókien, folii, rur. Charakteryzuje się bardzo dobrymi własnościami mechanicznymi i dielektrycznymi -> przemysł elektroniczny, medycyna, części maszyn o dużych wymaganiach technicznych oraz przedmioty codziennego użytku.

86

Przykładem tworzywa będącego produktem poliaddycji (polimeryzacji kondensacyjnej) jest poliuretan (Ułazian, Utagen, Moltopren) - otrzymuje się z acetylenu -> produkcja artykułów piankowych, technika klejów, lakierów, itp.

Do tworzyw poliestrowych zalicza się tworzywa chemoutwardzalne takie jak:

- żywice poliestrowe,
- żywice epoksydowe,

Żywice poliestrowe zwykle w postaci ciekłej po zastosowaniu wypełniaczy (np. włókna szklanego) służą do wytwarzania elementów o dużej wytrzymałości takich jak kadłuby łodzi, karoserie samochodów, wanny, itp.

Żywice epoksydowe (Epidian, Araldid) w postaci cieczy lub past (szpachlówek) znajdują zastosowanie jako żywice lane, adhezyjne i impregnacyjne. Na nich oparta jest technika klejenia metali

Żywice silikonowe stanowią odrębną kategorię. Są one zaliczane do związków krzemoorganicznych z wbudowanymi na miejscu atomów węgla, atomami krzemu. Otrzymuje się je z piasku kwarcowego, węgla, chloru poprzez czterochlorek krzemu. Oznaczają się dużą odpornością na skrajne temperatury (od -60 do 300 °C). W handlu spotyka się silikon w postaci oleistych cieczy i ciał stałych. Znajdują one zastosowania w przemyśle lakierów, materiałów polerskich, w elektrotechnice, technice próżniowej, w przemyśle skórzanym, w budownictwie itd.

87

Podział tworzyw sztucznych ze względu na właściwości mechaniczne i termiczne:

- tworzywa termoplastyczne,
 - tworzywa termoutwardzalne,
 - tworzywa wulkanizujące
- oraz
- elastomery (w. temp. pokojowej mogą być wydłużane o ponad 100% nawet do 1000%),
 - plastomery (w. temp. pokojowej możliwe wydłużenie nie przekracza 100%).

Do najważniejszych polimerów termoutwardzalnych należą: tworzywa mocznikowe (UF), fenolowe (PF), melaminowe (MF).

Do polimerów chemoutwardzalnych należy zaliczyć poliestry nienasycone (UP), epoksydy (EP).

Do elastomerów zalicza się tworzywa wulkanizowane, np. kauczuk naturalny, silikon (SI), oraz tworzywa niewulkanizujące, np. zmiękczonej polichlorek winylu (PVC), elastomery poliuretanowe.

Do plastomerów zalicza się termoplasty i duroplasty (termo- lub chemoutwardzalne).

Termoplasty przy ogrzewaniu mięknią, a po ostygnięciu twardnieją, duroplasty przy ogrzewaniu początkowo mięknią, lecz przy dalszym dostarczaniu ciepła twardnieją (tworzywa termoutwardzalne).

Duroplasty chemoutwardzalne, po wprowadzeniu do nich odpowiedniego związku chemicznego, utwardzają się.

88



89

Podstawowe właściwości wybranych tworzyw termoplastycznych

Nazwa	Symbol	Gęstość [kg/m ³]	R _m [MPa]	E [MPa]	T _m [°C]
Polichlorek winylu	PVC PCW	1380	55	2500	75
Polietylen wysokociśnieniowy	PEw	920	12	-	80
Polipropylen	PP	910	40	1300	151
Poliamid - 6	PA	1128	54	1900	189
Polistyren	PS	1040	30	2940	91

90

Zgrubna identyfikacja tworzyw na podstawie pomiaru gęstości

Gęstość [g/cm ³]	Rodzaj tworzywa
< 0,3	tworzywa porowate
0,9 ÷ 1,0	polietylen, polipropylen, poliizobutylen, kopolimery styrenu z butadienem, z akrylonitrylem
1,0 ÷ 1,2	polistyren, poliamidy, polimetakrylan metylu, polioctan winylu, poliestry nienasycone lane, poliwęglany
1,2 ÷ 1,3	poliuretany, octan celulozy, polialkohol winylowy, polichlorek winylu plastyfikowany, epoksydy lane
1,3 ÷ 1,4	azotan celulozy, fenoplasty lane (ewentualnie z napełniaczem org.), fenoplasty warstwowe tkaninowe, polichlorek winylu, chlorowany polieter (penton), poliestry kwasu tereftalowego (typu elany)
1,4 ÷ 1,7	aminoplasty z napełniaczami org., poliformaldehyd, fenoplasty warstwowe papierowe, polichlorek winylu z napełniaczem mineralnym, chlorokauczuk
1,7 ÷ 2,0	polichlorek winylidenu, tworzywa wzmacniane włóknem szklanym (poliestrowe, epoksydowe i in.)
> 2	polichlorofluoroetylen, polichlorotrójfluoroetylen, niektóre laminaty o dużej zawartości włókna szklanego, tworzywa z ciężkimi napełniaczami nieorganicznymi

91

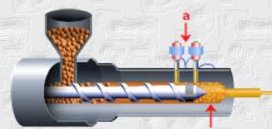
Tworzywa porowate

Tworzywa sztuczne zawierające w strukturze puste przestrzenie

dzielą się na:

tworzywa gąbczaste - pory otwarte i połączone wzajemnie

tworzywa piankowe - pory zamknięte

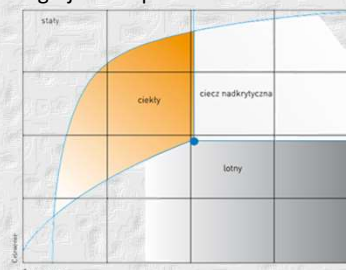


Tworzywa porowate wytwarza się w wyniku zwiększania objętości litej masy tworzywa (spienianie chemiczne lub fizyczne) lub bez jej zwiększania (wyfukiwanie)

Przy spienianiu chemicznym do tworzywa sztucznego dodaje się granulatu spieniającego. Spienianie następuje w wyniku reakcji chemicznej.

Przy spienianiu fizycznym do roztopionego tworzywa sztucznego jest bezpośrednio wprowadzany gaz (najczęściej azot w postaci cieczy nadkrytycznej).

Obydwie metody umożliwiają zmniejszenie gęstości i wyeliminowanie fazy docisku, ze wszystkimi związanymi z tym zaletami: krótszy czas wtrysku, mniejsze zużycie materiału, lepsza stabilność wymiarowa i in.



92

Technologia spieniania wykorzystywana jest do produkcji szerokiej gamy detali w licznych branżach przy użyciu niemal wszystkich tworzyw termoplastycznych.

W postaci tworzyw porowatych produkuje się detale polistyrenowe, poliuretanowe, poliwęglanowe, PCW i in.

Znajdują one liczne zastosowanie m.in. jako izolatory w elektrotechnice i budownictwie, pochłaniacze fal, surowiec do wyrobu opakowań, filtrów, wypełnień itd.



93

Oznakowania tworzyw sztucznych i innych materiałów

	Politereftalan ETylenu - PET (PolyEthylene TErephthalat - PETE) Polietylen - butelki na wodę i napoje, włókno poliestrowe
	Polietylen dużej gęstości (High Density PoliEthylene lub PoliEthylene High Density). Istnieje jeszcze odmiana MDPE (Medium DensityPoliEthylene) - średnio gęsty polietylen - - butelki na mleko, oleje i detergenty, torby, zabawki, pojemniki (do użytku pod gołym niebem), imitacja drewna
	PoliChlorek Winyłu - PCW (PoliVinyle-Chlorane - PVC, czasem tylko V - Vinyle); PVC twardy - winidur - podobny z wyglądu do polipropylenu, PVC miękki - winiplast - podobny z wyglądu do polietylenu; ramy okienne, pojemniki na chemikalia, wykładziny i płytki podłogowe, części samochodowe.
	Polietylen małej gęstości (Low Density PoliEthylene lub PoliEthylene Low Density, czasem oznakowany tylko dwoma literami - PE) - torby na zakupy, naczynia jednorazowe, pojemniki, rury. Odmiana - LLDPE.
	PoliPropylen (PoliPropylene - PP) - zderzaki samochodowe i elementy wykończenia wnętrz aut, włókna przemysłowe (worki, maty, dywany), pojemniki do chłodziarek. Naczynia z PP oznakowane jako no BPA / BPA Free, czyli nie zawierające Bisfenolu A są dostosowane do kontaktu z żywnością

94

	PoliStyren - PS - PoliStyrene, EPS (twardy spieniony polistyren - mold), OPS (orientowany polistyren), PSP (miękki). Zabawki, doniczki, kasety video, popielniczki, kadłuby małych jednostek wodnych (trunks), opakowania ochronne, opakowania mięsa
 	O - OTHER - wszelkie INNE tworzywa sztuczne (np. plastik poliwęglanowy PC - PolyCarbonate plastic) i laminaty folii z tworzyw sztucznych (PA - PolyAmide, SAN- Styrene AcryloNitrile, PAN - PolyAcryloNitrile, acrylic plastics). Do tej grupy zaliczane są też tworzywa sztuczne pochodzenia organicznego (tzw. bioplastics, np. PLA - PolyLactic Acid). To może być również mieszanina innych polimerów... Recykling: nie występuje (tylko wysypiska - landfill)
	Acrylonitrile Butadiene Styrene - akrylonitryl butadien styren, twardy, odporny na zarysowania, uduy i chemikalia, wrażliwy na światło i promieniowanie UV - nadkola, przyciski, obudowy (komputery i monitory, RTV, AGD, telefony), części mebli, zabawki, rurociągi termoplastyczne

95

Oznakowania innych materiałów substancje groźne dla środowiska, chemicznie aktywne i trujące	
	baterie (ogniwa) ołowiowo-kwasowe (Lead-Acid) - akumulatory samochodowe
	baterie (ogniwa) niklowo-kadmowe (Nickel-Cadmium)
	baterie (ogniwa) niklowo-metalowo-wodorkowe (Nickel-Metal Hydride)
	baterie (ogniwa) litowe (Lithium)
	baterie (ogniwa) srebrowo-cynkowe (Silver-Oxide-Zinc)
	baterie (ogniwa) węglowo-cynkowe (Carbon-Zinc)
	baterie (ogniwa) alkaliczne (Alkaline) - czasami oznaczane cyfrą 9

96

Materiały celulozowe

 20 C PAP  20 PCB	karton, tektura falista, papier pakowy (C PAP - Cardboard PAPer, PCB - PaperCardBoard) i wyroby z tych materiałów kartonowe opakowania wyrobów z Chin mają jeszcze inne oznakowania: CB (CardBoard) lub CFB (Card FiberBoard)
 21 PAP	inny papier, mieszany, tektura - prasa, poczta, ulotki, papier piśmienny
 22 PAP	papier - PAPer papier piśmienny, do kopiarek i drukarek
 23 PPB  23 PBD	papier i tektura powlekane (PBD - PaperBoarD, inny skrót to PPB) - widokówki, opakowania mrożonek, okładki

97

Metale i szkła i inne

 40 FE	żelazo i stal blacha stalowa (FErrum) lub blacha stalowa ocynkowana
 41 ALU  alu	ALUminium
 50 FOR  51 FOR	50 drewno (FORest), 51 korek
 60 COT	bawełna
 61 TEX ...  69 TEX	różne materiały tekstylne
 70 GLS ...  79 TEX	szkła: 70 mieszane, 71 przeźroczyste, 72 zielone, 73 brązowe, 74 beżowate, 75 niskootłowiowe, 76 ołowiowe, 77 miedziowane, 78 srebrzone, 79 złoczone
 81 PapPet	papier (PAP) PET (Politereftalan ETylenu)
 84 PapAl	papier (Pap) powlekany aluminium (Al)

98

pozostałe

	papier laminowany tworzywem
	tworzywa sztuczne połączone z aluminium
	tworzywa sztuczne połączone ze stalową blachą ocynkowaną
	tworzywa sztuczne połączone z innymi metalami
	połączenie szkła z różnymi tworzywami sztucznymi
	szkło z aluminium
	szkło połączone ze stalową blachą ocynkowaną
	szkło połączone z różnymi metalami