



MATERIAŁY ELEKTRONICZNE

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

1

Podstawowe własności fizyczne

1. Prądu elektrycznego
2. Przewodników
3. Półprzewodników samoistnych
4. Półprzewodników domieszkowanych
5. Izolatorów
6. Materiałów o własnościach specjalnych

Zaliczenie na podstawie kolokwium końcowego

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

2

LITERATURA



Zbigniew Szczepański, Stefan Okoniewski, Technologia i materiałoznawstwo dla elektroników, wyd. V, WSiP, 2012.

Leszek A. Dobrzański, Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo, wyd. 2, WNT 2006.

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

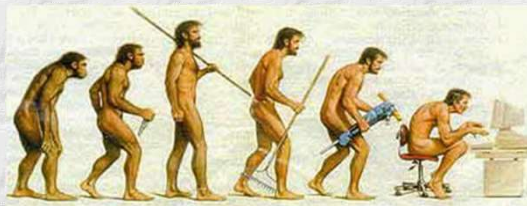
Yip-Wah Chung, Introduction to Materials Science and Engineering, CRC Press, 2006

Shyam P. Murarka, Martin C. Peckarar, Electronic Materials: Science and Technology, 2006

L. A. A. Warnes, Electronic Materials, Springer, 2014

3

Nauka o materiałach jest tak stara jak cywilizacja



Współcześnie wyróżnia się dwie jej główne gałęzie:

MATERIAŁOZNAWSTWO

badanie własności fizycznych materiałów zarówno naturalnych jak i sztucznych
klasyfikacja i opis materiałów

INŻYNIERIA MATERIAŁOWA

modyfikacja materiałów naturalnych, konstrukcja materiałów sztucznych
badania nowych obszarów zastosowań

Obszary zainteresowań obydwu tych dziedzin częściowo się pokrywają

4

Materiałem nazywa się każdą substancję stanowiącą potencjalne tworzywo konstrukcyjne

MATERIAŁY NATURALNE

drewno
metale
półprzewodniki samoistne
kryształy naturalne
tworzywa naturalne
włókna naturalne
minerały

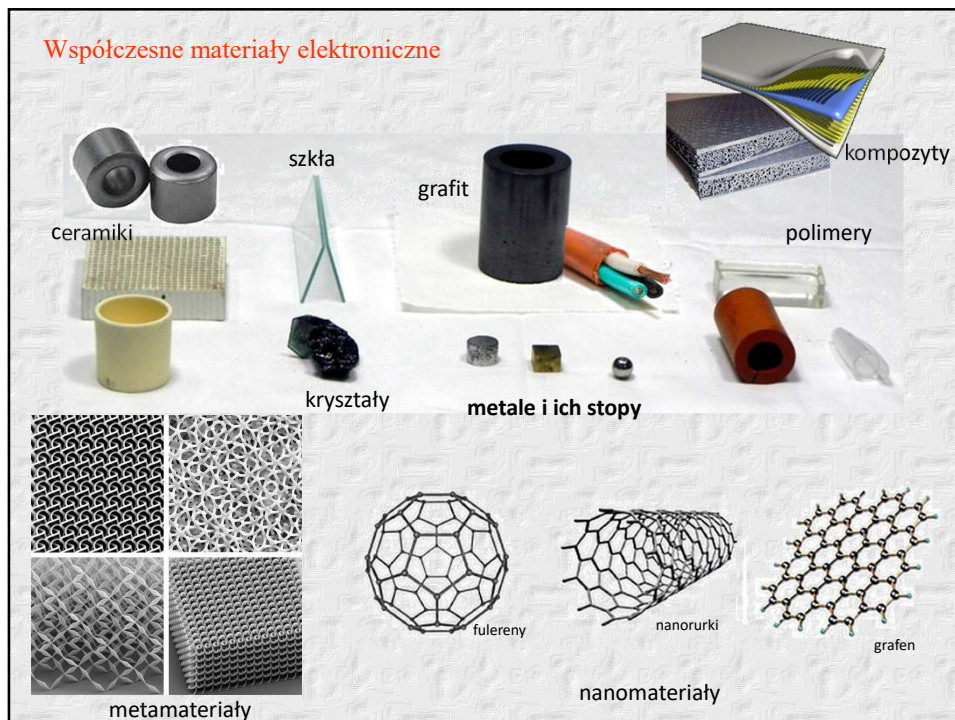
MATERIAŁY SZTUCZNE

stopy metali
półprzewodniki domieszkowe
kryształy sztuczne
tworzywa sztuczne
materiały ceramiczne
kompozyty
włókna sztuczne
tkaniny
metamateriały
nanomateriały

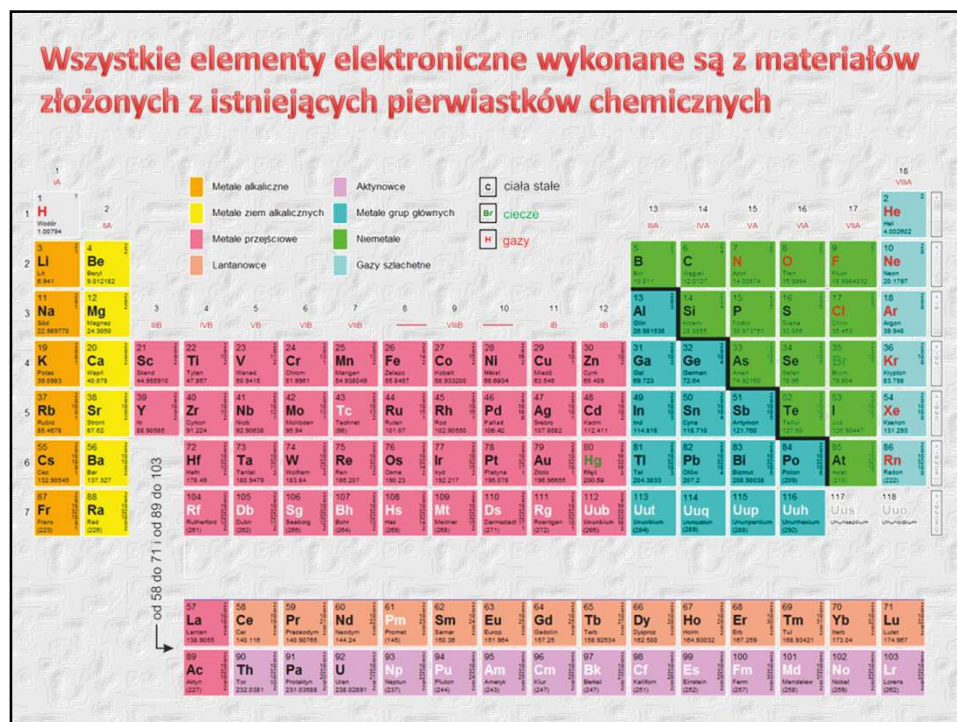
Nauka o materiałach jest interdyscyplinarna operując na styku fizyki i chemii

5

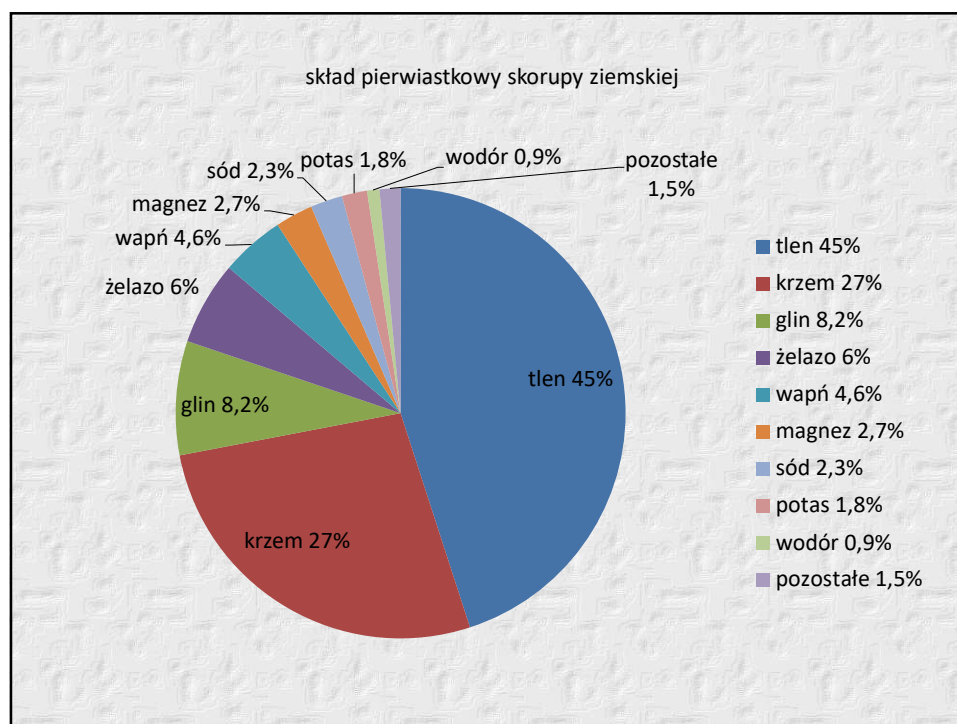
Współczesne materiały elektroniczne



6

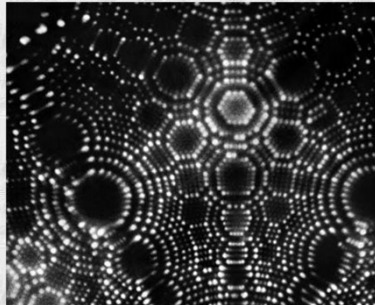


7

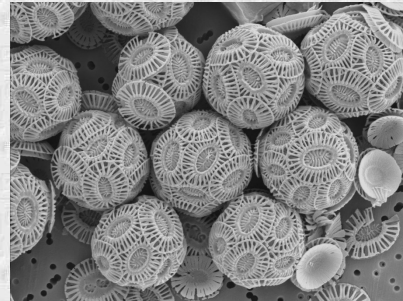


8

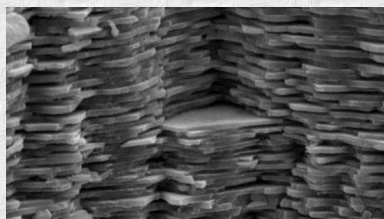
Własności materiałów wynikają zarówno z ich struktury atomowej, nanostruktury jak i struktury makroskopowej



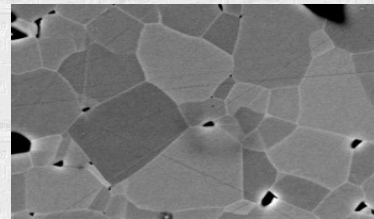
wolfram



kreda



macica perłowa



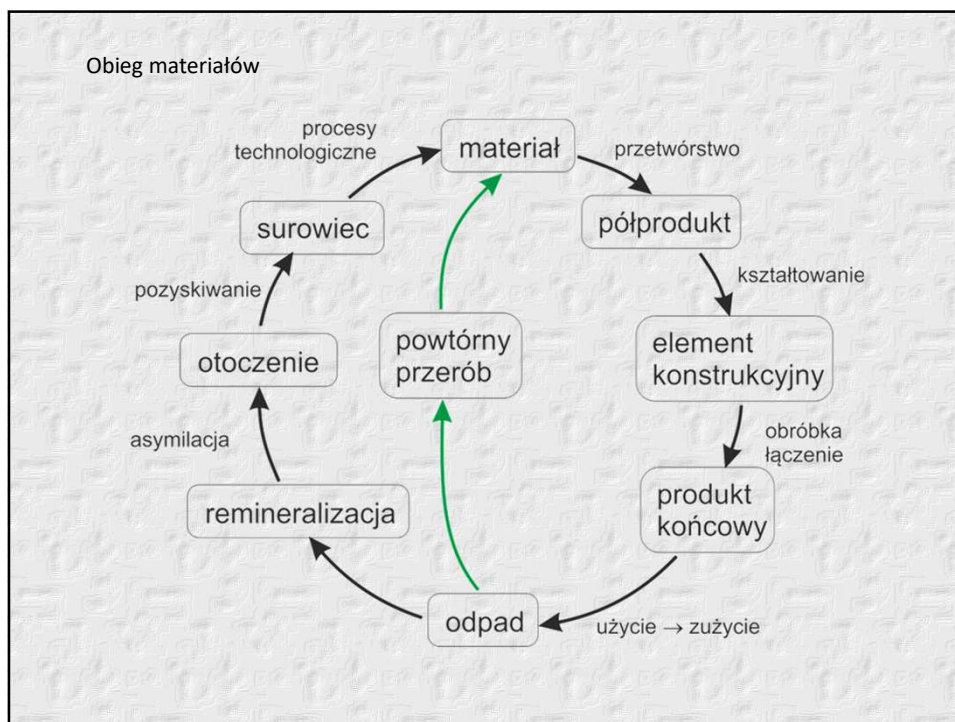
piezoceramika

9

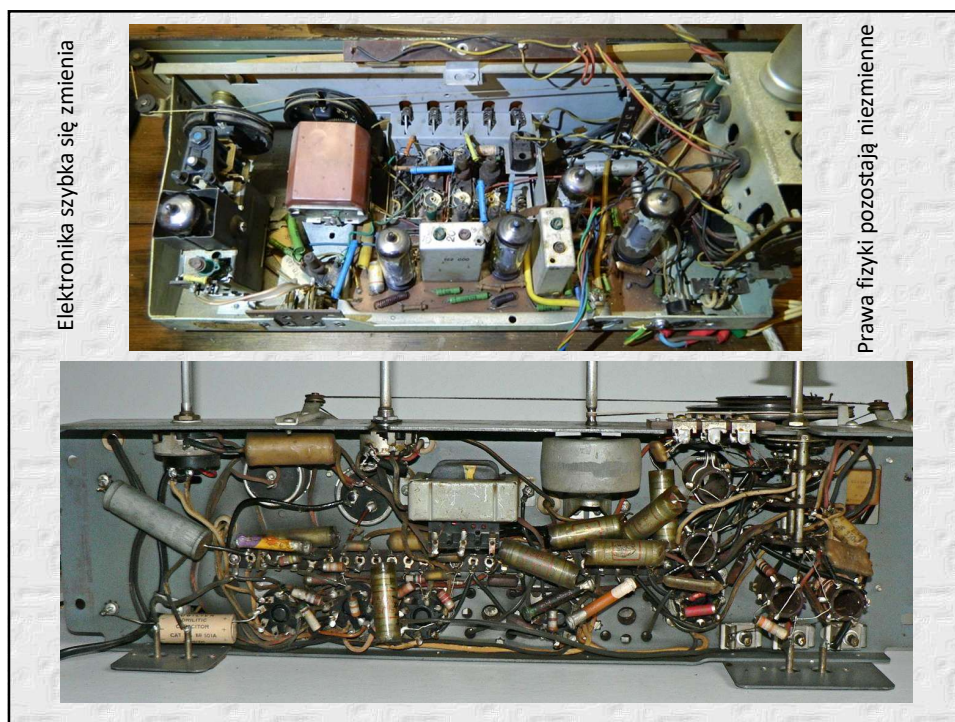
Podstawowe właściwości materiałów

ekonomiczne	cena i dostępność
mechaniczne	gęstość
	współczynnik sprężystości i tłumienia
	granica plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, twardość
	odporność na pękanie
	wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na zmęczenie cieplne
niemechaniczne	odporność na pełzanie
	cieplne
	optyczne
	magnetyczne
	elektryczne
powierzchniowe	elektromagnetyczne
	utlenianie i korozja
produkcyjne	tarcie, ścieralność i zużycie
	łatwość wykonania, łączenia części, wykończenia
estetyczne	wygląd, powierzchnia, dotyk, zapach
środowiskowe	toksyczność, łatwość utylizacji lub ponownego przetworzenia

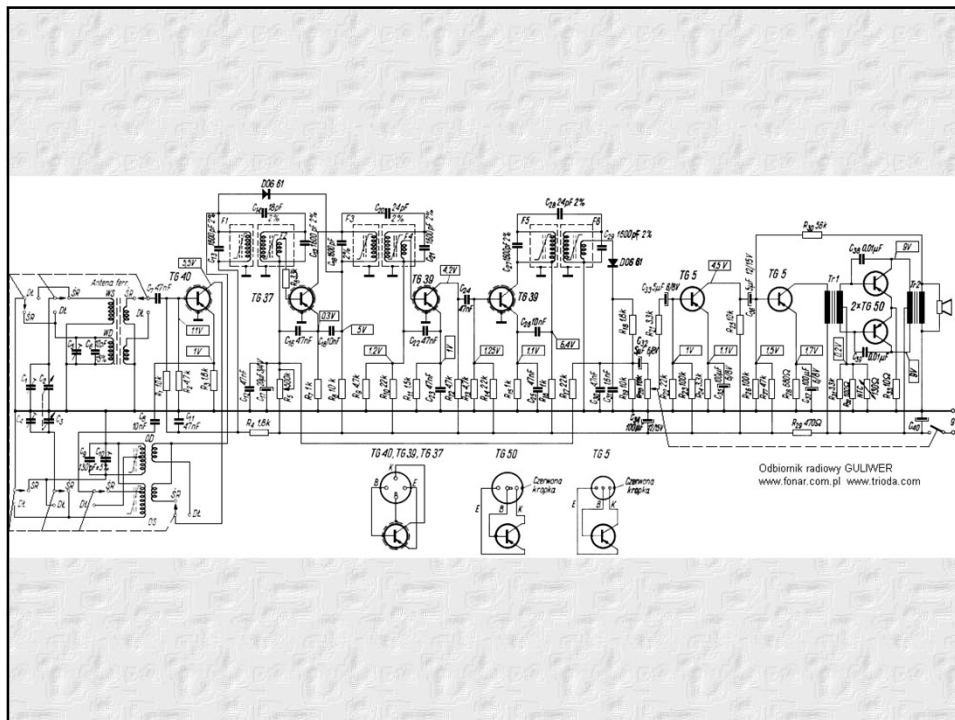
10



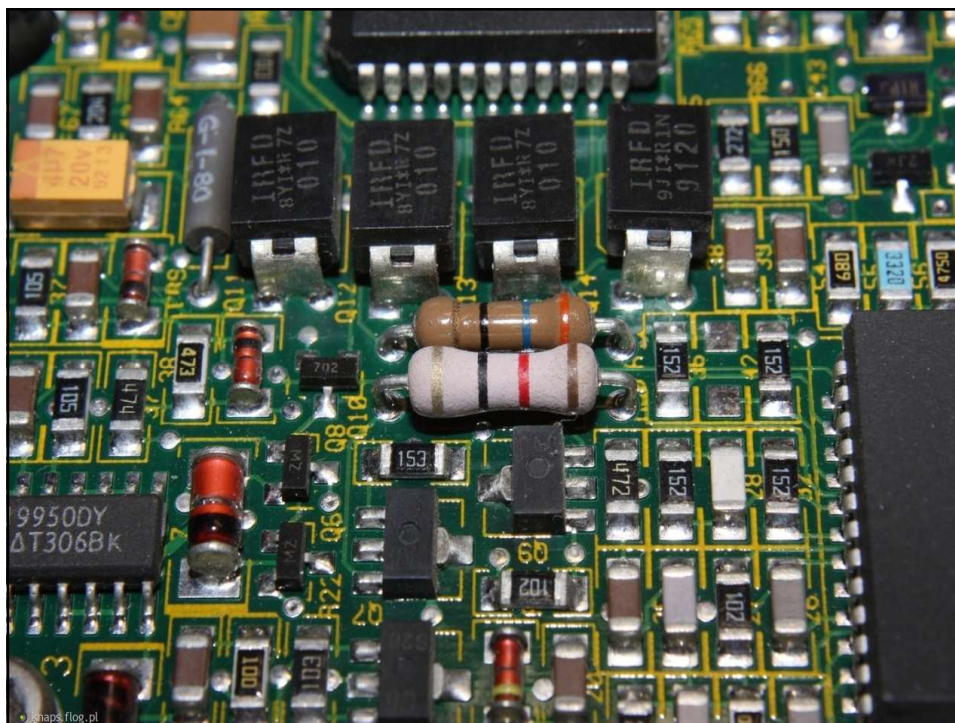
11



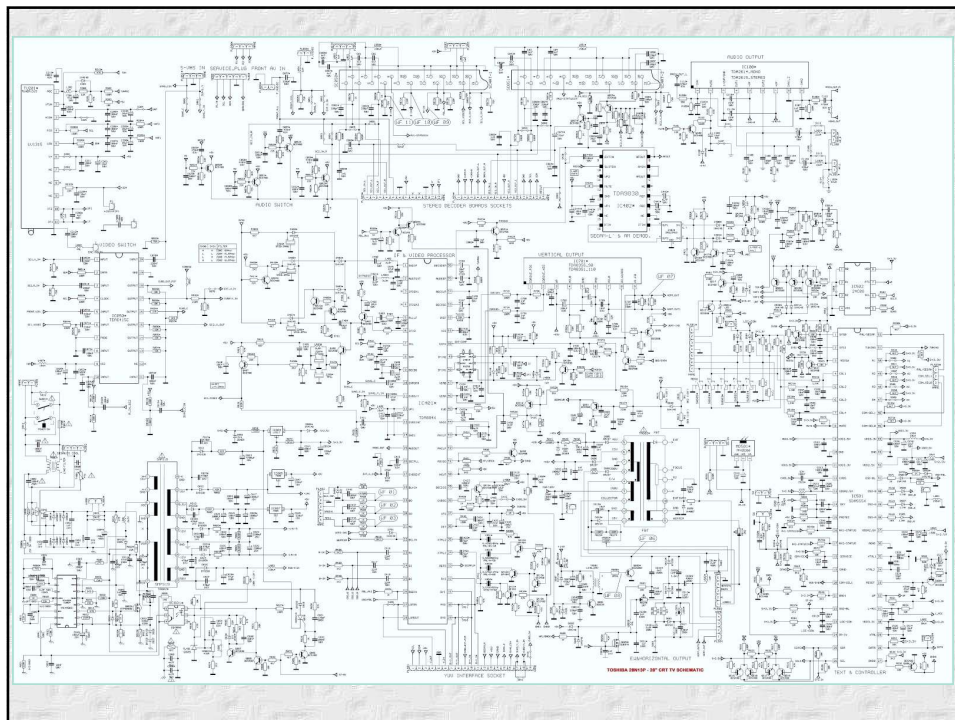
12



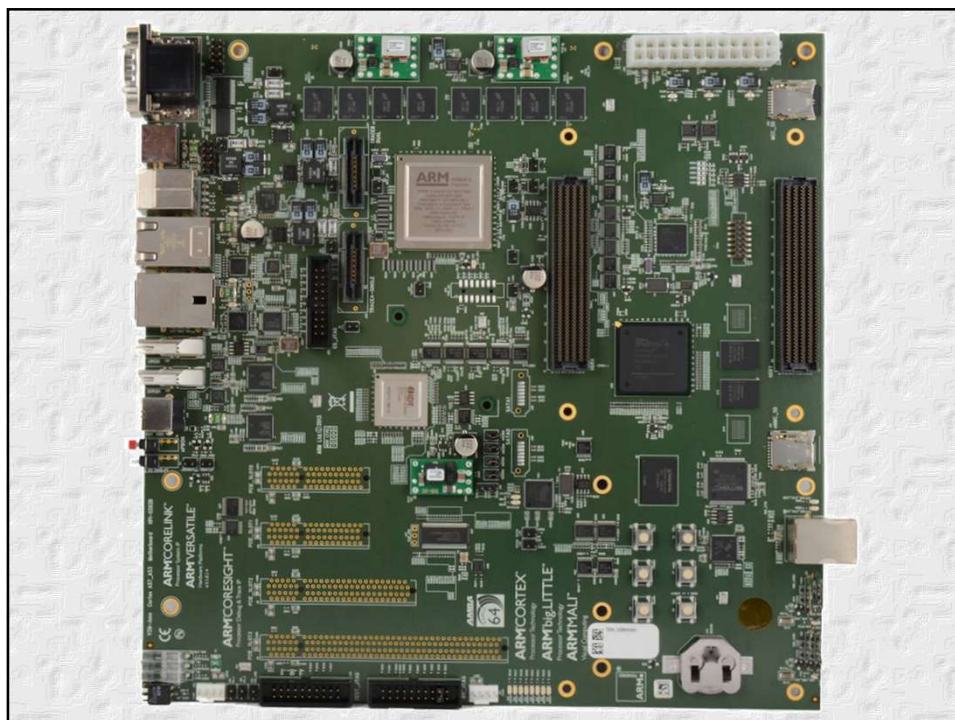
15



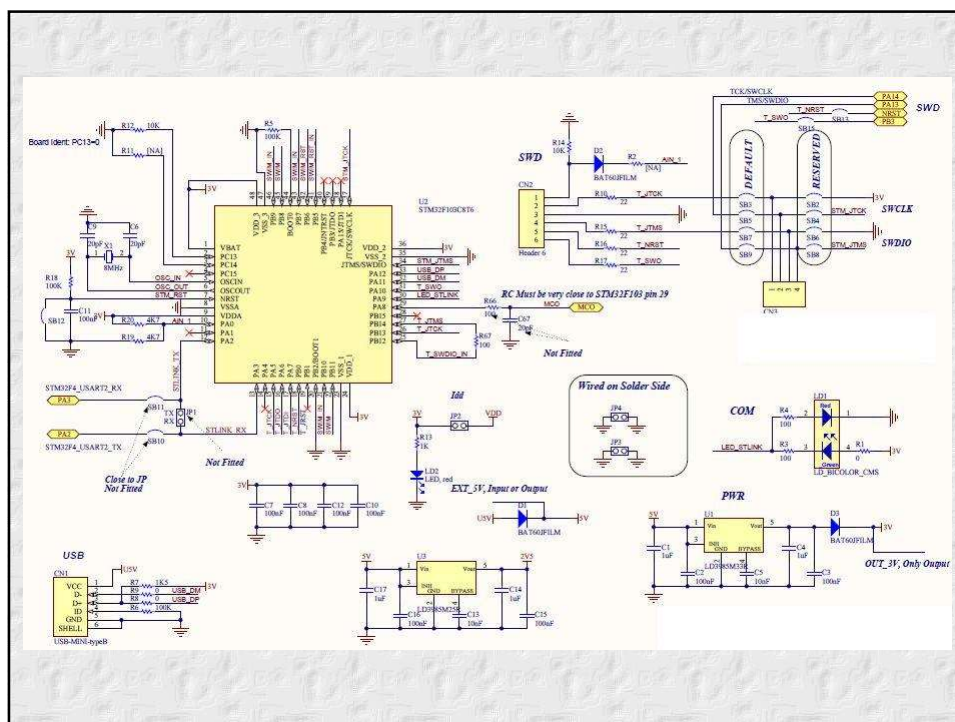
16



17



18



19



PRZEWODNIKI ELEKTRYCZNE

Materiały o niskiej rezystywności i wysokiej przewodności

20

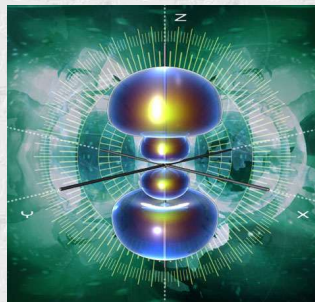
Atomy i ładunki

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

21

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

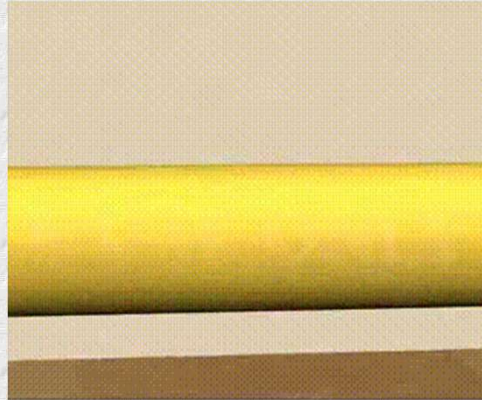
parametry orbitali zależą od oddziaływań elektronów z jądrem i pomiędzy sobą

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

22

Jeżeli ilość energii dostarczonej do atomu jest dostatecznie duża (np. energii cieplnej), to elektrony położone najdalej od jądra (elektrony walencyjne) mogą pokonać siły wiążące je z jądrem i stać się **elektronami swobodnymi**.



23

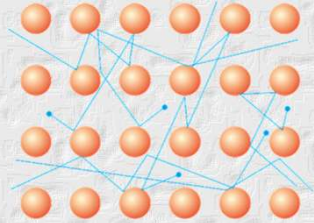
Założenia modelowe:

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 gęstego gazu
- są cząstkami punktowymi – praktycznie nie mają rozmiarów
- w próżni mają masę spoczynkową około $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$; $1 \text{ eV}/c^2 = 1,783 \times 10^{-36} \text{ kg}$
- w ośrodku mają masę mniejszą niż w próżni z uwagi na oddziaływanie 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

24

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

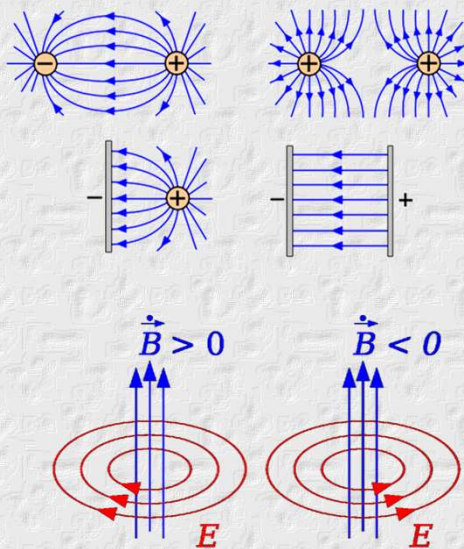
$8,4 \cdot 10^{22} / \text{cm}^3$ dla miedzi

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

$7,5 \cdot 10^{18}$ szacunkowa liczba ziarenek piasku na świecie

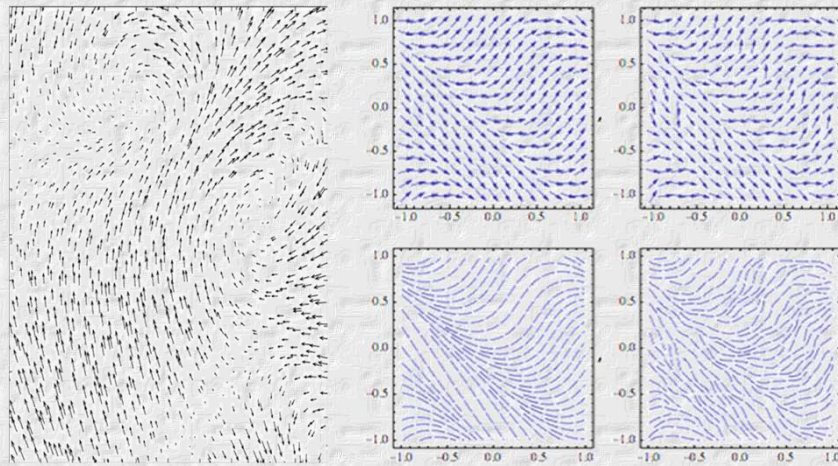
25

Ładunki elektryczne oraz zmienne pola magnetyczne generują pola elektryczne



26

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



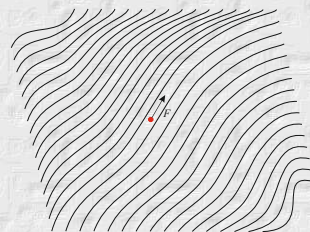
Linie sił pola to linie, do których wektory sił są styczne w każdym punkcie przestrzeni

27

Natężenie pola elektrycznego od ładunku punktowego 1 C w próżni w odległości 1 m wynosi ok. $9 \cdot 10^9$ V/m

Od jednego elektronu ok. $1,4 \cdot 10^{-9}$ V/m

Złożone układy ładunków generują złożone pola elektryczne

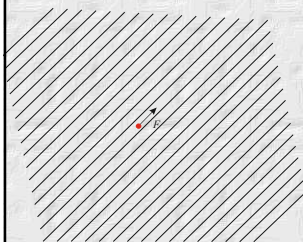


$F = Eq$ siła działająca na ładunek próbny q w jednorodnym polu elektrycznym E

$F = k_C \frac{q_1 q_2}{r^2}$ siła odpychania lub przyciągania dwóch ładunków punktowych oddległych od siebie o r ; k stała Coulomba

$$\text{w próżni } k_C = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \approx 8,99 \cdot 10^9 \left[\frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \right]$$

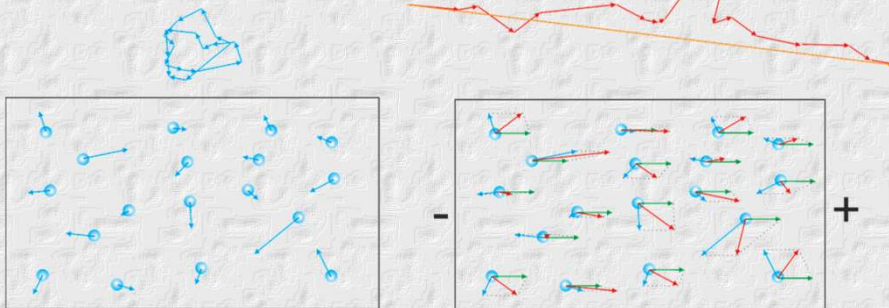
$$[\text{V}] = \left[\frac{\text{J}}{\text{C}} \right] = \left[\frac{\text{kg m}^2}{\text{As}^3} \right] \rightarrow [\text{E}] = \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$



28

Prąd jest ruchem ładunków wywołanym poprzez działanie pola elektrycznego we wnętrzu przewodnika

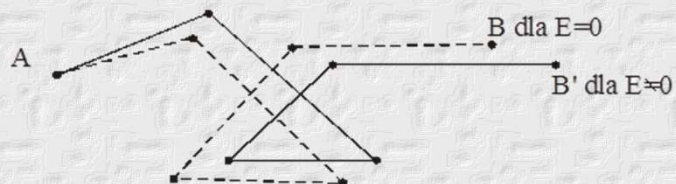
Ruch ładunków jest chaotyczny – pod działaniem pola elektrycznego w pewnym stopniu się porządkuje



prąd nie płynie – siły się równoważą
(w skończonym wycinku przewodnika nie całkowicie)

prąd płynie – brak równowagi sił

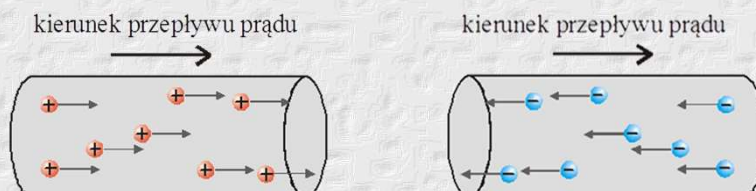
29



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

Kierunek przepływu prądu jest umowny.

Przyjęto, że jest on zgodny z ruchem ładunków dodatnich (jonów).



30

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 można obliczyć porównując energie

$$\frac{m_e v_c^2}{2} = \frac{3}{2} kT \rightarrow v_c = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$$

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

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

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

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

$$q = S e n v_u$$

31

natężenie prądu wyniesie zatem

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

gęstość prądu

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

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

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

lub inaczej **przewodności elektrycznej**

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

32

Proporcja

$$j = \sigma E$$

jest równoważna prawu Ohma, co łatwo sprawdzić uwzględniając zależności:

$$i = jS \quad E = \frac{U}{l} \quad R = \frac{l}{\sigma S} = \rho \frac{l}{S}$$

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 uwiadamia zależność tych parametrów od temperatury oraz możliwość nadprzewodnictwa

33

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} [$1/^\circ\text{C}$] 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

34

Przykład – gęstość prądu, pole elektryczne i rezystancja 1 m drutu miedzianego 12 AWG z prądem 0,5 A.

$$J = \frac{I}{S} = \frac{0,5}{3,31 \cdot 10^{-6}} \approx 0,15 \cdot 10^6 \text{ [A/m}^2\text{]}$$

$$R = \rho \frac{l}{S} \approx 1,68 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{1}{3,31 \cdot 10^{-6}} \approx 5 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$E = \rho J \approx 1,68 \cdot 10^{-8} \cdot 0,15 \cdot 10^6 \approx 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ [V/m]}$$

Size	Conductor Diameter	Outer Diameter	Insulation Thickness	Conductor Resistance	Electric Current
30AWG	0.30 mm	0.8 mm	0.05 mm	331 Ω/km	0.8 A
28AWG	0.32 mm	1.2 mm	0.08 mm	227 Ω/km	1.2 A
26AWG	0.44 mm	1.5 mm	0.15 mm	123 Ω/km	3.5 A
24AWG	0.58 mm	1.6 mm	0.20 mm	97 Ω/km	5.0 A
22AWG	0.72 mm	1.7 mm	0.30 mm	88 Ω/km	8.7 A
20AWG	0.92 mm	1.8 mm	0.50 mm	62 Ω/km	13 A
18AWG	1.20 mm	2.3 mm	0.55 mm	39 Ω/km	22 A
16AWG	1.53 mm	3.0 mm	0.80 mm	24 Ω/km	35 A
14AWG	1.75 mm	3.5 mm	0.90 mm	15 Ω/km	55 A
12 AWG	2.50 mm	4.5 mm	1.00 mm	9.0 Ω/km	88 A
10 AWG	3.00 mm	5.5 mm	1.20 mm	6.3 Ω/km	140 A
8 AWG	4.40 mm	6.3 mm	1.20 mm	4.0 Ω/km	190 A
7 AWG	4.60 mm	7.2 mm	1.20 mm	1.2 Ω/km	205 A
6 AWG	5.20 mm	8.5 mm	1.65 mm	1.2 Ω/km	230 A

AWG - American Wire Gauge

W Polsce standardowe przekroje żył przewodów wynoszą kolejno:
0,5; 0,75; 1; 1,5; 2,5; 4; 6; 10; 16; 25; 35; 50; 70; 95; 120; 150; 185; 240; 300; 400 i 500 mm².

35

Porównanie parametrów najbardziej rozpowszechnionych materiałów przewodowych

parametr	oznaczenie	jednostka	Al	Cu
konduktywność	σ	MS/m	34,5	55-56
gęstość	ρ	kg/m³	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 obłuzowania 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

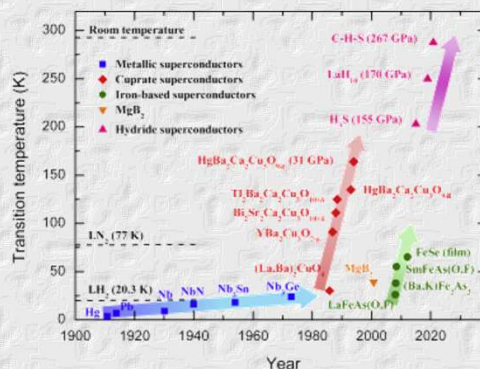
36

Nadprzewodniki

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

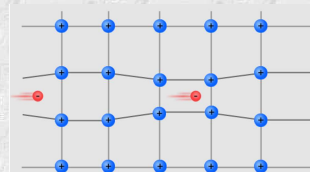
materiały takie są też idealnymi diamagnetykami w stanie nadprzewodzenia wypychając ze swej objętości linie sił pola magnetycznego (efekt Meissnera).

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.



37

Para Coopera



W skrajnie niskich temperaturach elektrony mogą łączyć się w pary na dość znacznych odległościach (około 10 000 Å) poprzez drgania sieci krystalicznej (fonony), których są źródłem. Duże odległości wykluczają oddziaływania kulombowskie między nimi.

Schłodzona do ekstremalnie niskich temperatur sieć krystaliczna ma mocno ograniczone drgania, a w związku z tym prawdopodobieństwo zderzenia się z nią elektronów jest niskie.

Elektron poruszający się takiej sieci zaburza swoim ładunkiem równowagę jonów, który wychyla się ze swojego położenia równowagi. Pociąga to za sobą ruch innych jonów sieci, powstaje fala nazywana fononem. Fala taka ulec może wygaszeniu lub też pobudzić do drgań inny elektron – musi mieć on spin przeciwny. Taka połączona drganiem mechanicznym para elektronów jest nośnikiem prądów nadprzewodzących.

Elektrony mają spiny połówkowe (fermiony) ale spin wypadkowy pary Coopera jest całkowity. Para ta jest więc bozonem i zachowuje się jak naładowana cząstka.

38

Złącze Josephsona

nadprzewodnik | bariera | nadprzewodnik

Są to dwa nadprzewodniki oddzielone bardzo cienką warstwą (~nm) dielektryka lub zwykłego przewodnika. Warstwa ta stanowi barierę, przez którą tunelują pary Coopera

Ponieważ funkcje falowe po obu stronach bariery mają różne fazy przez złącze płynie prąd opisywany **pierwszym prawem Josephsona**

$$I = I_{\Phi} \sin \varphi$$

I_{Φ} parametr złącza zależy od materiału, temperatury i zewnętrznego pola magnetycznego
 φ różnica faz funkcji falowych par Coopera po przeciwnych stronach złącza

Jeżeli do złącza przyłożymy napięcie $u(t)$, to faza będzie się zmieniać proporcjonalnie do tego napięcia - zgodnie z **drugim prawem Josephsona**

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} = \frac{2e}{\hbar} u(t)$$

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,05 \dots \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} \quad \text{zredukowana stała Plancka zwana też stałą Diraca}$$

39

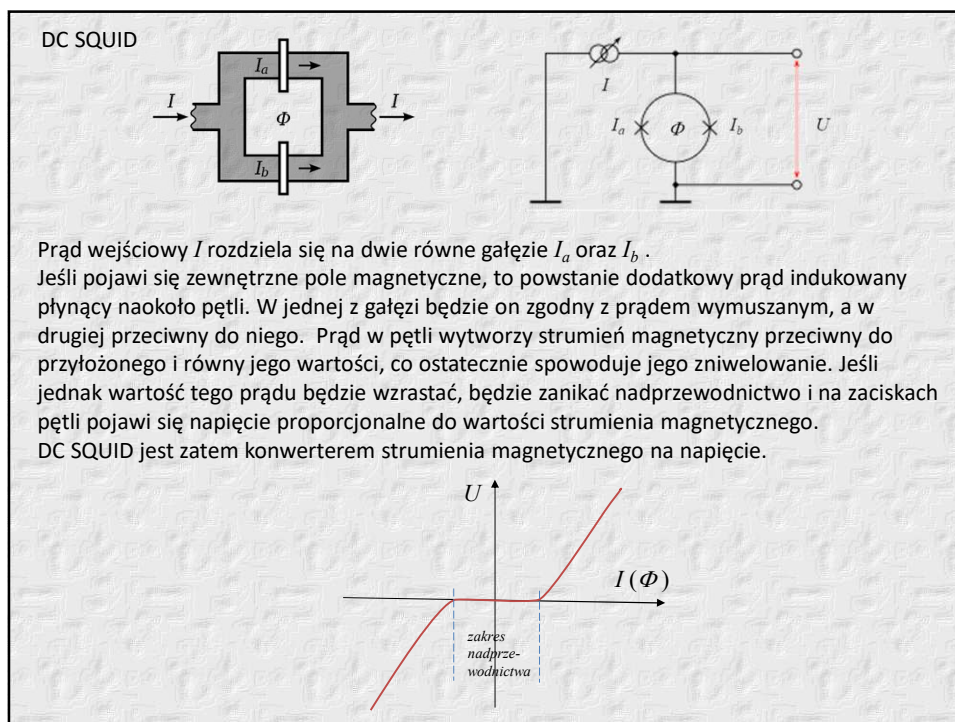
Tunelowanie Josephsona jest wykorzystywane w detektorach SQUID (czyt. skwid ang. *superconducting quantum interference device*)

Wykorzystuje się je w przyrządach do pomiaru bardzo słabych pól magnetycznych (m.in. wywołanych akcją serca – magnetokardiografia), bardzo niskich napięć i prądów, a także wzorców jednostki napięcia.

Działanie elementów wykorzystujących zjawisko Josephsona opiera się na efekcie Meissnera: dla określonej wartości natężenia prądu w jednym z nadprzewodników wytworzone przez nie pole magnetyczne niszczy stan nadprzewodzący w drugim z nadprzewodników. Elementy tego rodzaju mają bardzo krótki czas przełączania i ekstremalnie mały pobór mocy. Złącze Josephsona mogą być wykorzystywane jako bardzo szybkie jednostki logiczne około stukrotnie szybsze od krzemowych elementów półprzewodnikowych.

Istnieją dwie konfiguracje detektora SQUID stałoprądowa (DC) i mikrofalowa RF. Pierwsza zawiera dwa złącza Josephsona, a druga tylko jedno takie złącze.

40



41

Można także DC SQUID opisać od strony kwantowej.
 Bez pola magnetycznego fazy funkcji falowych związanych z parami Coopera w obydwu gałęziach muszą być identyczne i ich różnica wynosi 0 – prąd naokoło pętli nie płynie ale płynie przez przyrząd – prądy na wyjściu się sumują.
 Po przyłożeniu zewnętrznego pola magnetycznego różnica faz stanie się niezerowa i będzie proporcjonalna do jego strumienia.

$$\Delta\varphi = \frac{2e}{\hbar} \Phi$$

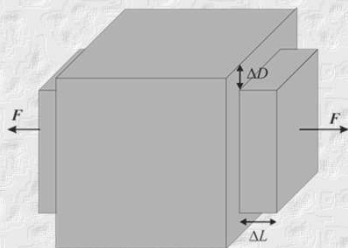
Różnica faz wywoła prąd w pętli zgodnie z pierwszym prawem Josephsona.
 Po przekroczeniu przez ten prąd wartości progowej generowane przez pole magnetyczne zacznie niwelować nadprzewodnictwo i na złączu pojawi się napięcie.

Detektory SQUID są bardzo czułe reagując na pola rzędu $5 \cdot 10^{-18}$ T. Procesy biologiczne generują pola od 10^{-9} do $5 \cdot 10^{-6}$ T. Ziemskie pole magnetyczne ma wartość ok. $30 \cdot 10^{-6}$ T.

Wersja RF SQUID jest prostsza ale mniej czuła. Zawiera tylko jedno złącze Josephsona i jest indukcyjnie sprzężona z układem odczytu. Zewnętrzne pole magnetyczne powoduje zmianę jej częstotliwości rezonansowej.

42

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 przewodzącego będzie miała wpływ na jego rezystancję (efekt piezorezystancyjny).

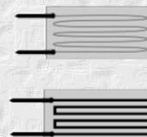
to rozciąganie (ściskanie) materiału

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

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

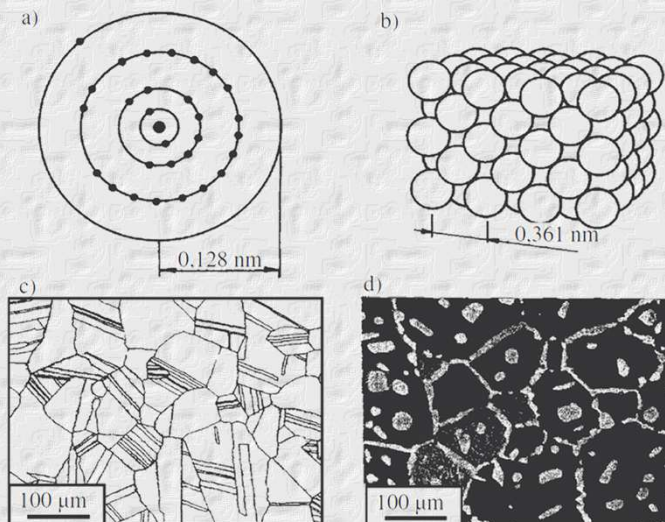
dominuje w półprzewodnikach

dominuje w metalach



43

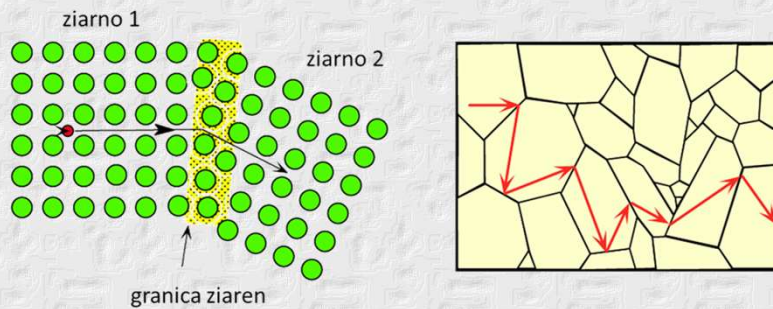
Metale mają strukturę polikrystaliczną



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

44

Struktura polikrystaliczna zwiększa rezystywność metali i stopów



Granice utrudniają ruch ładunków

45

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)

46

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.

47

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

48

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.

49

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

50

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 $Z = 80 \div 95\%$.

51

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

52

Żelazo i jego stopy

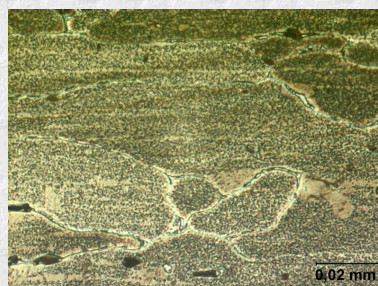
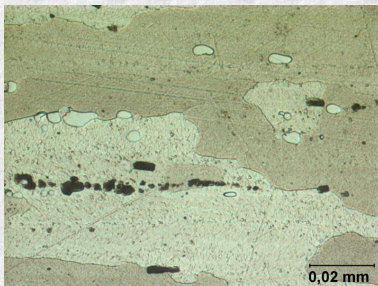
- Posiada 25 izotopów z przedziału mas 45–69. Trwałe są izotopy 54, 56, 57 i 58. najbardziej rozpowszechniony jest izotop 56 (ok. 92%)
- liczba atomowa równa 26
- w związkach chemicznych może być nawet sześciowartościowy
- rozróżnia się cztery odmiany alotropowe α , β , γ i δ krystalizujące w sieci regularne ściennie lub przestrzennie centrowane
- temperatura topnienia wynosi 1538 °C, a wrzenia ok. 2861°C
- gęstość 7874 kg/m³ 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. stale stopowe) stosuje się też mangan, chrom, molibden, wanad, krzem i in.

53

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 eutektoidalną ferrytu i cementytu, przy zawartości węgla 4,3% powstaje ledeburyt



54

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

55

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.

56

Spojwa 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.

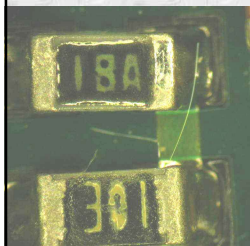
Najczęściej używa się :

SnAg3,5 (221 °C)

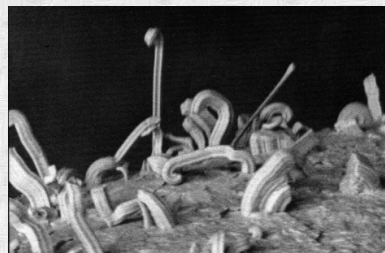
SnAg2,0 (221-226 °C)

SnCu0,7 (227 °C)

SnAg3,5Bi3,0 (206-213 °C)



Wąsy cynowe



57

lutowanie ręczne



zimny lut

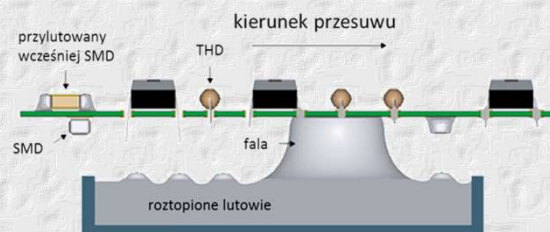
złe zwilżanie

zbyt dużo
lutowia

dobrze



lutowanie na fali



lutowanie piecowe



SMD – Surface Mounted Device

THD - Through-Hole Device

58

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%

59

Nikiel i stopy niklu

- liczba atomowa 28, masa atomowa 58,6934
- nie wykazuje odmian alotropowych, krystalizując w sieci ściennie centrowane układu regularnego o parametrze $a = 0,3516$ nm, co decyduje o tym, że metal ten jest podatny na obróbkę plastyczną zarówno na zimno, jak i na gorąco.
- temperatura topnienia Ni wynosi 1453°C, wrzenia 2730°C.
- gęstość Ni 8,902 g/cm³.
- w stanie zmiękczonego uzyskuje wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 450$ MPa i wydłużenie $A = 45\%$,
- w stanie odkształconym na zimno z 50% stopniem zgniotu rośnie wytrzymałość na rozciąganie do $R_m = 750$ MPa, maleje jednak możliwość wydłużania $A = 3\%$.
- zachowuje dobre własności mechaniczne do ok. 500°C.
- jest stosowany w ograniczonym stopniu ze względu na stale powiększający się deficyt tego pierwiastka

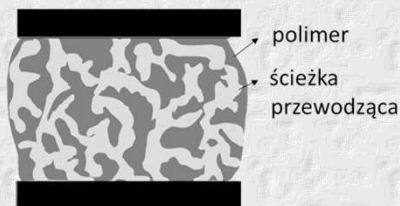
Czysty nikiel stosuje się na:

- podzespoły w lotnictwie i kosmonautyce (w tym na obudowy silników rakietowych), w elektronice i elektrotechnice,
- elementy specjalnej aparatury badawczej i chemicznej odpornej na działanie substancji żrących w tym na sprzęt w przetwórstwie żywności,
- w galwanotechnice,
- jako katalizator w wielu procesach chemicznych

60

Kleje przewodzące wytwarza się na bazie żywicy i srebra

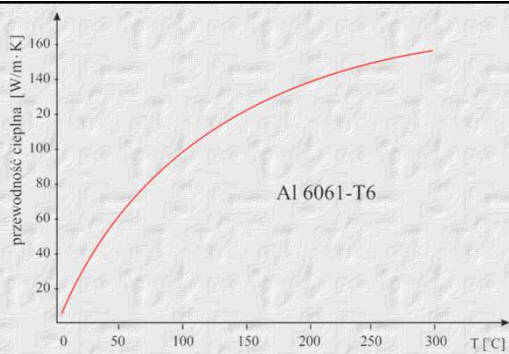
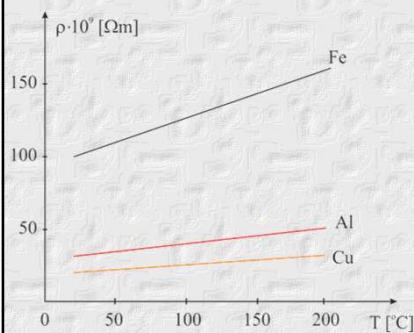
Właściwości	Jednostka	Wartość
sposób utwardzania	-	chemiczny
Zakres temperatur pracy ciągłej	[°C]	od -40 do +140
Rezystywność po utwardzeniu	[Ω x m]	$(2 - 8) \cdot 10^{-6}$
Wytrzymałość mechaniczna spoiny na ścinanie	[N/mm ²]	18 - 22



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

61

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

62

Przewodność cieplna wybranych materiałów

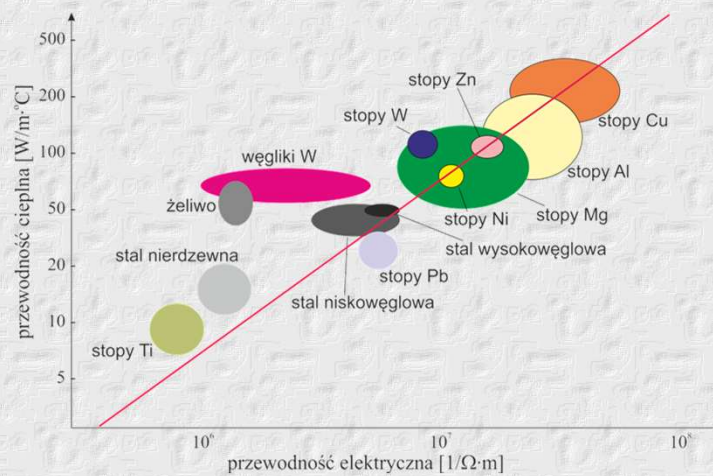
materiał	przewodność cieplna W/(m·K)
grafen	4840–5300
diament	900–2320
srebro	429
miedź	370 - 400
złoto	317
stopy aluminium	100 - 200
stopy żelaza	30 - 50
woda	0,6
drewno	0,2
styropian	0,036
powietrze	0,025

63

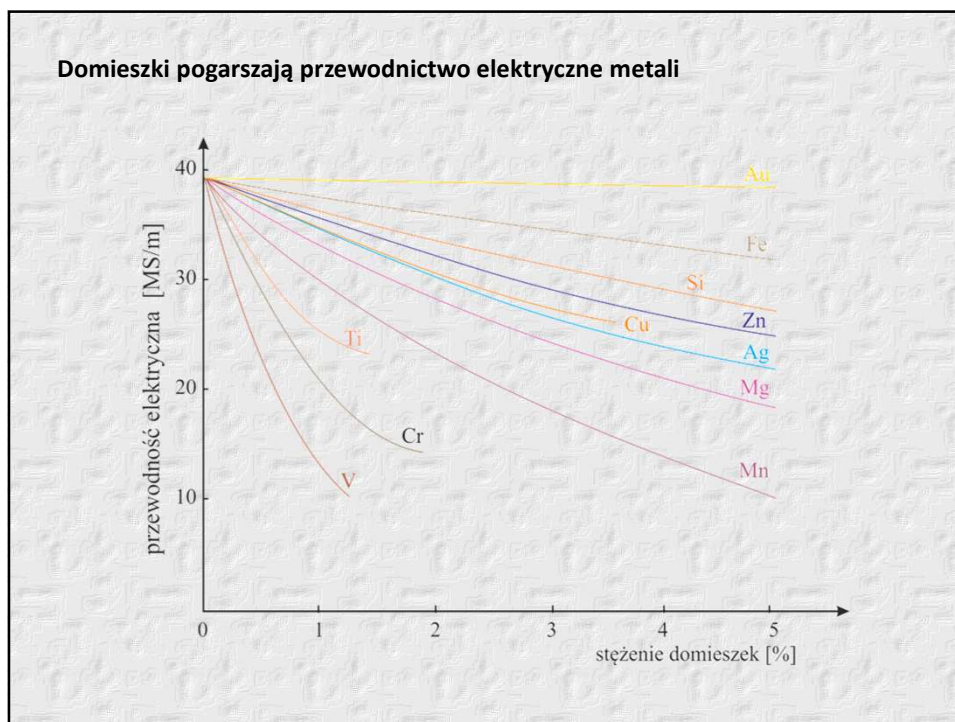
prawo Wiedemanna – Franza
związek między własnościami elektrycznymi a termicznymi materiałów

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

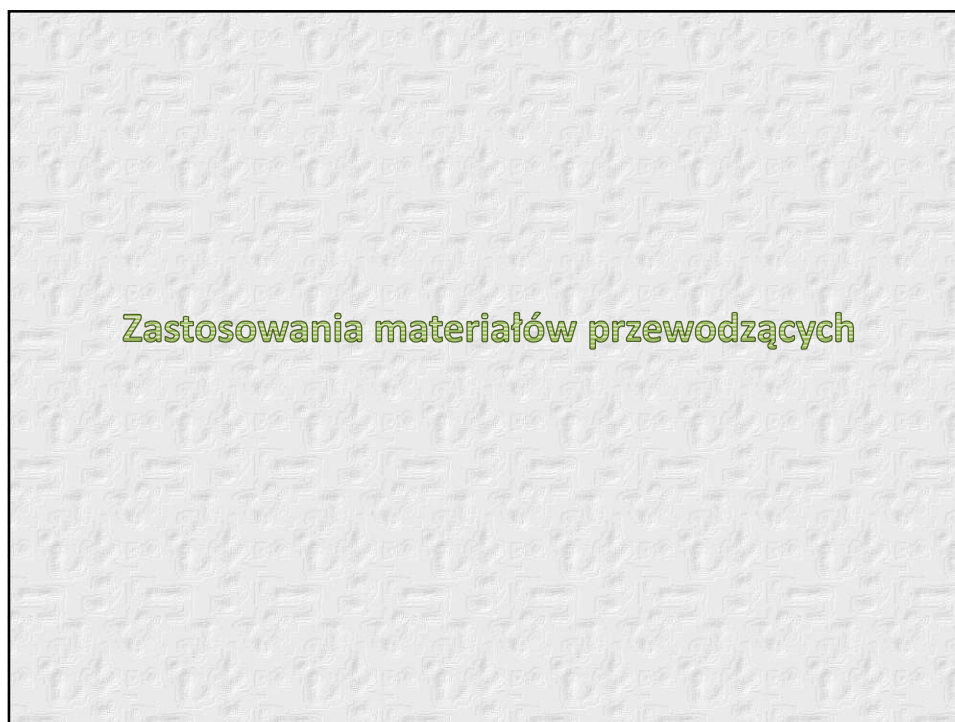
współczynnik L jest nazywany liczbą Lorentza



64



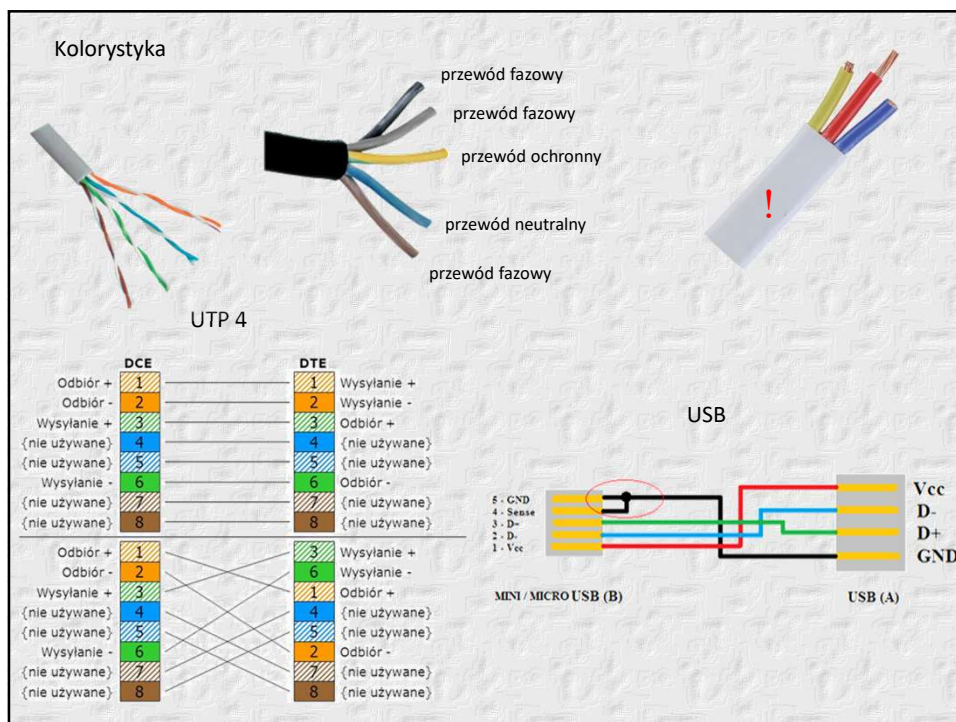
65



66



67



68

Zjawisko naskórkowości

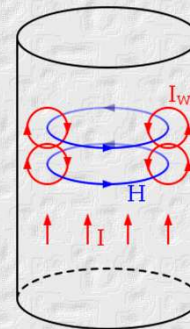
Prąd przemienny płynący w przewodniku powoduje powstawanie prądów wirowych. Mają one, w centralnej części przewodnika kierunek przeciwny do prądu w przewodniku, który je wzbudza. W efekcie w centralnej części przewodu przepływ prądu jest mniejszy, a w skrajnych sytuacjach nawet odwrócony

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

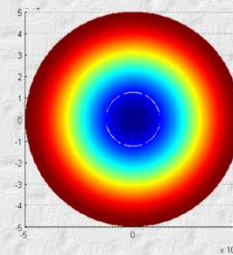
$$\delta \approx \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}} = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

μ – bezwzględna przenikalność magnetyczna przewodnika
 f – częstotliwość prądu

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



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



69

Radiatory

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

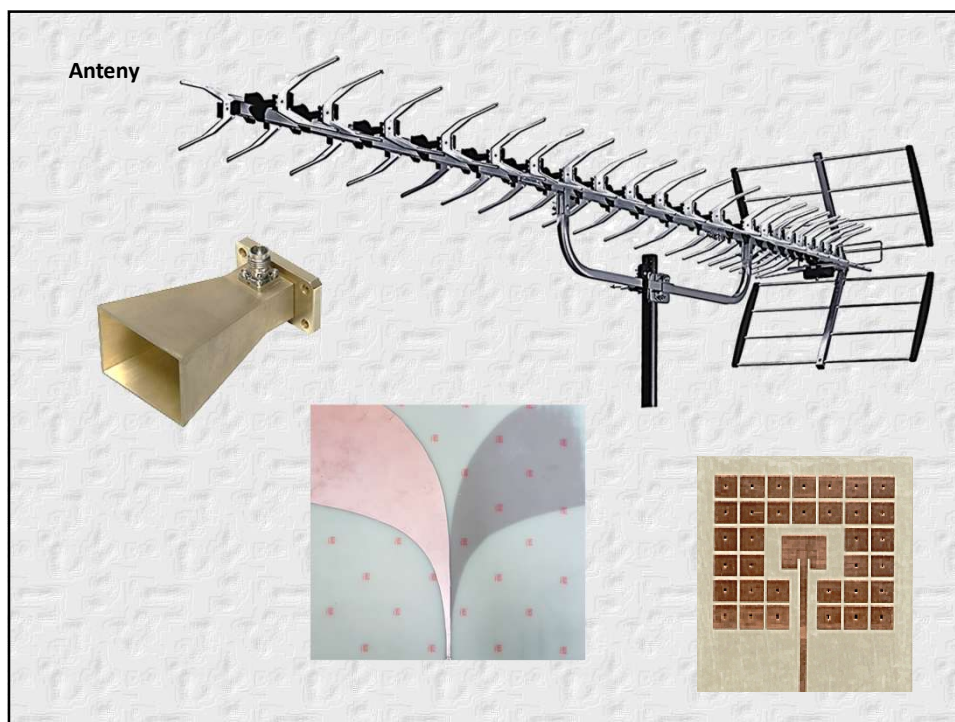
Radiatory wykonuje się najczęściej z aluminium lub miedzi.

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

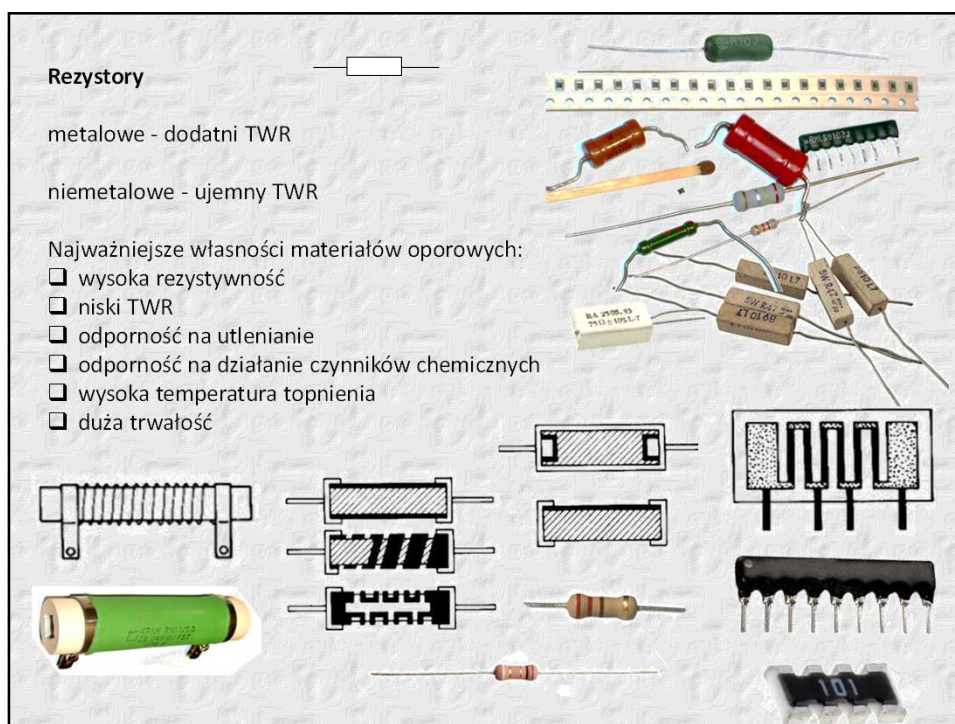


Projektowanie radiatorów jest zagadnieniem złożonym
 - zasadniczo może stanowić temat odrębnego wykładu

70

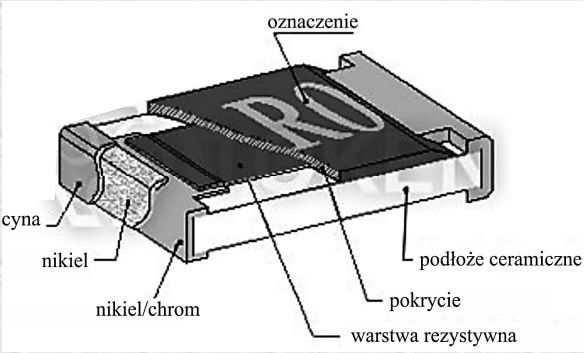
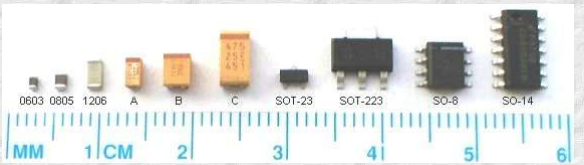


71



72

Budowa typowego rezystora SMD

1 mm $\approx$ 39,370 mils 1 mils $\approx$ 0,0254 mm



0603 = 0,06" $\times$ 0,03"
lub 60 $\times$ 30 mils lub 1,6 $\times$ 0,8mm
0805 = 0,08" $\times$ 0,05"
lub 80 $\times$ 50 mils lub 2,0 $\times$ 1,25mm
1206 = 0,12" $\times$ 0,06"
lub 120 $\times$ 60 mils lub 3,2 $\times$ 1,6mm

A = 3,2 $\times$ 1,6 $\times$ 1,6 dt/szer/wys
B = 3,5 $\times$ 2,8 $\times$ 1,9
C = 6,0 $\times$ 3,2 $\times$ 2,5

73

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



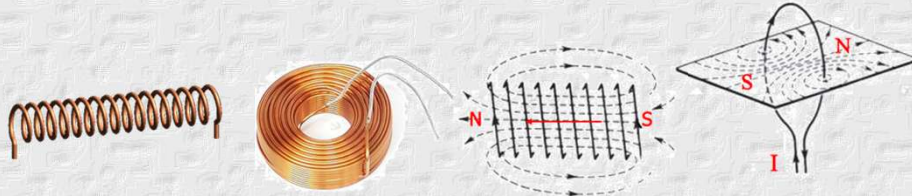
74

Cewki indukcyjne

Gromadzą energię w postaci pola magnetycznego – 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:
$$L_{p\acute{e}tli} \approx 0,0145 \cdot D \cdot \log \frac{1,08 \cdot D}{d}$$

75

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

Indukcyjność wyraża się w Henrach [H]

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

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

76

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

Dla jednowarstwowej cewki z rdzeniem otwartym:

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

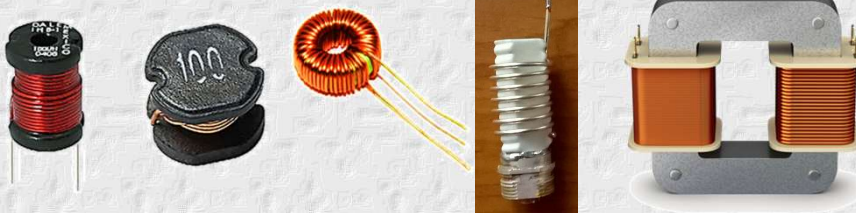
S - pole przekroju poprzecznego cewki

μ – bezwzględna przenikalność magnetyczna materiału rdzenia

n - liczba zwojów

l - długość cewki

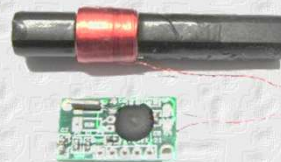
Cewki wielowarstwowe oraz z rdzeniem o bardziej złożonym kształcie wymagają indywidualnego podejścia.



77

Rdzenie ferrytowe

f (MHz)	0,1	1	10	100
ρ [Ωm] dla MnZn	≈ 2	≈ 0,5	≈ 0,1	≈ 0,01
ρ [Ωm] dla NiZn	≈ 10 ⁵	≈ 5·10 ⁴	≈ 10 ⁴	≈ 10 ³



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

Względna przenikalność magnetyczna ferrytów zależy od pola magnetycznego i dochodzi do 10⁴

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



78

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

79

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.

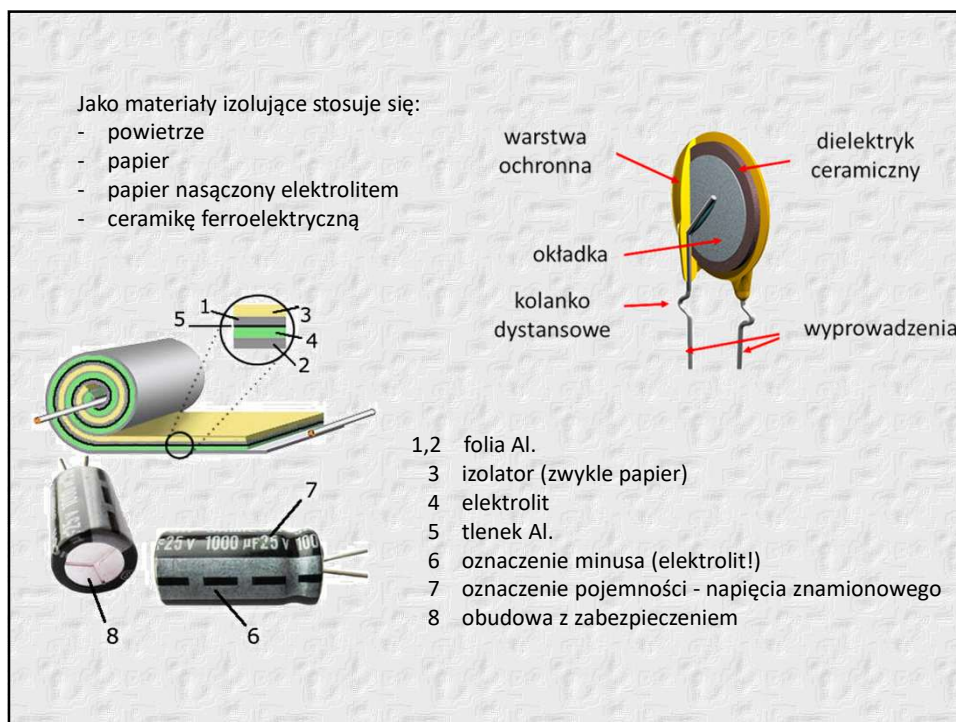
$$i_c = C \frac{du}{dt} \quad X_c = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}$$

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

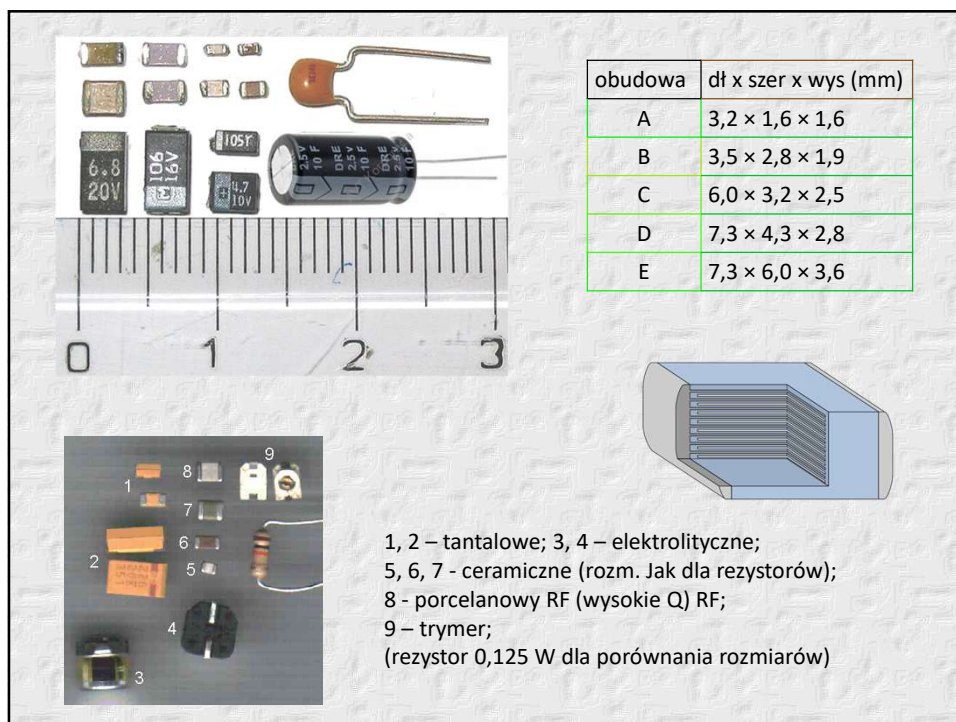
Pojemność kondensatora oblicza się z zależności: $C = \varepsilon \frac{S}{d}$

S - pole powierzchni okładki (wspólne z drugą okładką)
 ε – bezwzględna przenikalność elektryczna izolatora okładek
 d – odległość okładek

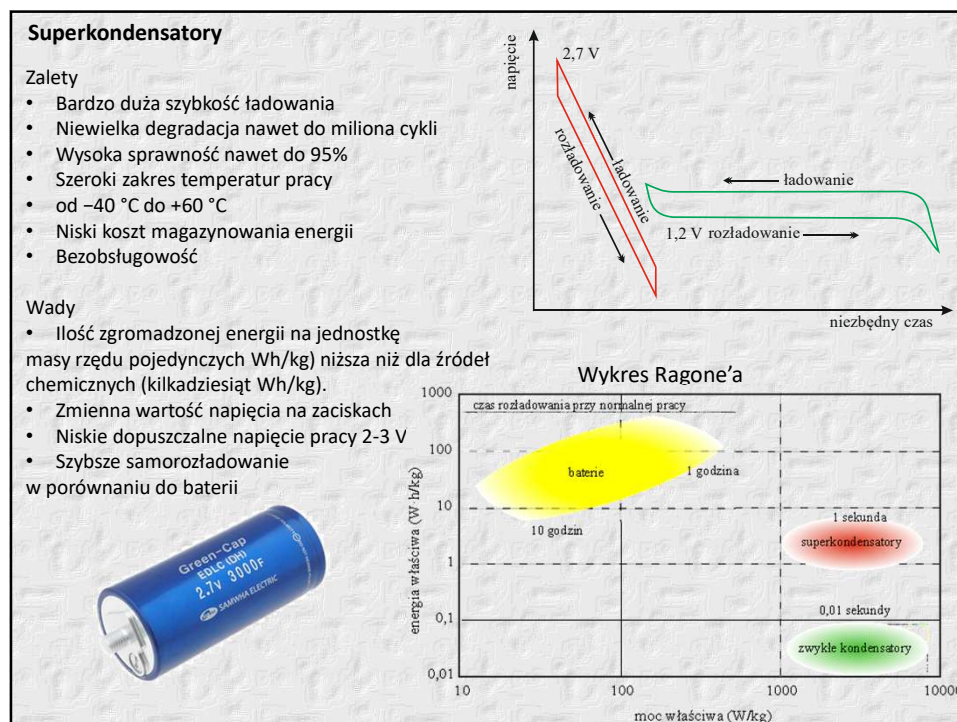
80



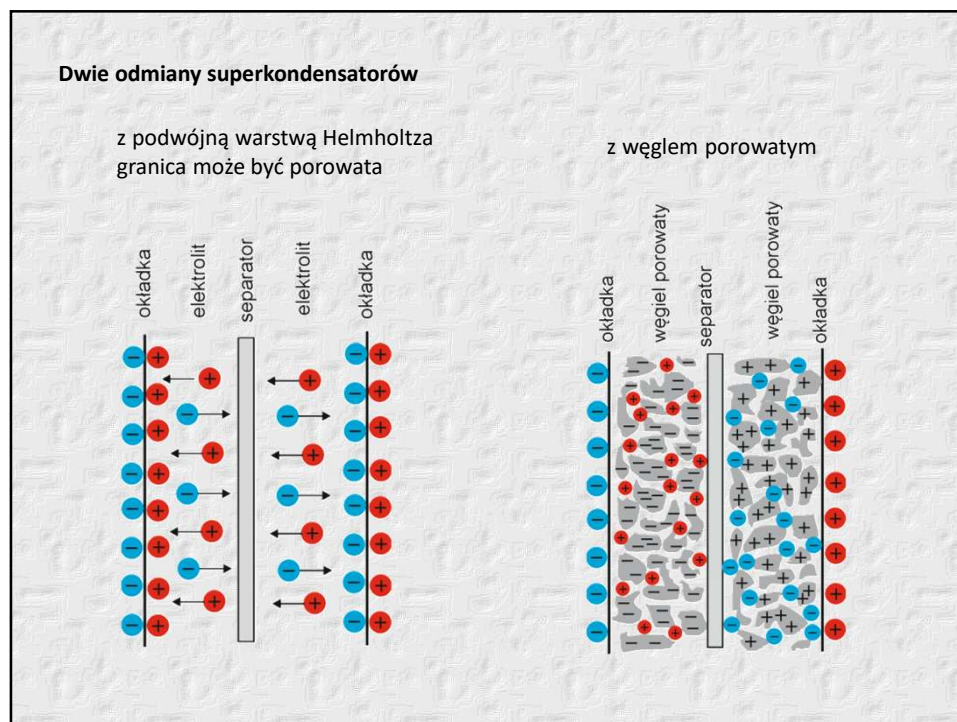
81



82



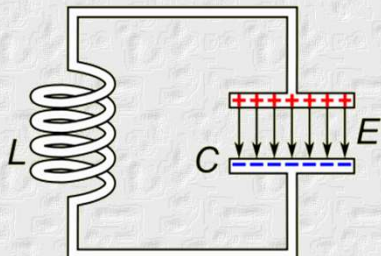
83



84

Połączenie cewki i kondensatora

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



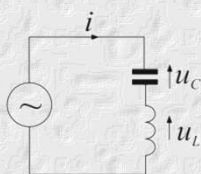
$$W_{C\max} = \frac{CU^2}{2}$$

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

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

85

Dwa rodzaje obwodów rezonansowych – zależne od sposobu dołączenia źródła



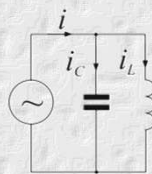
szeregowy
w rezonansie

$$u_L + u_C = 0$$

rezonans napięć

$$i = \max$$

zwarcie



równoległy
w rezonansie

$$i_L + i_C = 0$$

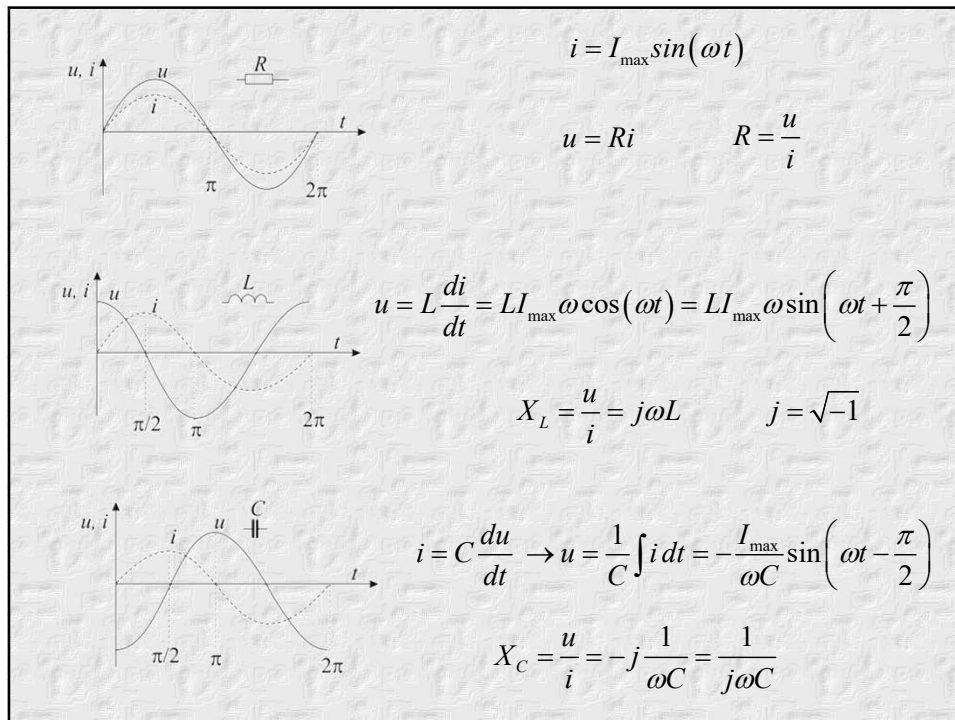
rezonans prądów

$$i = 0$$

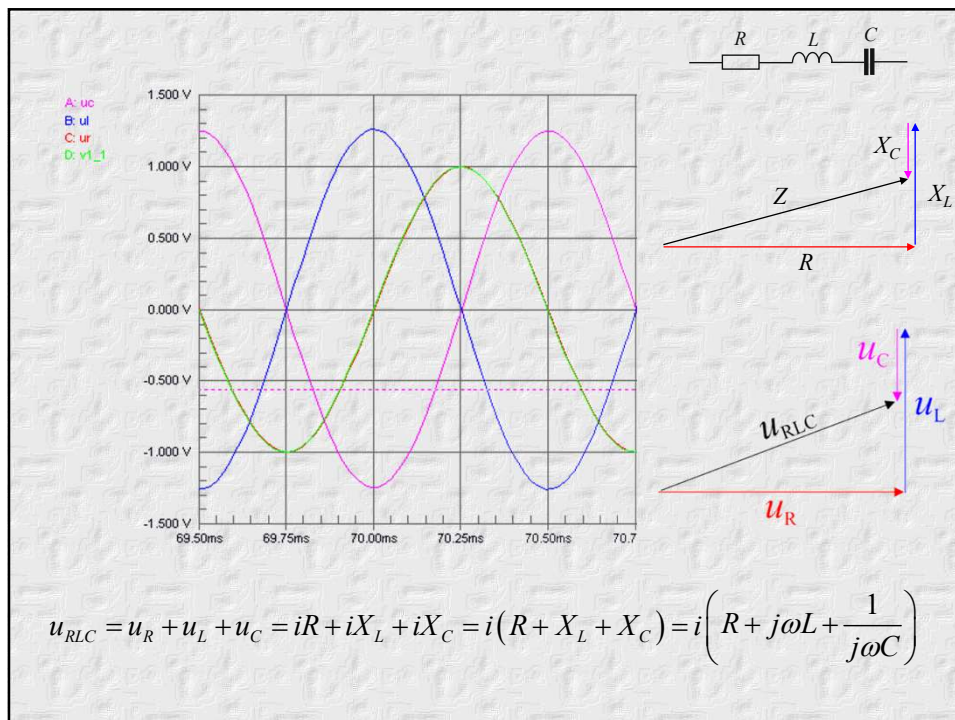
rozwarcie

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

86



87



88

Bimetale

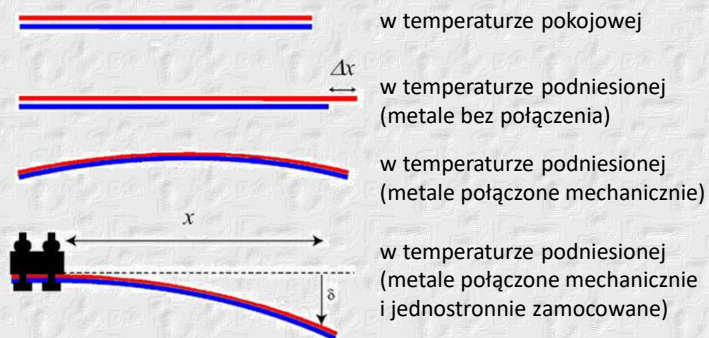
- trwałe mechaniczne połączenie dwóch metali lub stopów o możliwie najbardziej różnych rozszerzalnościach cieplnych.

Najczęściej wykorzystuje się stopy **żelaza i niklu**

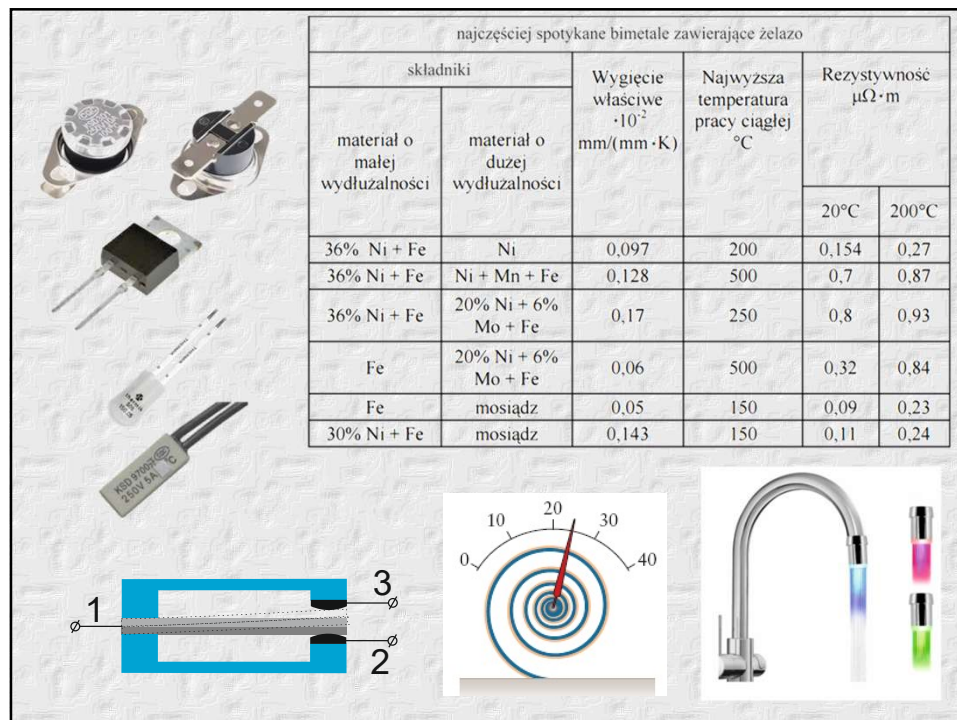
Powszechnie wykorzystywanym bimetalem nie zawierającym żelaza jest **kupal (Cu+AL)**

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).



89

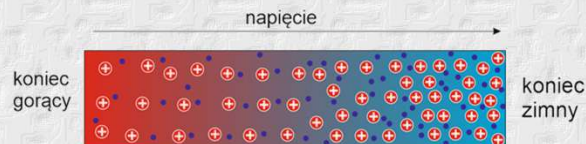


90

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.



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.

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

91

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
prostota konstrukcji

Wady:

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

92

Zjawisko Thomsona (Kelwina)

W przewodniku z gradientem temperatury, przez który płynie prąd wydziela 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 (zewnątrznym), to pole wewnętrzne wspomaga dryft nośników kosztem ciepłej energii atomów przewodnika, co prowadzi do jego ochładzania.

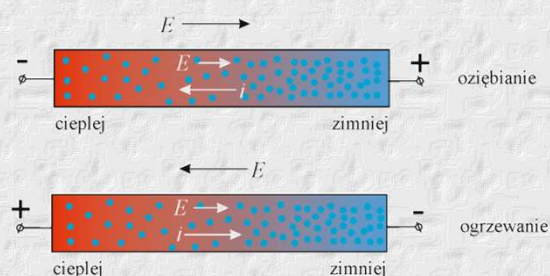
Jeśli pola mają kierunek przeciwny, to pole wewnętrzne wykonuje dodatkową pracę, co wiąże się z wydzielaniem dodatkowego ciepła.

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

κ – współczynnik Thomsona

ΔT – zmiana temperatury

j – gęstość prądu



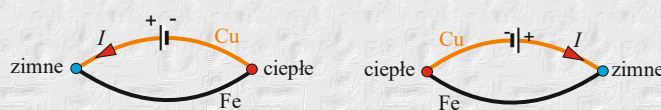
93

Efekt Peltiera

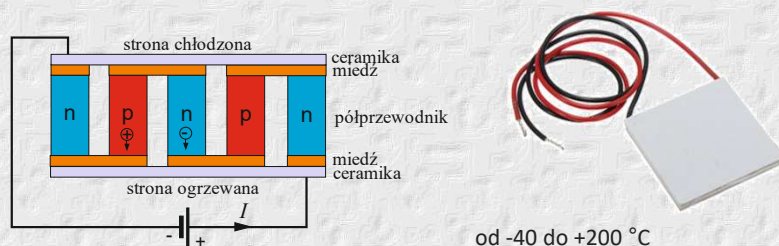
Efekt przeciwny do Seebecka - zachodzi na granicy dwóch różnych przewodników (półprzewodników) połączonych dwoma złączami.

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



94

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

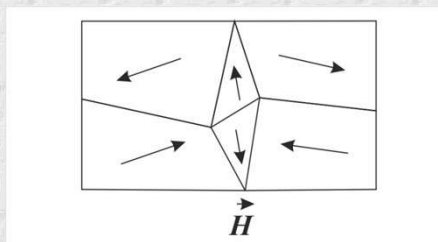
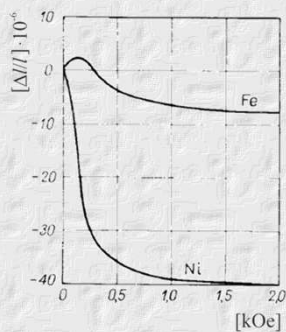
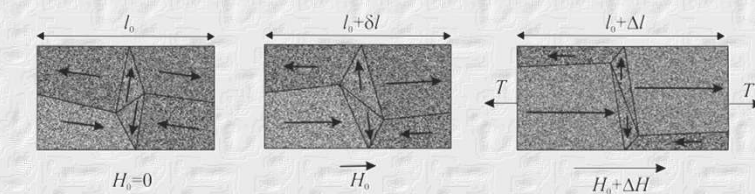
Zjawiska termoelektryczne są szczególnie silnie w półprzewodnikach.

Zjawisko Peltiera wykorzystywane jest w chłodziarkach termoelektrycznych.

95

Magnetostrykcja

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



96

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

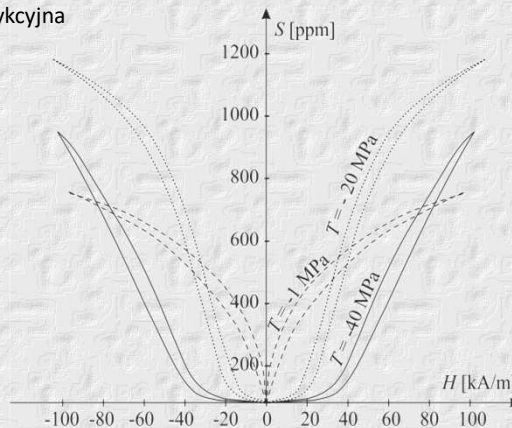
Magnetostrykcję opisuje się też za pomocą współczynnika sprzężenia magnetomechanicznego.

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

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.

97

Histeresa magnetostrykcyjna



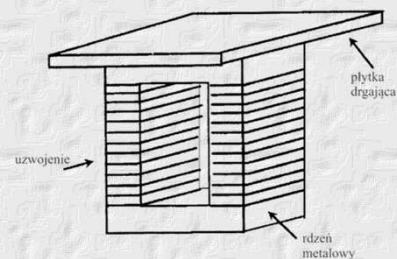
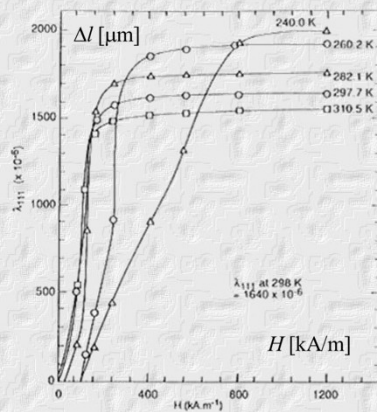
Dla dostatecznie małych odkształceń i pól magnetycznych:

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

B – indukcja magnetyczna

98

Terfeol-D – najsilniej magnetostrykcyjny stop metali o składzie $Tb_x Dy_{1-x} Fe_2$ ($x \approx 0,3$) 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.

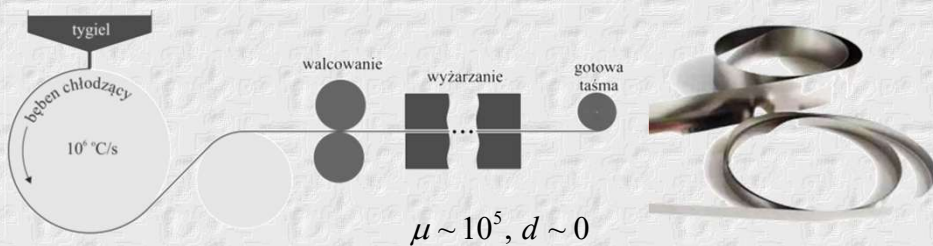
Zjawisko stosuje się także w czujnikach magnetyczno-mechanicznych.

99

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 $Tb_xDy_{1-x}Fe_2$ $x \approx 0,3$	2400

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



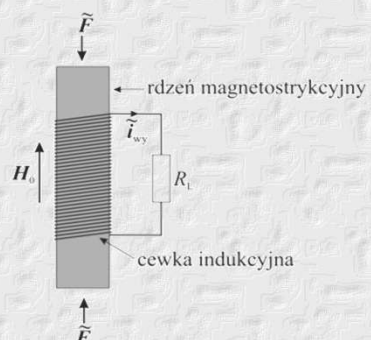
100

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 przez niego strumienia magnetycznego. Zmiana strumienia na zasadzie indukcji generuje prąd w cewce.



101

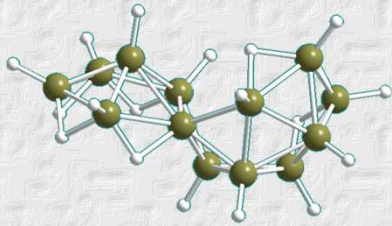
KRYSTAŁY

102

κρύσταλλος - lód

Kryształ to stan skupienia materii, w którym cząsteczki, atomy lub jony zajmują ściśle określone miejsca w przestrzeni i mogą jedynie drgać tylko w obrębie tychże miejsc.

W odróżnieniu od ogólnie rozumianego ciała stałego (np. ciała amorficznego) kryształy posiadają określoną symetrię.



103

- Monokryształy (kryształy)
- Polikryształy

Naturalny kryształ pirytu



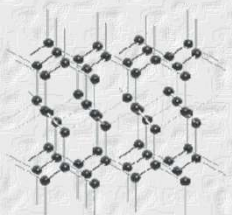
struktura polikrystaliczna



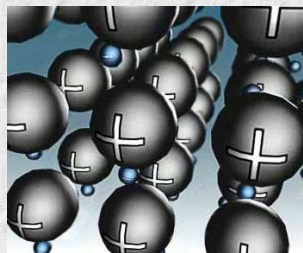
struktura monokrystaliczna

104

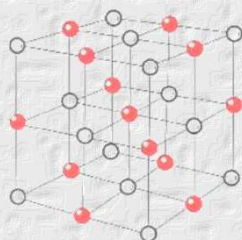
Rodzaje struktur krystalicznych



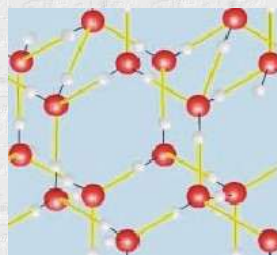
Struktura kowalencyjna (diament)
wiązania kowalencyjne



Struktura metaliczna
wiązania kowalencyjne kationów



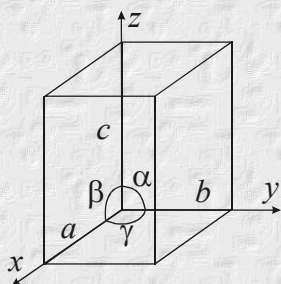
Struktura jonowa (sól kuchenna)
wiązania jonowe



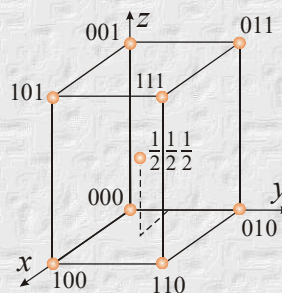
Struktura molekularna (lód)
wiązania wodorowe

105

Układ krystalograficzny opisuje się często za pomocą sieci Bravais'a wypełniając przestrzeń przez wielokrotne powtarzanie translacji tzw. komórki elementarnej. Sieci Bravais uzyskiwane są przez złożenie 7 systemów krystalograficznych i 4 sposobów centrowania. Spośród teoretycznie możliwych 28 (7x4) sposobów złożzeń w naturze występuje tylko 14.



Komórka elementarna
osie krystalograficzne
stałe sieciowe



Sieć przestrzenna
wskaźniki węzłów sieci

106

UKŁADY KRYSTALOGRAFICZNE

układ regularny (sześcienny) $a = b = c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (sól kamienna, diament)

układ tetragonalny $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (kasyteryt, cyrkon, wezuwian)

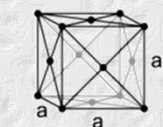
układ heksagonalny $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$ (beryl, apatyt, grafit)

układ trygonalny $a = b \neq c$, $\alpha = \beta = 90^\circ$, $\gamma = 120^\circ$ (kalcyt, korund, kwarc)

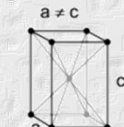
układ rombowy $a \neq b \neq c$, $\alpha = \beta = \gamma = 90^\circ$ (siarka, oliwin, struwit)

układ jednoskośny $a \neq b \neq c$, $\alpha = \gamma = 90^\circ$, $\beta \neq 90^\circ$ (gips, ortoklaz)

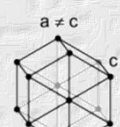
układ trójskośny $a \neq b \neq c$, $\alpha \neq \beta \neq \gamma \neq 90^\circ$ (cyanit, aksynit)



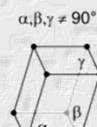
regularny (kubiczny)



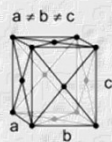
tetragonalny



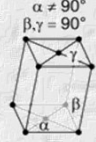
heksagonalny



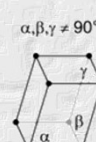
trygonalny



rombowy



jednoskośny



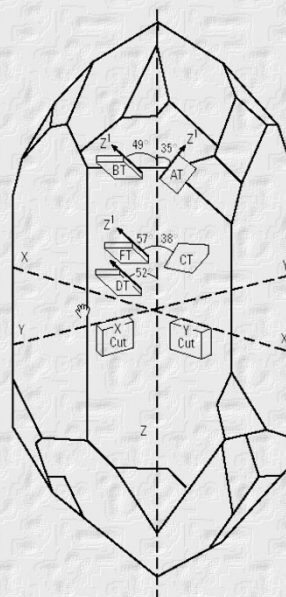
trójskośny

109

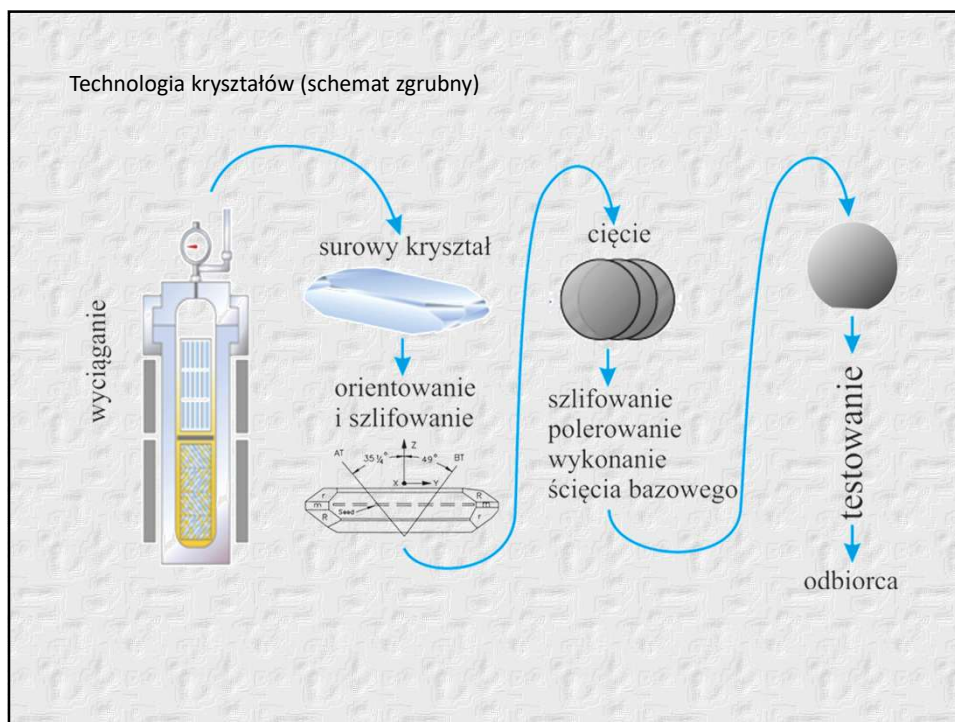
Monokrystały



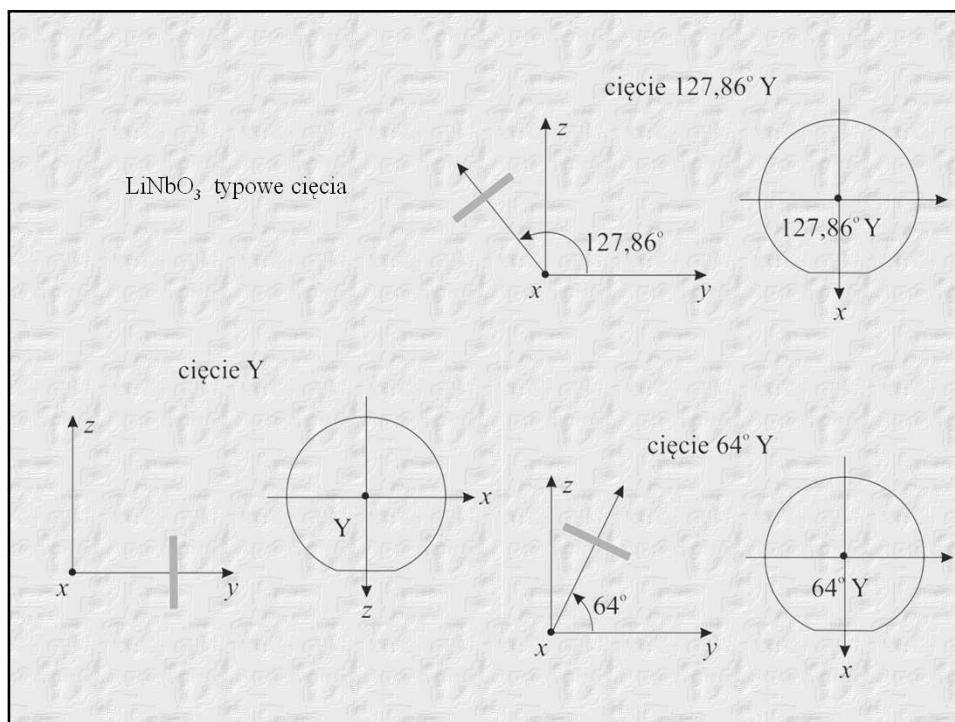
długość do 2 m
 średnica: zazwyczaj
 200mm (do 300mm;
 rzadko 400mm)
 masa: do 225 kg
 orientacja
 krystalograficzna (111)
 lub (100)
 czas: 3 dni



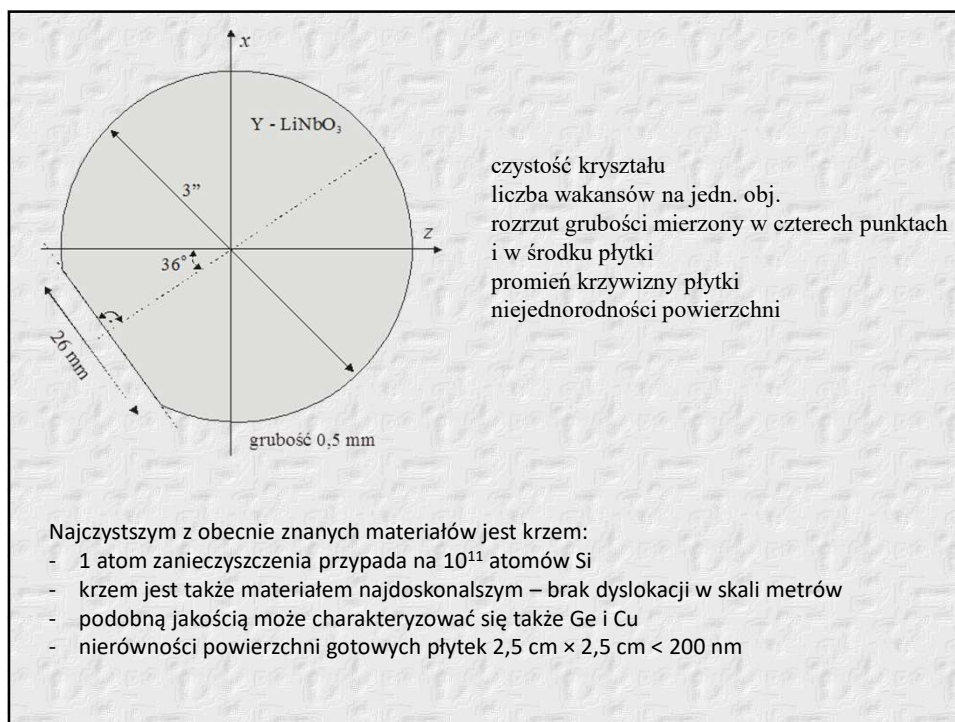
110



111



112



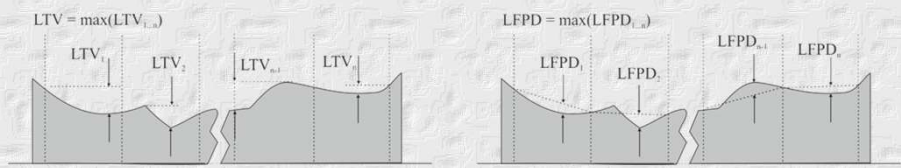
113

Podstawowe globalne parametry płytek		
TTV Total Thickness Variation	Suma maksymalnych dodatnich i ujemnych odchyłek względem równoległej płaszczyzny przylegania. Płytkę przysysana próżniowo, nie uwzględnia się jej zwiężenia.	$TTV = A + B $
TIR Total Indicated Reading	Jw. ale z uwzględnieniem zwiężenia	$TIR = A + B $
Warp	Jw. ale bez przysysania	$WARP = A + B $
Bow	Odległość między powierzchnią najlepiej dopasowaną a środkiem płytki (bez przysysania)	

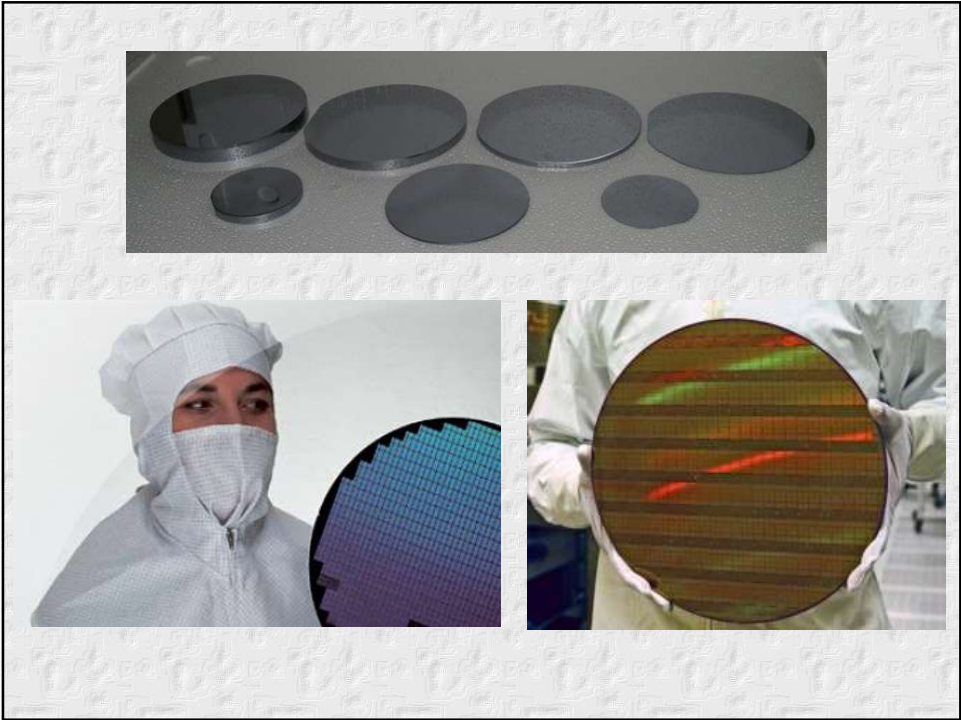
114

Podstawowe lokalne parametry płytek

LTV Local Thickness Variation	Maksymalna odległość pomiędzy najwyższym a najniższym punktem na określonym polu powierzchni (np. $10 \times 10 \text{ mm}^2$). Płytkę przyssaną próżniowo, nie uwzględnia się jej lokalnego zwężenia.
LFPD Local Focal Plane Deviation	Jw. ale z uwzględnieniem lokalnego zwężenia.



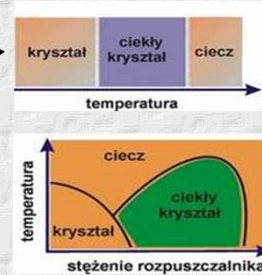
115



116

Ciekłe kryształy

- stan przejściowy pomiędzy ciałem stałym a cieczą izotropową
- zdolność do płynięcia (cecha cieczy) połączona z daleko zasięgowym uporządkowaniem struktury (cecha kryształu)
- faza ciekłokrystaliczna – mezofaza
- generowanie faz ciekłokrystalicznych
 - termotropowe
 - liotropowe

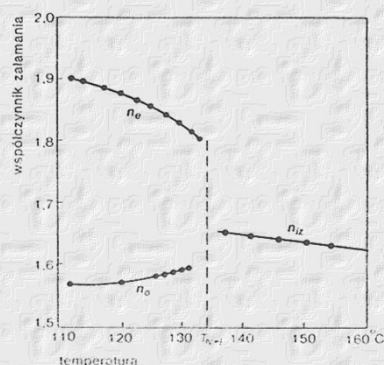


Cząsteczki termotropowego ciekłego kryształu mogą mieć kształt prętów bądź dysków

117

Materiały takie wykazują silną dwójłomność zarówno naturalną jak i wymuszoną. Zjawisko to polega na zdolności ośrodka do podwójnego załamania światła (rozdwojenia promienia świetlnego). Zachodzi ono dla ośrodków anizotropowych, w których współczynniki przenikalności elektrycznej ϵ (i co za tym idzie prędkość oraz współczynnik załamania światła) zależą od kierunku drgań wektora pola elektrycznego (polaryzacji fali).

W kryształach takim istnieje tzw. oś optyczna tj. kierunek, w którym biegnące światło nie rozdziela się na dwa promienie. Kierunek tej osi nie zależy od kształtu kryształu. Istnieją kryształy jedno- i dwuosiowe.

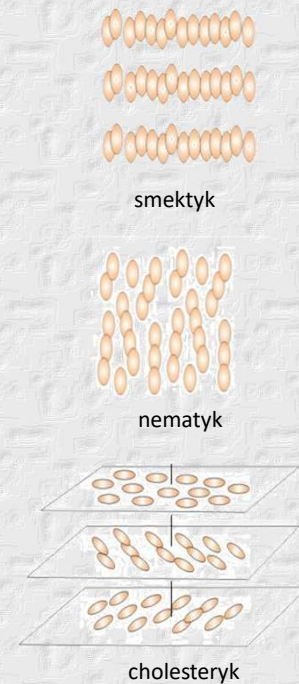


118

Fazy termotropowe

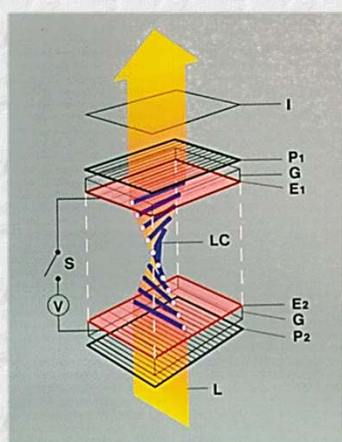
- **nematyczna N** - wszystkie molekuły są w przybliżeniu wzajemnie równoległe.
Nematyk jest optycznie jednoosiowy, dodatni
- **cholesteryk N** - molekuły chiralne są ułożone warstwami jak kartki w książce, w każdej warstwie są wzajemnie równoległe a wektor kierunkowy w każdej kolejnej warstwie zmienia kierunek o tę samą wartość. Cholesteryk N jest jednoosiowy i aktywny optycznie
- fazy smektyczne $S_a, S_b, \dots S_i$: molekuły są ułożone w warstwy, a osie molekuł tworzą z normalną do warstwy kąt $< 90^\circ$. Fazy te różnią się między sobą głównie sposobem uporządkowania

Między fazą stałą a izomorficzną może występować jedna faza kryształu (monomorfizm), dwie (dimorfizm) aż do sześciu (heksamorfizm). Zjawisko to nazywane jest polimorfizmem

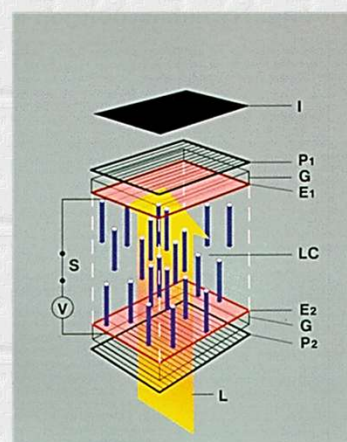


119

Skręcanie płaszczyzny polaryzacji

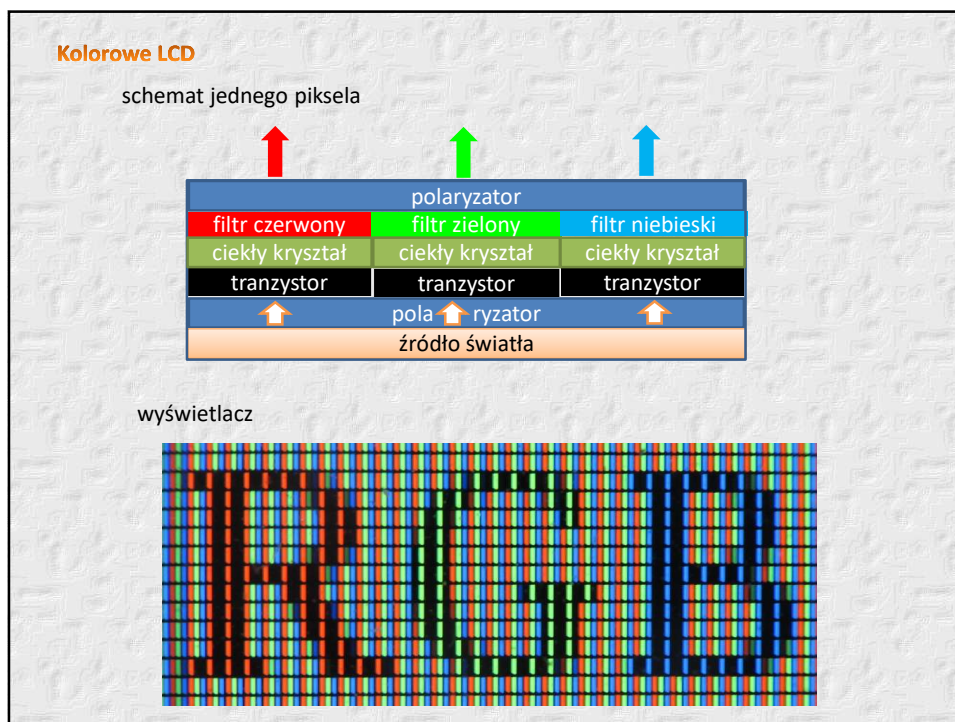


transmisja (piksel jasny)
naturalne ustawienie cząstek



brak transmisji (piksel ciemny)
cząstki ustawiają się wzdłuż linii
sił pola elektrycznego

120

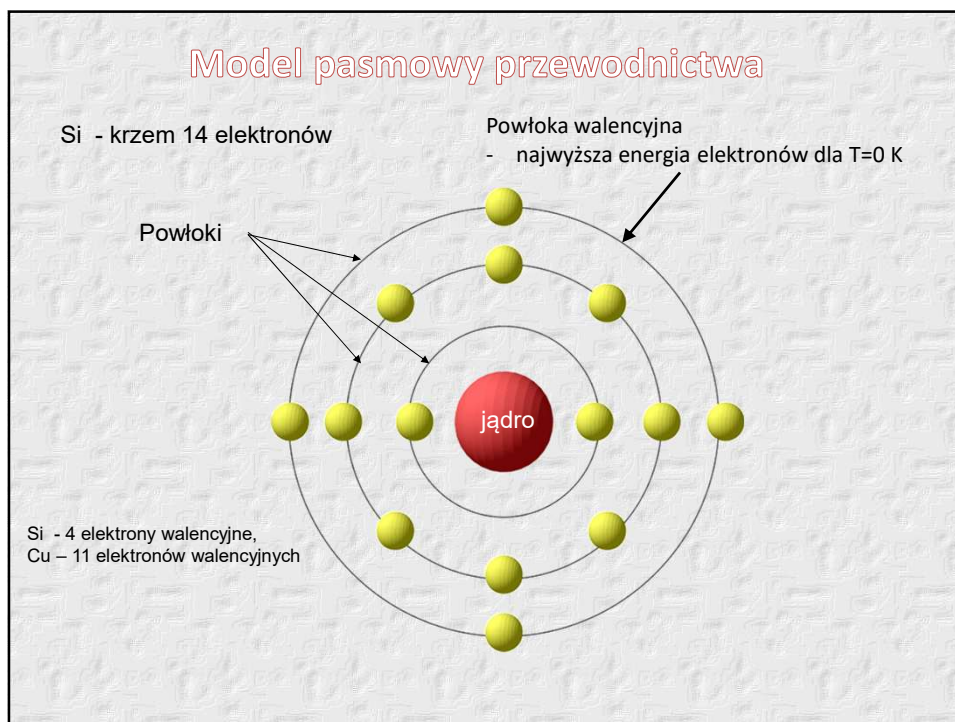


121

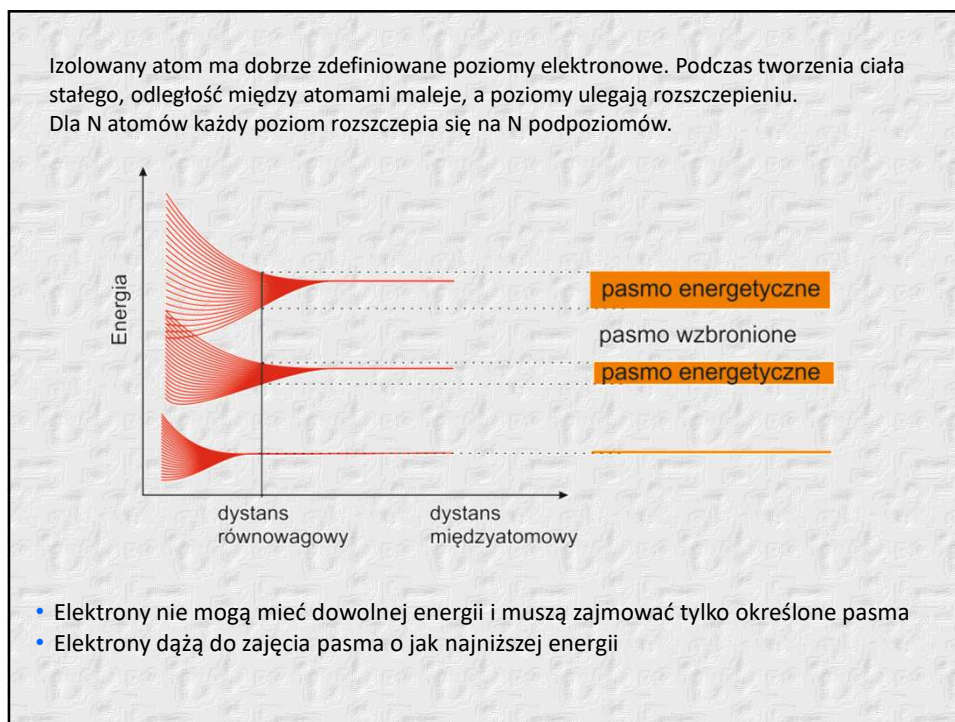
Inne zastosowania

- pamięci komputerowe
- termografia
 - medycyna
 - ciepłownictwo
- żaluzje ciekłokrystaliczne
- papier elektroniczny

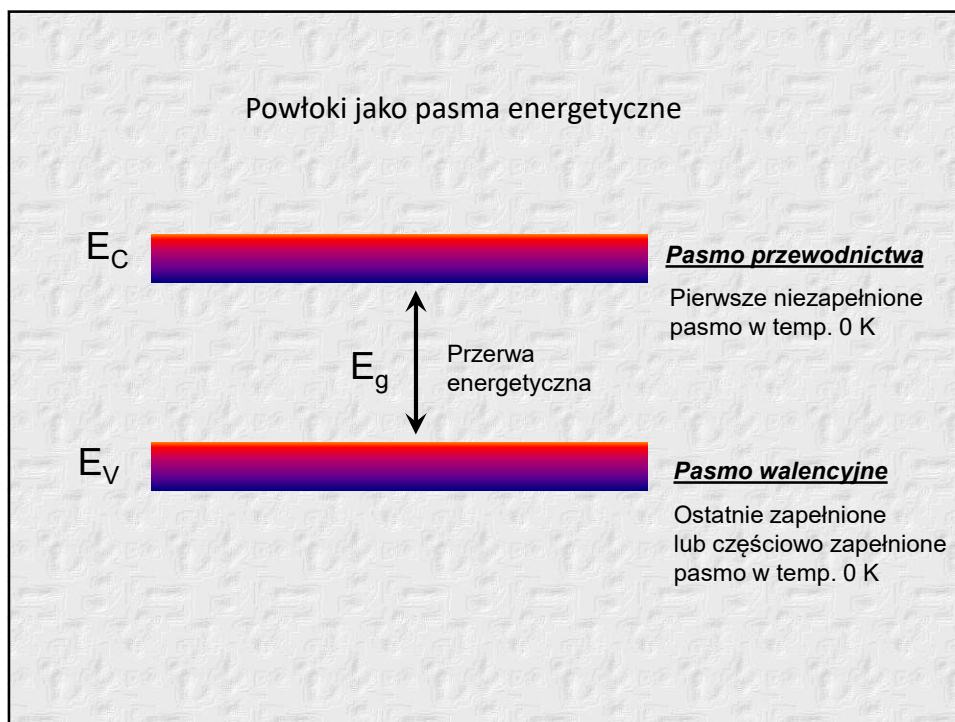
122



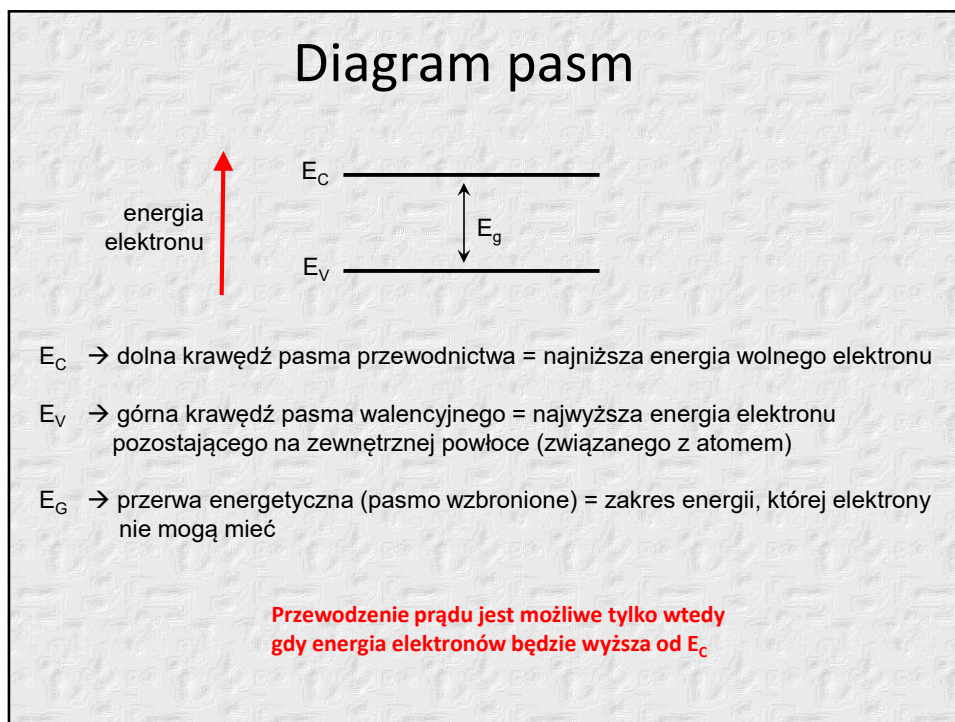
123



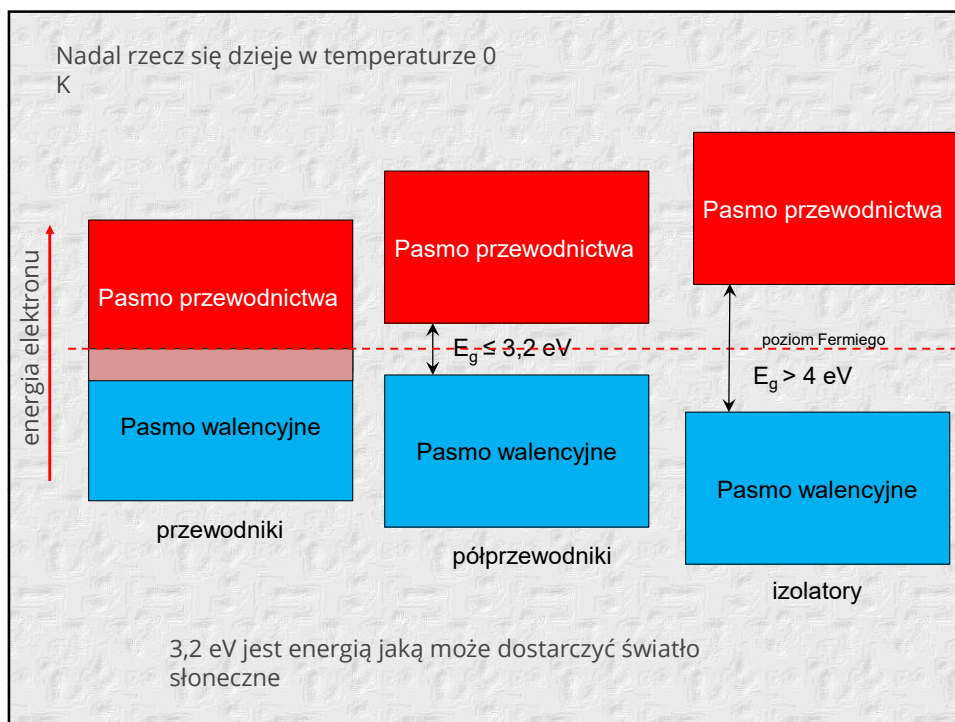
124



125



126

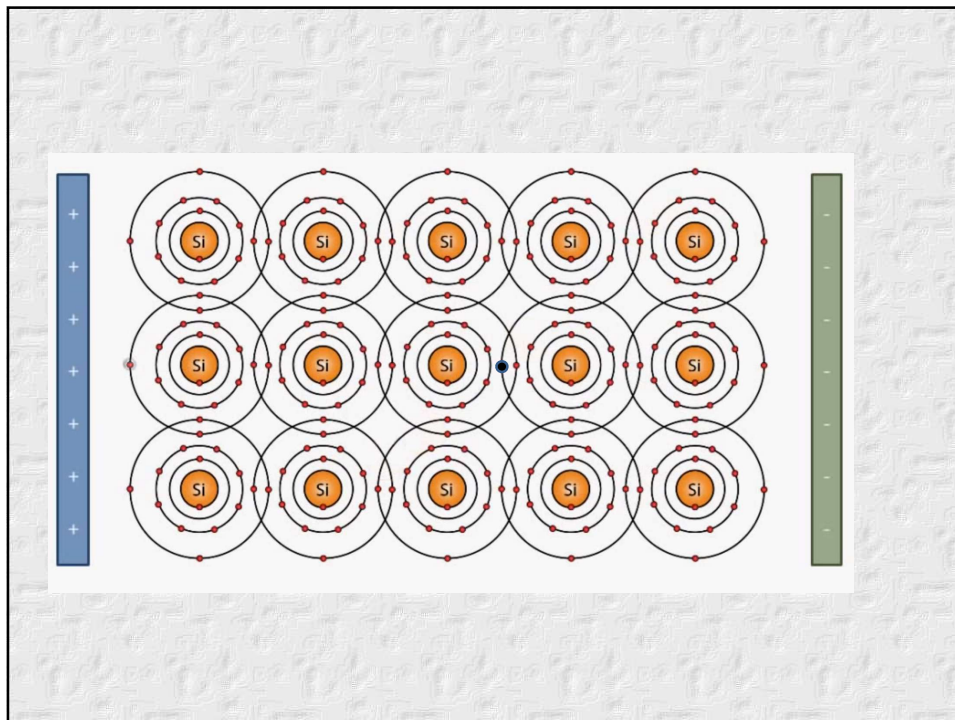


127

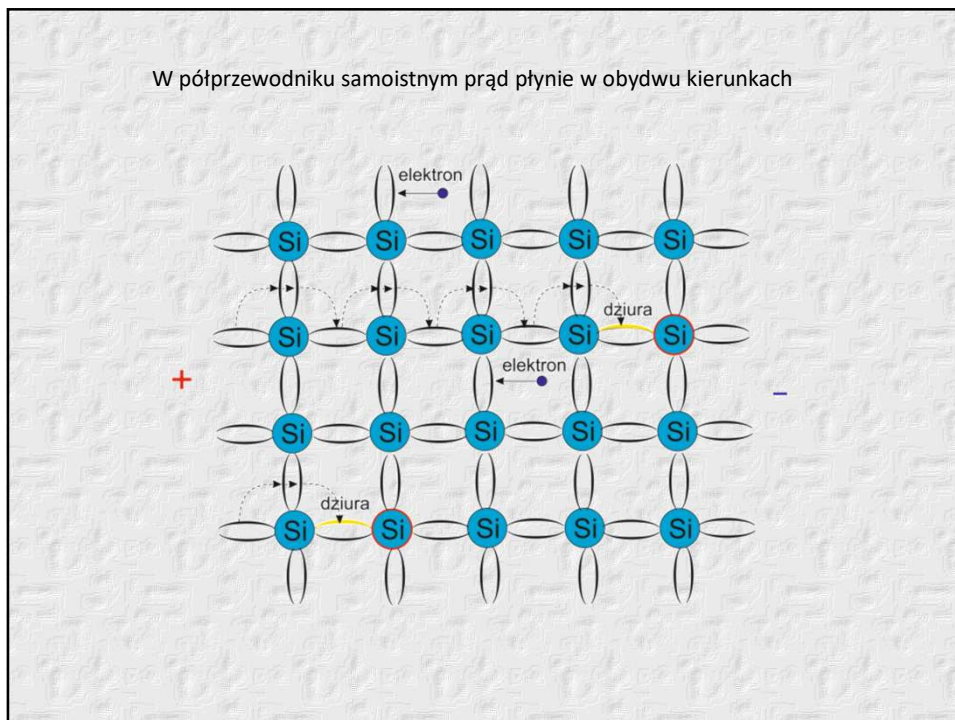
Dla temperatur wyższych od 0 K drgania termiczne mogą nadać elektronom energię wystarczającą do przedostania się do pasma przewodnictwa

- **generacja** – powstanie pary wolny elektron - dziura (e^-) - (h^+)
dziura to atom pozbawiony elektronu będący jonem dodatnim
- **rekombinacja** – łączenie się elektronu z dziurą i ich zanik (anihilacja)
- Elektrony i dziury są nośnikami prądu (cząstkami naładowanymi elektrycznie)
- Półprzewodniki dla $T > 0K$ mogą przewodzić prąd jednak bardzo słabo;
w temp. pokojowej w czystym krzemie na każde $3 \cdot 10^{12}$ (trzy tryliony) atomów występuje tylko jeden elektron swobodny

128



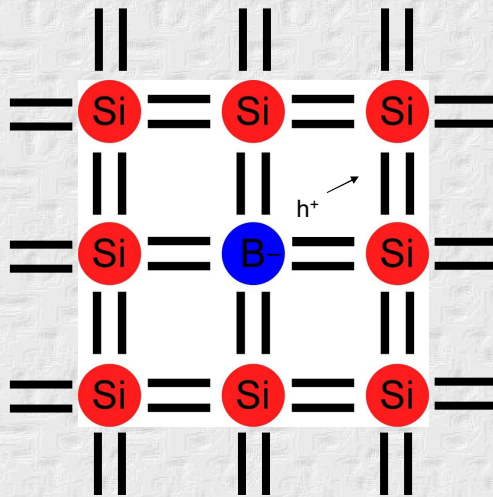
129



130

Półprzewodnik typu p (pozytywow)

Domieszki akceptorowe



- atomy z tylko trzema elektronami walencyjnymi np. bor B
- Akceptują (przechwytyją) elektrony i tworzą dodatkowe ruchome dziury pozostawiając nieruchome jony ujemne
- cały materiał pozostaje elektrycznie neutralny
- typ p oznacza, że nośnikami prądu są ładunki dodatnie (dziury)
- N_A = koncentracja akceptorów
- Ruch dziur wymaga zrywania wiązań zatem ich ruchliwość jest dość niska $\mu_p \approx 500 \text{ cm}^2/\text{V}$

133

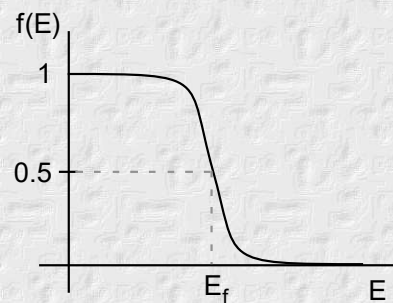
Funkcja Fermiego

Funkcja rozkładu prawdopodobieństwa obsadzenia dostępnych stanów przez elektron

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_f)/kT}}$$

$E_f \rightarrow$ poziom Fermiego

$k \rightarrow$ stała Boltzmanna
 $= 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} = 8,617 \cdot 10^{-5} \text{ eV/K}$

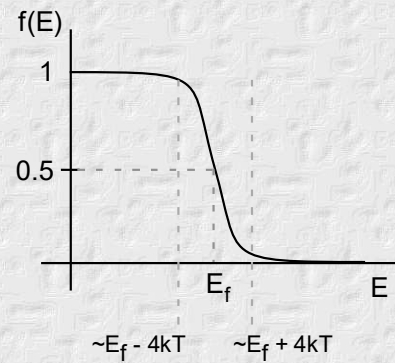


134

Rozkład Boltzmann

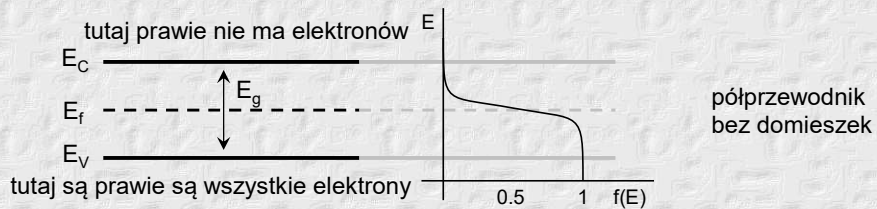
Jeśli $|E - E_f| \gg kT$

$$f(E) = \frac{1}{1 + e^{(E - E_f)/kT}} \approx \frac{1}{e^{(E - E_f)/kT}}$$

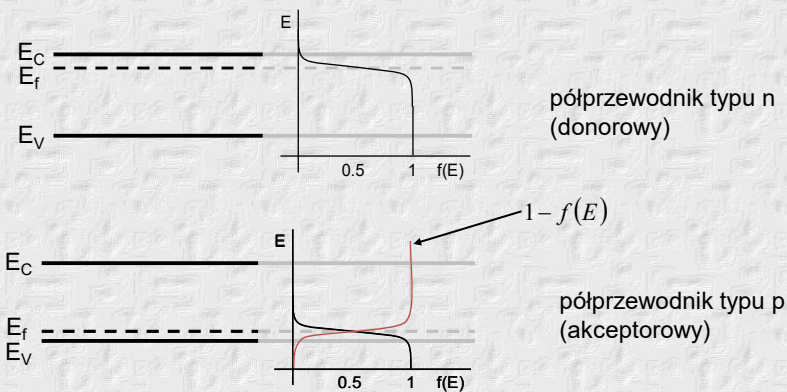


Rozkład Boltzmann opisuje eksponencjalny wzrost liczby nośników w warunkach równowagi termodynamicznej przy występowaniu gradientu potencjału

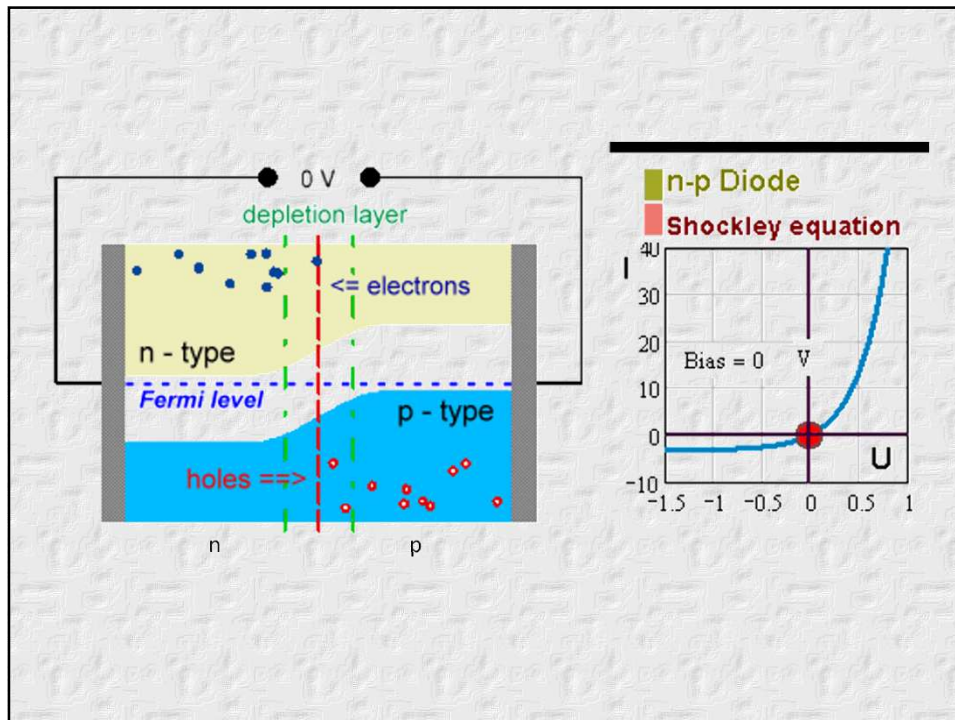
135



domieszkowanie wpływa na poziom Fermiego



136



137

Równowaga koncentracji nośników

n - liczba elektronów swobodnych w materiale

p - liczba dziur w materiale

n_i - liczba elektronów swobodnych w materiale bez domieszek

Półprzewodnik jest prawie czysty – poziom Fermiego ma wartość E_f ułożoną pomiędzy E_v i E_c (ale niezbyt blisko tych wartości)

$$n = n_i e^{(E_f - E_i)/kT}$$

$$p = n_i e^{(E_i - E_f)/kT}$$

$$np = n_i^2$$

138

Relacja neutralności elektrycznej

Dla jednorodnego domieszkowania całkowity ładunek wewnątrz materiału jest zerowy

$$\underline{p - n} + \underline{N_D - N_A} = 0$$

liczba nośników liczba nieruchomych jonów

139

Obliczanie koncentracji nośników

- N_A, N_D oraz n_i są konkretne dla danego materiału
- n, p mogą się zmieniać ale można obliczyć ich wartości równowagowe

$$n = \frac{N_D - N_A}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_D - N_A}{2}\right)^2 + n_i^2} = \frac{n_i^2}{p}$$

$$p = \frac{N_A - N_D}{2} + \sqrt{\left(\frac{N_A - N_D}{2}\right)^2 + n_i^2} = \frac{n_i^2}{n}$$

140

Koncentracja nośników

W materiale niedomieszkowanym (czystym)

$$n = p = n_i$$

Podobnie jest przy domieszkowaniu symetrycznym gdzie liczba akceptorów i donorów jest zbliżona $n_i \gg |N_D - N_A|$

$$n \approx p \approx n_i$$

W materiale domieszkowanym asymetrycznie - donorowo

$$N_D \gg N_A, \quad N_D \gg n_i \quad n \approx N_D, \quad \text{a zatem } p \approx \frac{n_i^2}{N_D}$$

W materiale domieszkowanym asymetrycznie - akceptorowo

$$N_A \gg N_D, \quad N_A \gg n_i \quad p \approx N_A, \quad \text{a zatem } n \approx \frac{n_i^2}{N_A}$$

141

Poziom Fermiego

dla domieszkowania donorami $E_f - E_i = kT \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right)$

dla domieszkowania akceptorami $E_i - E_f = kT \ln \left(\frac{N_A}{n_i} \right)$

ponieważ $n \approx N_D$, a $p \approx N_A$

$$E_f - E_i = kT \ln \left(\frac{n}{n_i} \right) = -kT \ln \left(\frac{p}{n_i} \right) \quad [\text{eV}]$$

142

Dryf nośników w półprzewodnikach

Cząstki nie poruszają się jednak dowolnie z uwagi na oddziaływania z atomami sieci

Średnia prędkość

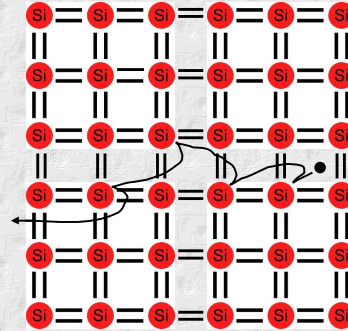
$$\langle v_x \rangle \approx -\mu_n E_x \text{ elektronu}$$

$$\langle v_x \rangle \approx \mu_p E_x \text{ dziury}$$

$\mu_n \rightarrow$ ruchliwość elektronów

$\mu_p \rightarrow$ ruchliwość dziur

$$\mu_n \approx 3\mu_p$$



Wraz ze wzrostem temperatury ruchliwość maleje

143

Gęstość prądu

elektronowego

$$J_{n,dryfu} = \mu_n q n E = \sigma_n E$$

dziurowego

$$J_{p,dryfu} = \mu_p q p E = \sigma_p E$$

$q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ - ładunek elektronu

n = liczba elektronów

p = liczba dziur

σ = konduktywność

Całkowita gęstość prądu

$$J = J_n + J_p = \mu_n q n E = E(\sigma_n + \sigma_p) = \sigma E$$

144

Rezystywność półprzewodników

$$\rho = \frac{1}{q(\mu_n n + \mu_p p)}$$

Dla półprzewodnika typu n

$$\rho = \frac{1}{q\mu_n N_D}$$

Dla półprzewodnika typu p

$$\rho = \frac{1}{q\mu_p N_A}$$

- Wszystkie półprzewodniki są rezystorami (termistorami)
- Półprzewodniki typu p mają większą rezystywność niż typu n
- Pomiar rezystywności pozwala określić koncentrację domieszek

145

Dyfuzja nośników

Dyfuzja → ruch nośników prądu spowodowany gradientem koncentracji

- Nośniki poruszają się chaotycznie w kierunku koncentracji niższej

$$J_{n,dyf} = eD_n \nabla n$$

D – współczynniki dyfuzji

$$J_{p,dyf} = -eD_p \nabla p$$

Całkowity prąd w półprzewodniku należy uzupełnić o prąd dyfuzji:

$$J_n = J_{n,drifu} + J_{n,dyf} = \mu_n enE + eD_n \nabla n$$

$$J_p = J_{p,drifu} + J_{p,dyf} = \mu_p epE - eD_p \nabla p$$

$$J = J_n + J_p$$

146

Relacja Einsteina

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q} = U_T$$

$U_T \rightarrow$ tzw. napięcie termiczne, w temp. pokojowej $\approx 25,86 \text{ mV}$

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

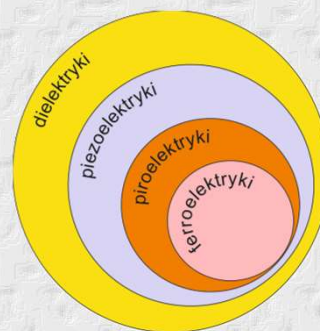
dielektryki stałe o polaryzowalności specjalnej

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

Molekularny mechanizm polaryzacji elektrycznej

Każdy atom składa się z dodatniego jądra i ujemnie naładowanej chmury elektronów

Przy braku pola elektrycznego „środek ciężkości ładunków” obu znaków znajduje się w tym samym punkcie - atom na zewnątrz jest elektrycznie obojętny

W polu elektrycznym F układ ten ulega deformacji co powoduje powstawanie momentu dipolowego molekuly ustawionej w kierunku pola

$$\mu_e = \alpha_e F$$

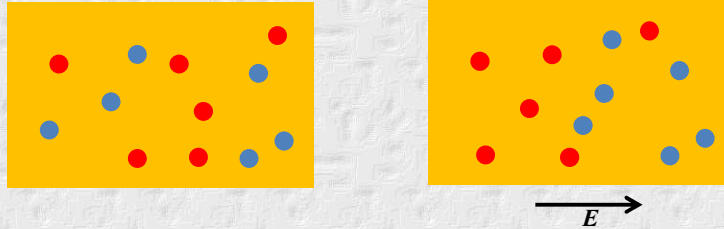
F - wewnętrzne pole sił działające na atom

α_e – polaryzowalność elektronowa

Istnieją molekuly, w których przy braku pola „środek ciężkości ładunków” obu znaków znajdują się w różnych punktach - na zewnątrz molekula taka nie jest obojętna elektrycznie (polaryzacja spontaniczna) jednak losowo ustawiony zespół takich molekuł nie wykazuje polaryzacji makroskopowej

4

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

5

polaryzowalność mogą umożliwiać różne mechanizmy

polaryzowalność deformacyjna α_d

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

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

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

6

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.

7

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:

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

Jeśli pole elektryczne z powierzchnią tworzy mniejszy kąt α wówczas:

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

8

Wektor indukcji elektrycznej jest sumą wektorów natężenia pola elektrycznego i polaryzacji

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} + \mathbf{P}$$

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

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

9

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

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

a więc

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

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

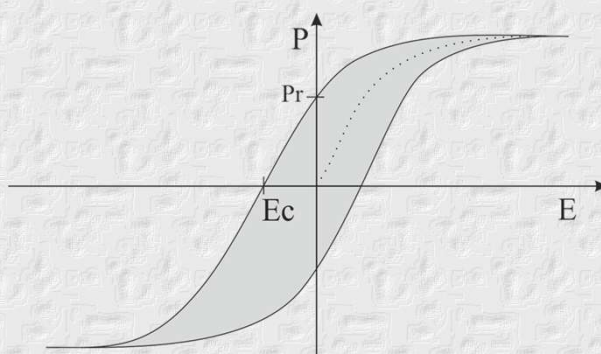
Dielektryki poprzeczne i podłużne

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

10

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



11

Straty energii w dielektryku związane są z różnymi procesami

Aby je wyrazić liczbowo wprowadzono zespoloną postać przenikalności elektrycznej

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

Czasowa zależność przenikalności może być opisana następującym modelem

$$\varepsilon = \varepsilon_{\infty} + \int_0^{\infty} \beta(t) \exp(j\omega t) dt$$

ε_{∞} - przenikalność elektryczna przy wysokich częstotliwościach pola

$\beta(t)$ - współczynnik zaniku, określający opóźnienie zmian polaryzacji względem zmian pola elektrycznego

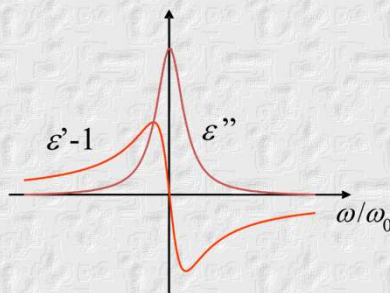
- Debye zaproponował wykładniczą formę współczynnika zaniku

$$\beta(t) = \beta(0) \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

τ - czas relaksacji

12

- przesunięcie przez pole elektryczne ładunków przeciwnych znaków, związanych ze sobą sprężystości, wywołuje polaryzację ośrodka,
- po usunięciu pola ładunki wracają do położenia 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



13

Model Debye'a

- polaryzacja dipolowa P_d jest w takim ujęciu przesunięta w fazie w stosunku do pola E

$$P_d(\omega) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_D} \epsilon_0 E$$

ϵ_∞ - przenikalność elektryczna przy wysokich częstotliwościach pola E

ϵ_s - przenikalność elektryczna przy stałej wartości pola E

- polaryzacja przy wysokich częstotliwościach pola

$$P_\infty = (\epsilon_\infty - 1) \epsilon_0 E$$

- całkowita polaryzacja $P = P_\infty + P_d$

$$P(\omega) = P' - jP'' = (\epsilon_\infty - 1) \epsilon_0 E + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_D} \epsilon_0 E$$

14

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon' - j\varepsilon'' = 1 + \frac{P' - jP''}{\varepsilon_0 E} = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau_D}$$

$$\varepsilon(\omega) = \underbrace{\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau_D^2}}_{\substack{\text{dyspersja} \\ \varepsilon'}} - j \underbrace{\frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega\tau_D}{1 + \omega^2\tau_D^2}}_{\substack{\text{absorpcja} \\ \varepsilon''}}$$

- tangens kąta strat:

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

15

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.

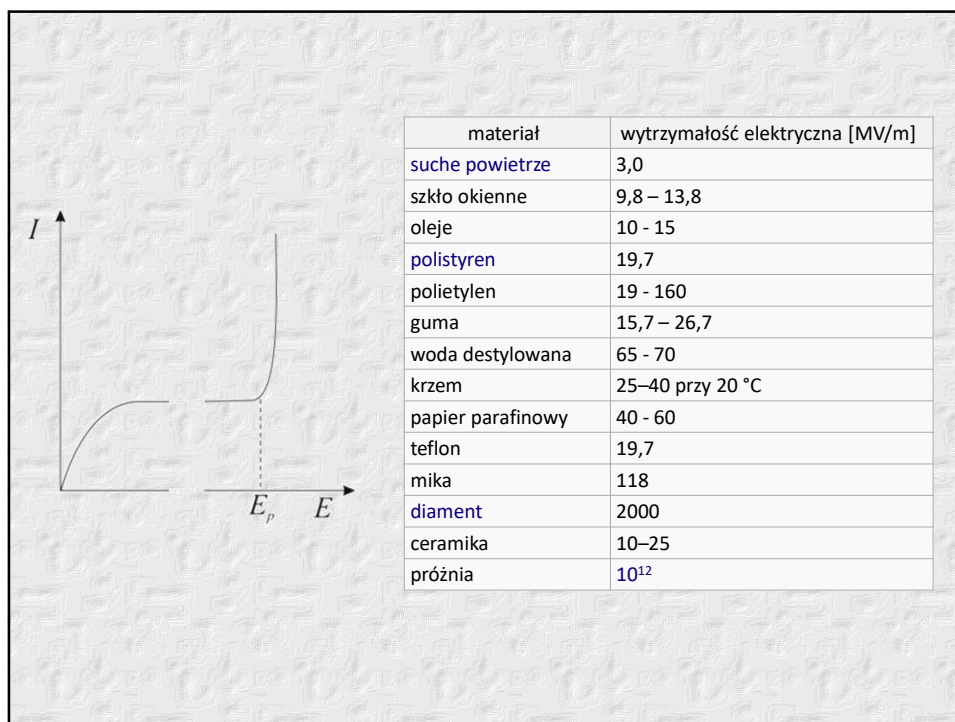
Parametr ten nie jest związany z innymi parametrami elektrycznymi dielektryka.

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

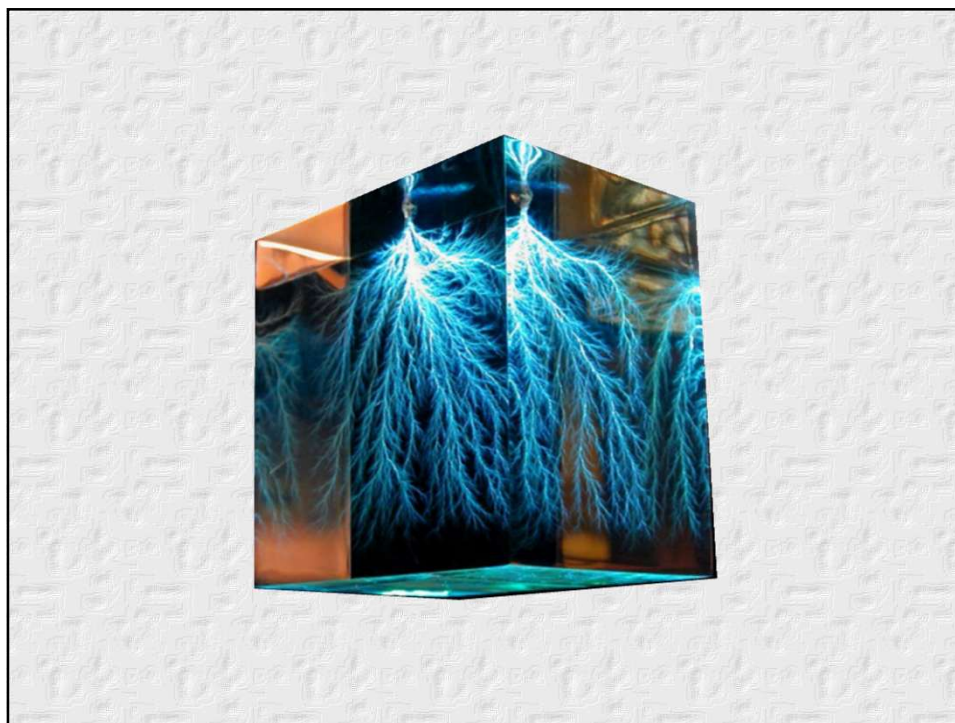
Istnieją cztery podstawowe mechanizmy przebicia:

- **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)

16



17

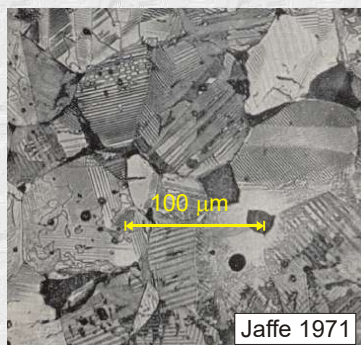


18

Dielektryki o własnościach specjalnych

19

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 .

20

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

$$P = P_0 + \chi E$$

P_0 - stały wektor polaryzacji spontanicznej

χ - podatność elektryczna

E - natężenie zewnętrznego pola elektrycznego

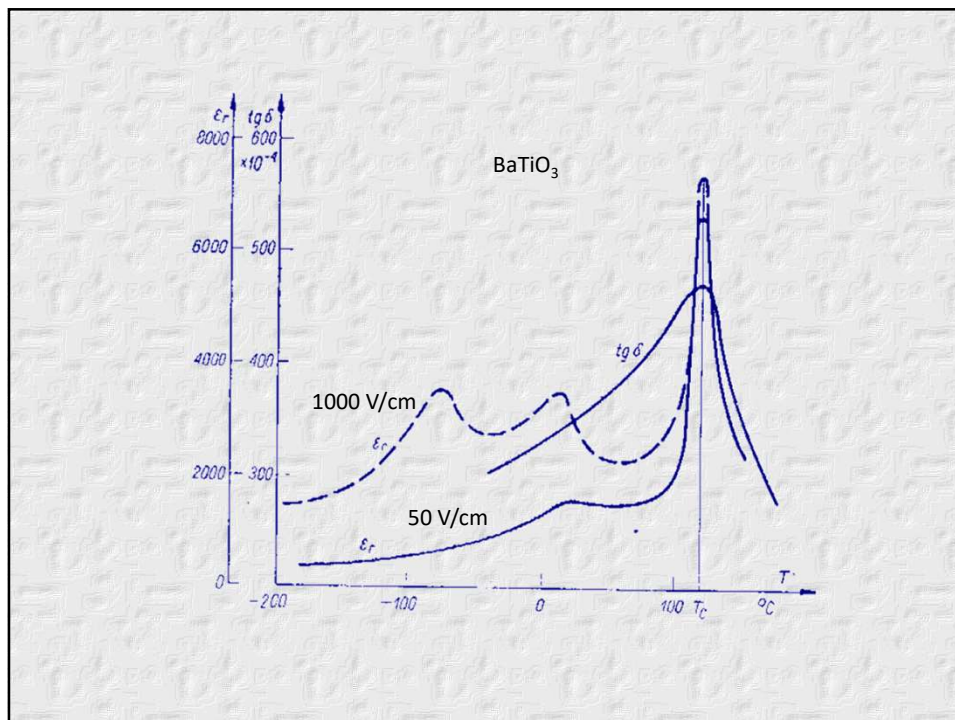
Zależność przenikalności elektrycznej od temperatury dla ferroelektryka:

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

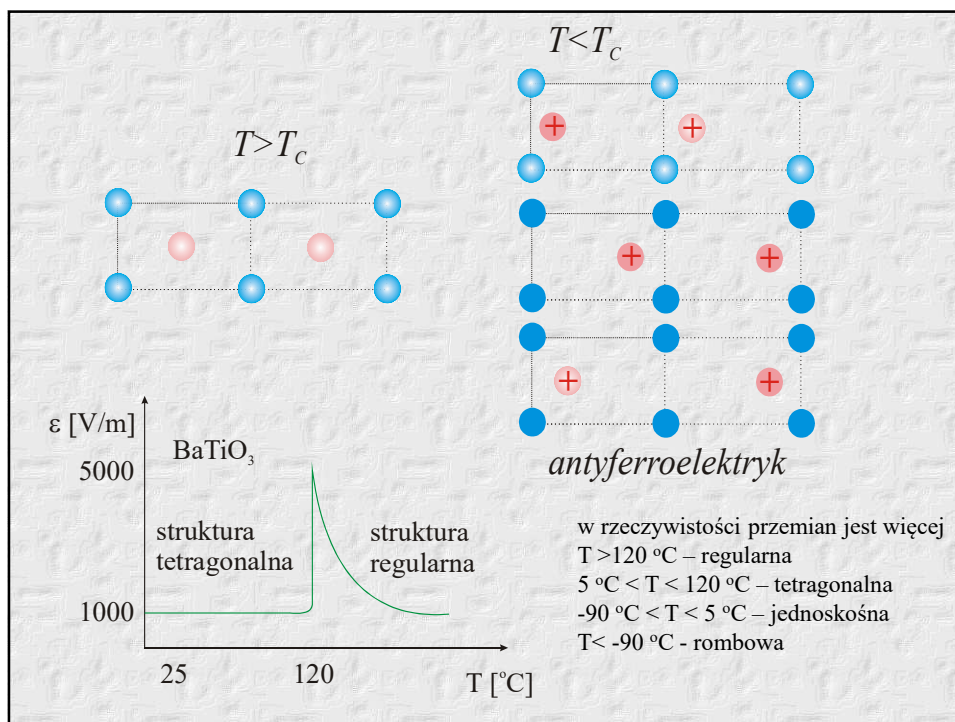
Zależność ta nosi nazwę prawa Curie-Weissa.

Od temperatury zależy też $\text{tg} \delta$ – najsilniejsza zależność występuje w pobliżu temperatury Curie

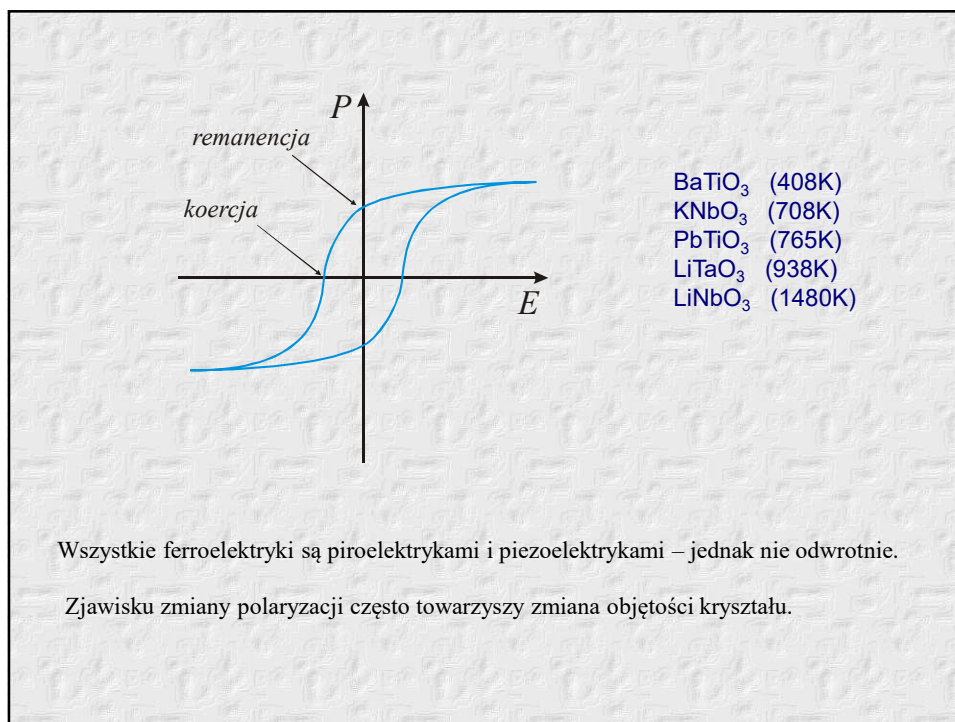
21



22



23

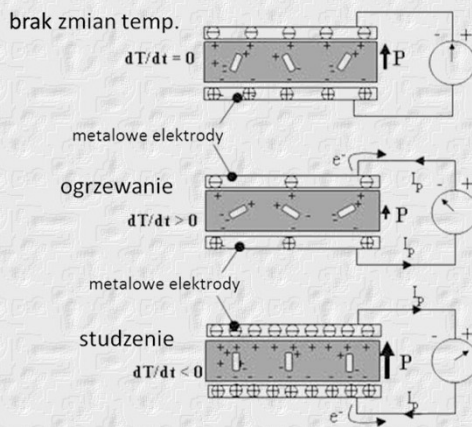


24

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. $10^{-15} \text{ C/cm}^2/^{\circ}\text{C}$.



Efekt odwrotny nosi nazwę efektu elektrokalorycznego

25

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 trójkwadrantowe 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).

26

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:

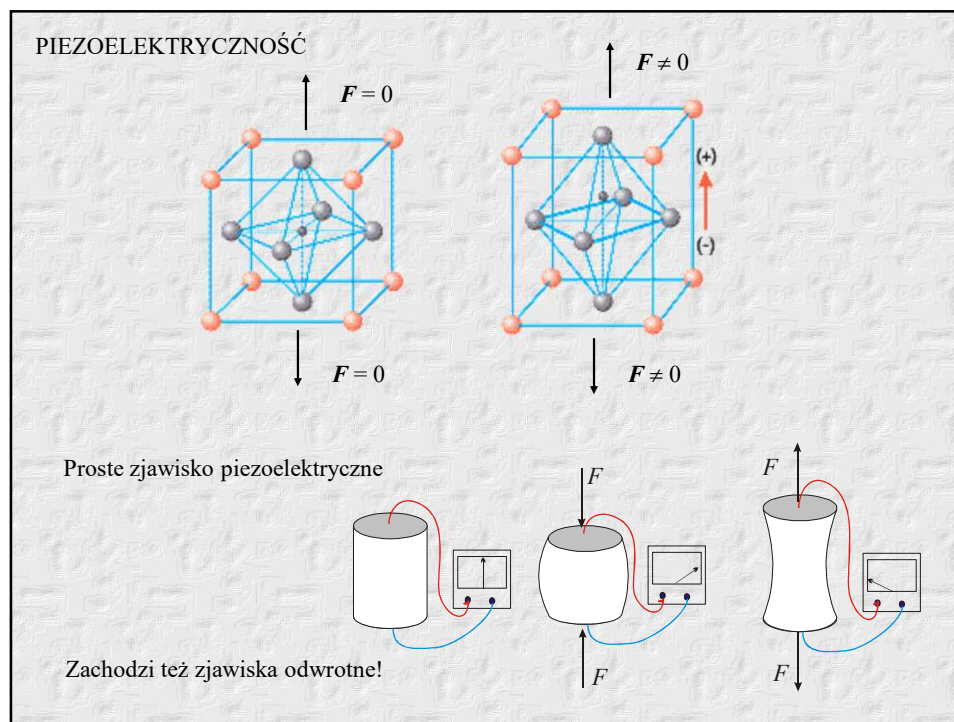
niobian ołowiowo magnezowy PMN

niobian ołowiowo magnezowy-tytanian ołowiu PMN-PT

tytanian ołowiowo lantanowo-cyrkonowy PLZT

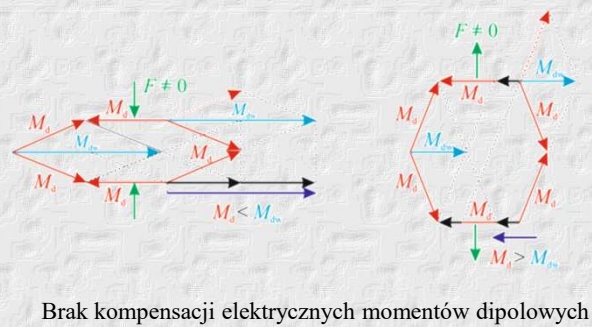
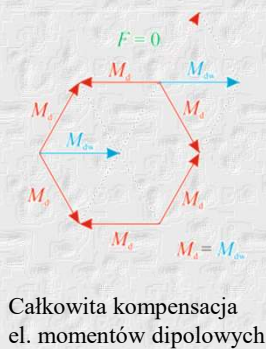
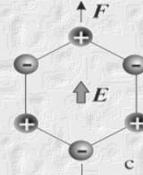
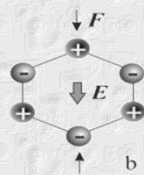
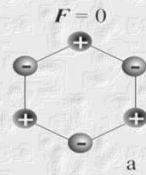
Efekt ten jest słaby i przez to jak dotąd stosunkowo rzadko wykorzystywany

27



28

Ścisłejsze (geometryczne) wyjaśnienie genezy zjawiska piezoelektrycznego



29

Ilościowo piezoelektryczność opisuje się układem tensorowych równań sprzężonych, łączących ze sobą wielkości mechaniczne i elektryczne:

$$S_{ij} = s_{ijkl} T_{kl} + d_{kij} E_k,$$

$$D_i = d_{ijk} T_{jk} + \varepsilon_{ij} E_j,$$

Korzystając z symetrii naprężeń: $T_{ij} = T_{ji}$

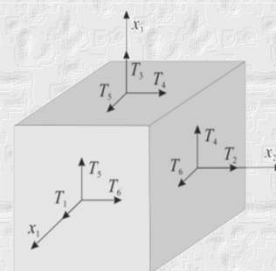
i stosując specjalne oznaczenia indeksów (notacja Voigta):

11 $\rightarrow$ 1, 22 $\rightarrow$ 2, 33 $\rightarrow$ 3, 23, 32 $\rightarrow$ 4, 13, 31 $\rightarrow$ 5, 12, 21 $\rightarrow$ 6
można zapisać deformacje i naprężenia jako wektory i zapisać
układ równań tensorowych formie macierzowej:

$$\{S\} = [s^E] \{T\} + [d^T] \{E\},$$

$$\{D\} = [d] \{T\} + [\varepsilon^T] \{E\},$$

w której $[s^E]$ jest macierzą podatności mechanicznej przy stałym lub zerowym natężeniu pola elektrycznego, $[d^T]$ macierzą współczynników piezoelektryczności odwrotnej (indeks t oznacza transpozycję macierzy współczynników piezoelektryczności prostej $[d]$), zaś $[\varepsilon^T]$ macierzą przenikalności elektrycznej przy stałym lub zerowym naprężeniu



30

W formie rozwiniętej

$$\begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \\ S_4 \\ S_5 \\ S_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^E & s_{12}^E & s_{13}^E & s_{14}^E & s_{15}^E & s_{16}^E \\ s_{21}^E & s_{22}^E & s_{23}^E & s_{24}^E & s_{25}^E & s_{26}^E \\ s_{31}^E & s_{32}^E & s_{33}^E & s_{34}^E & s_{35}^E & s_{36}^E \\ s_{41}^E & s_{42}^E & s_{43}^E & s_{44}^E & s_{45}^E & s_{46}^E \\ s_{51}^E & s_{52}^E & s_{53}^E & s_{54}^E & s_{55}^E & s_{56}^E \\ s_{61}^E & s_{62}^E & s_{63}^E & s_{64}^E & s_{65}^E & s_{66}^E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} d_{11} & d_{21} & d_{13} \\ d_{12} & d_{22} & d_{32} \\ d_{13} & d_{23} & d_{33} \\ d_{14} & d_{24} & d_{34} \\ d_{15} & d_{25} & d_{35} \\ d_{16} & d_{26} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & d_{13} & d_{14} & d_{15} & d_{16} \\ d_{21} & d_{22} & d_{23} & d_{24} & d_{25} & d_{26} \\ d_{31} & d_{32} & d_{33} & d_{34} & d_{35} & d_{36} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \\ T_5 \\ T_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix}$$

31

SiO₂

$\rho=2651 \text{ kg/m}^3$

$$s_{ij}^E = 10^{-12} \cdot \begin{bmatrix} 12,77 & -1,79 & -1,22 & -4,5 & 0 & 0 \\ -1,79 & 12,77 & -1,22 & 4,5 & 0 & 0 \\ -1,22 & -1,22 & 9,6 & 0 & 0 & 0 \\ -4,5 & 4,5 & 0 & 20,04 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20,04 & -9 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -9 & 29,12 \end{bmatrix} [\text{m}^2/\text{N}]$$

$$d_{ij} = 10^{-12} \cdot \begin{bmatrix} -2,3 & 0 & 0 \\ 2,3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ -0,67 & 0 & 0 \\ 0 & 0,67 & 0 \\ 0 & 4,6 & 0 \end{bmatrix} [\text{C/N}]$$

$$\frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_0} = \begin{bmatrix} 4,52 & 0 & 0 \\ 0 & 4,52 & 0 \\ 0 & 0 & 4,68 \end{bmatrix}$$

32

BaTiO₃
 $\rho=6020 \text{ kg/m}^3$

$$s_{ij}^E = 10^{-12} \cdot \begin{bmatrix} 8,05 & -2,35 & -5,24 & -1,02 & 0 & 0 \\ -2,35 & 8,05 & -5,24 & 1,02 & 0 & 0 \\ -5,24 & -5,24 & 15,7 & 0 & 0 & 0 \\ -1,02 & 1,02 & 0 & 18,4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 18,4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8,84 \end{bmatrix} [\text{m}^2/\text{N}]$$

$$d_{ij} = 10^{-12} \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & -34,5 \\ 0 & 0 & -34,5 \\ 0 & 0 & 85,6 \\ 0 & 392 & 0 \\ 392 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} [\text{C/N}]$$

$$\frac{\epsilon_{ij}}{\epsilon_0} = \begin{bmatrix} 2920 & 0 & 0 \\ 0 & 2920 & 0 \\ 0 & 0 & 168 \end{bmatrix}$$

33

Do opisu własności piezoelektrycznych materiałów używa się, obok modułów d , zwanych też modułami odkształceniowymi także ich odwrotności h oraz stałych napięciowych g i ich odwrotności e .

$$d_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial T_j} \right)^E = \left(\frac{\partial S_j}{\partial E_i} \right)^T \left[\frac{\text{C}}{\text{N}} \right], \left[\frac{\text{m}}{\text{V}} \right]$$

$$h_{ij} = - \left(\frac{\partial E_i}{\partial S_j} \right)^D = - \left(\frac{\partial T_j}{\partial D_i} \right)^S \left[\frac{\text{N}}{\text{C}} \right], \left[\frac{\text{V}}{\text{m}} \right]$$

$$e_{ij} = \left(\frac{\partial D_i}{\partial S_j} \right)^E = - \left(\frac{\partial T_j}{\partial E_i} \right)^S \left[\frac{\text{Vm}}{\text{N}} \right], \left[\frac{\text{C}}{\text{m}^2} \right]$$

$$g_{ij} = - \left(\frac{\partial E_i}{\partial T_j} \right)^D = - \left(\frac{\partial S_j}{\partial D_i} \right)^T \left[\frac{\text{N}}{\text{Vm}} \right], \left[\frac{\text{m}^2}{\text{C}} \right]$$

34

układ równań dla sprzężenia elektromechanicznego może mieć kilka równoważnych form

$$\{E\} = [\beta^T] \{D\} - [g] \{T\},$$

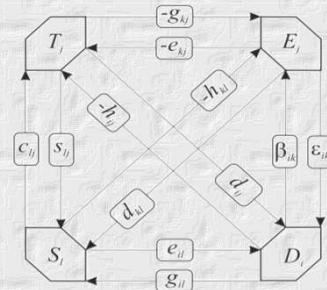
$$\{S\} = [s^D] \{T\} + [g'] \{D\},$$

$$\{D\} = [\varepsilon^S] \{E\} + [e] \{S\},$$

$$\{T\} = [c^E] \{S\} + [e'] \{E\},$$

$$\{E\} = [\beta^S] \{D\} - [h] \{S\},$$

$$\{T\} = [c^D] \{S\} - [h'] \{D\},$$



indeks górny t oznacza transpozycję, c^D są odwrotnościami s^D , β^S odwrotnościami ε^S

35

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

$$k_{31} = \frac{d_{31}}{\sqrt{S_{33}^T S_{11}^E}} \quad \text{wszystkie naprężenia zerowe oprócz } T_1$$

$$k_{33} = \frac{d_{33}}{\sqrt{S_{33}^T S_{33}^E}} \quad \text{wszystkie naprężenia zerowe oprócz } T_3$$

$$k_{33} = \frac{e_{33}}{\sqrt{S_{33}^S S_{33}^D}} \quad \text{wszystkie deformacje zerowe oprócz } S_3$$

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

36

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:

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

37

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

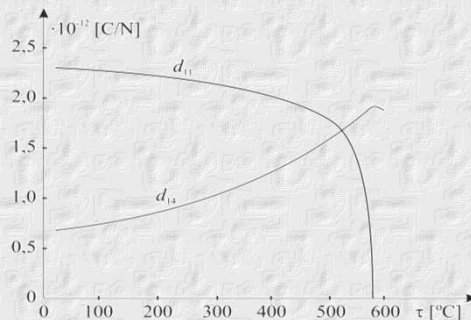
Temperaturowy współczynnik d_{ij} definiuje się następująco:

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

Dla kwarcu

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

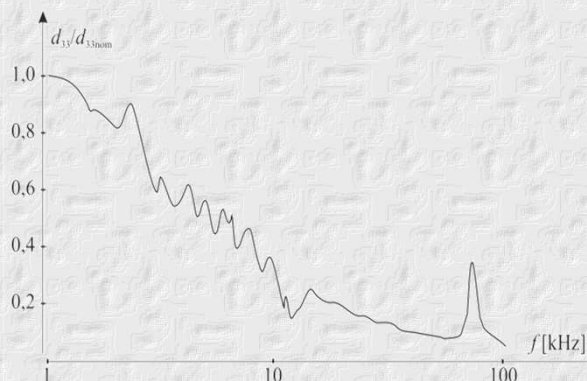
Wartości współczynników temperaturowych nie są wysokie, a ich liniowe przybliżenie może być stosowane z dala od temperatury Curie (dla kwarcu poniżej ok. 400 °C).



38

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

39

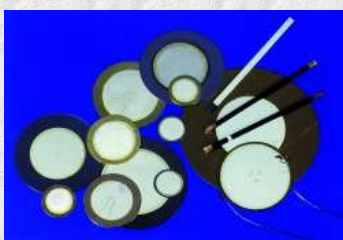
Piezoelektryki są szeroko wykorzystywane do budowy:

- 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

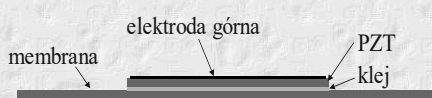
40

Materiały piezoceramiczne mogą być dowolnie kształtowane



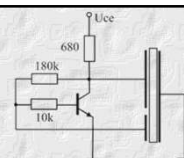
41

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



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



$$\alpha = 0,412$$



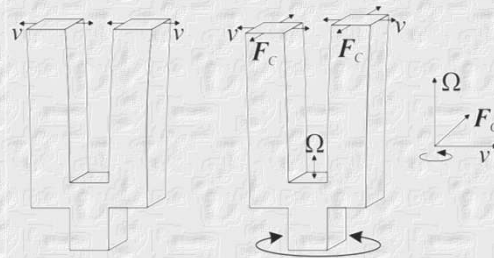
$$\alpha = 0,233$$



$$\alpha = 0,172$$

42

żyroskopy piezoelektryczne



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

wektor prędkości liniowej końcówek widełek cyklicznie zmienia zwrot

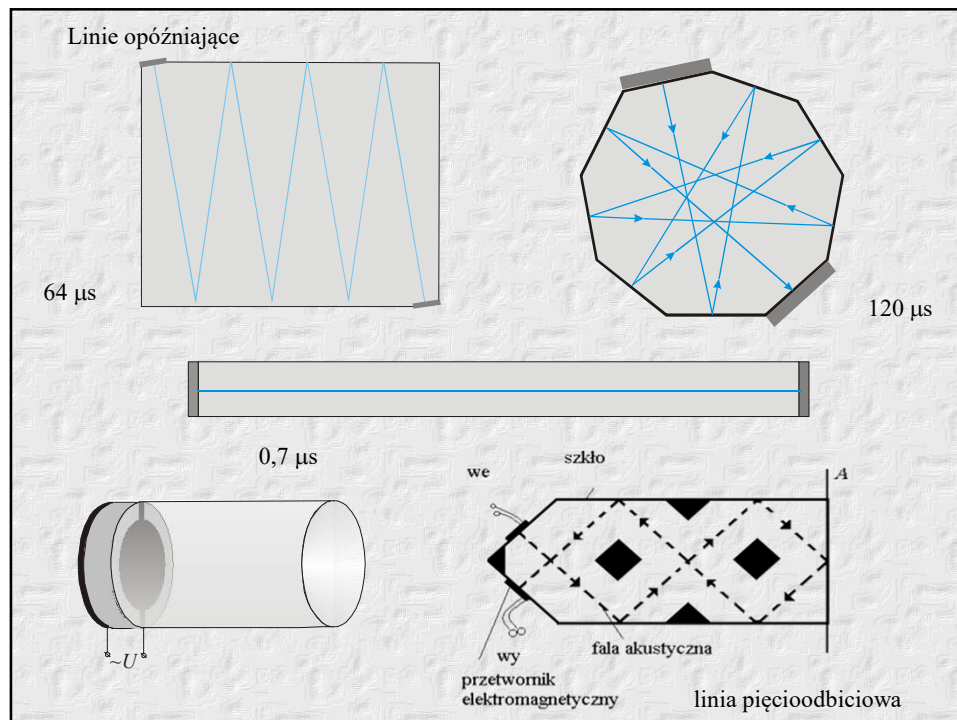
generowana siła Coriolisa także zmienia zwrot

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

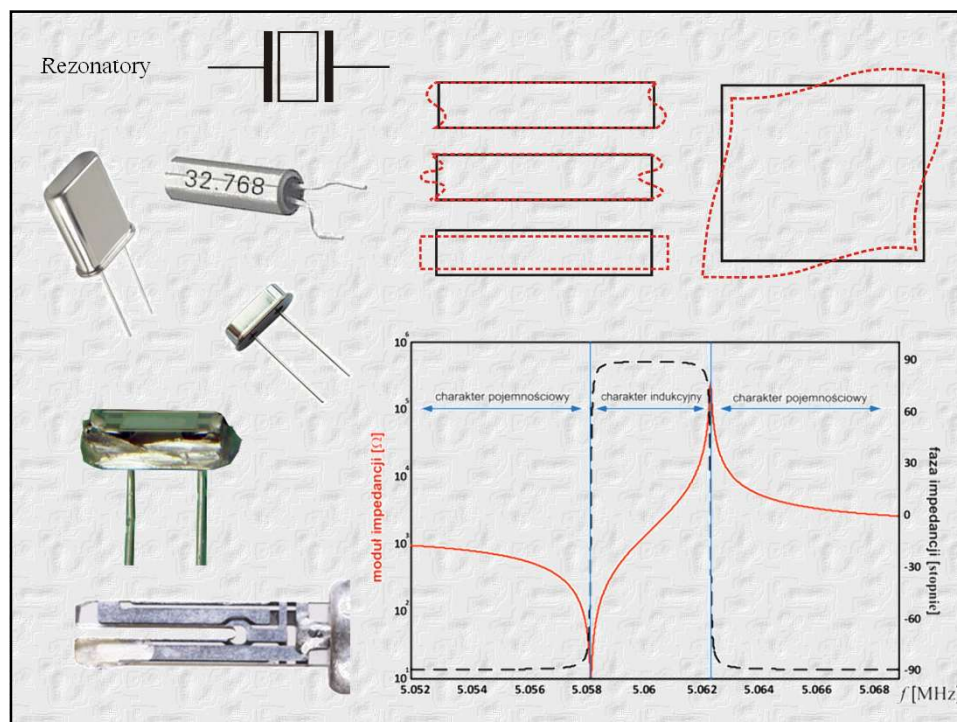
amplituda tych drgań jest proporcjonalna do prędkości ruchu obrotowego widełek

drgania w obydwu płaszczyznach separuje się częstotliwościowo odpowiednio dobierając przekrój widełek

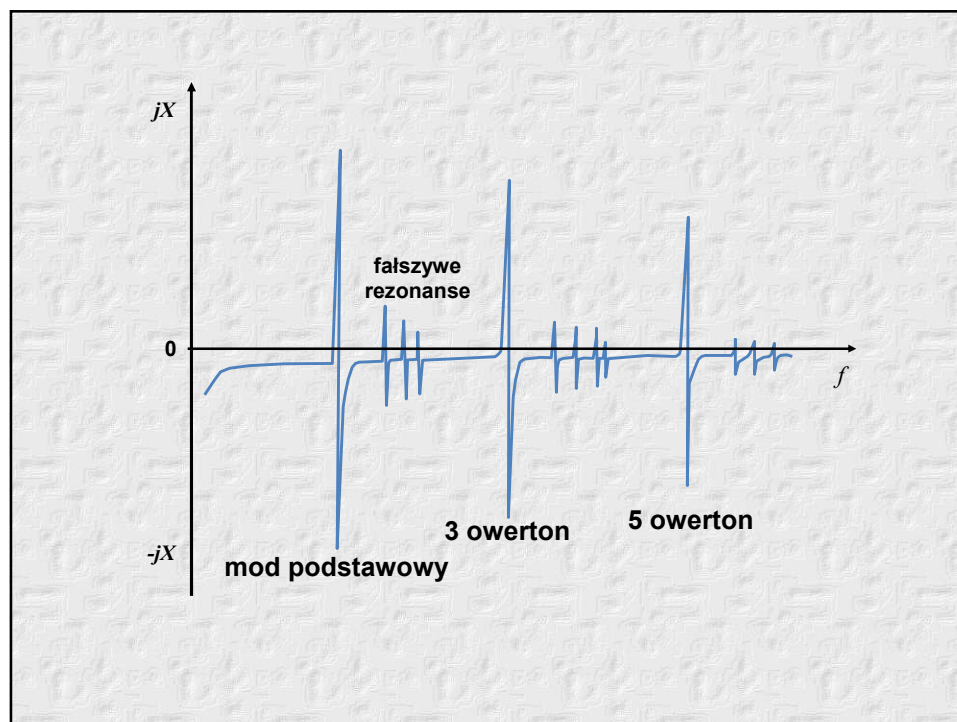
43



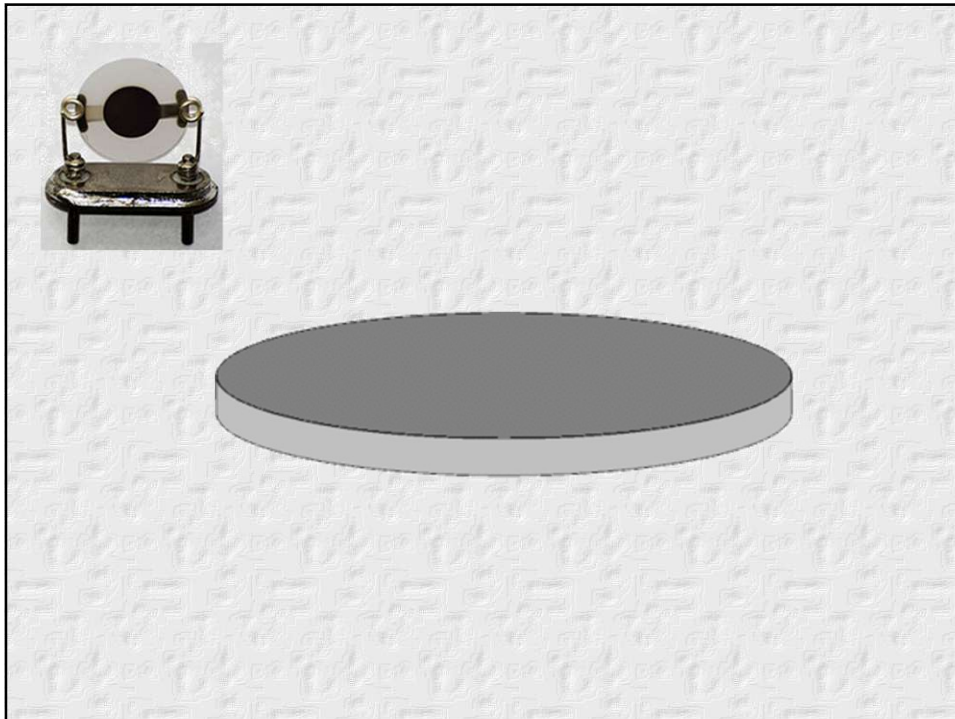
44



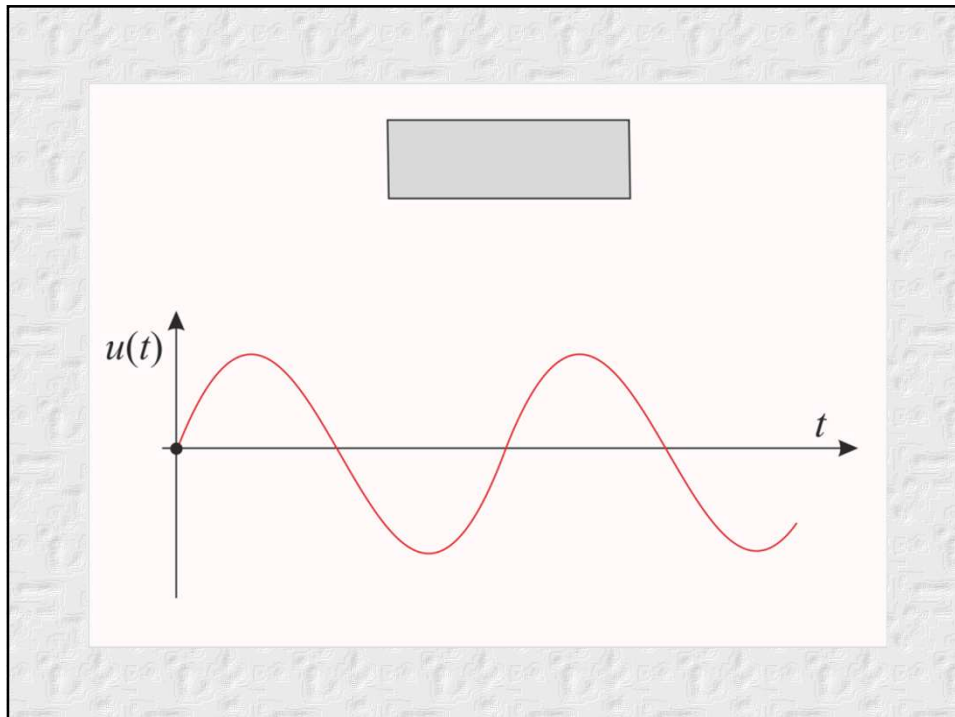
45



46

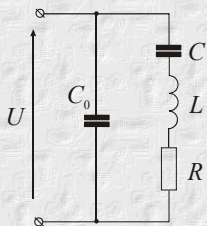


47



48

Schemat zastępczy



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

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

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

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

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

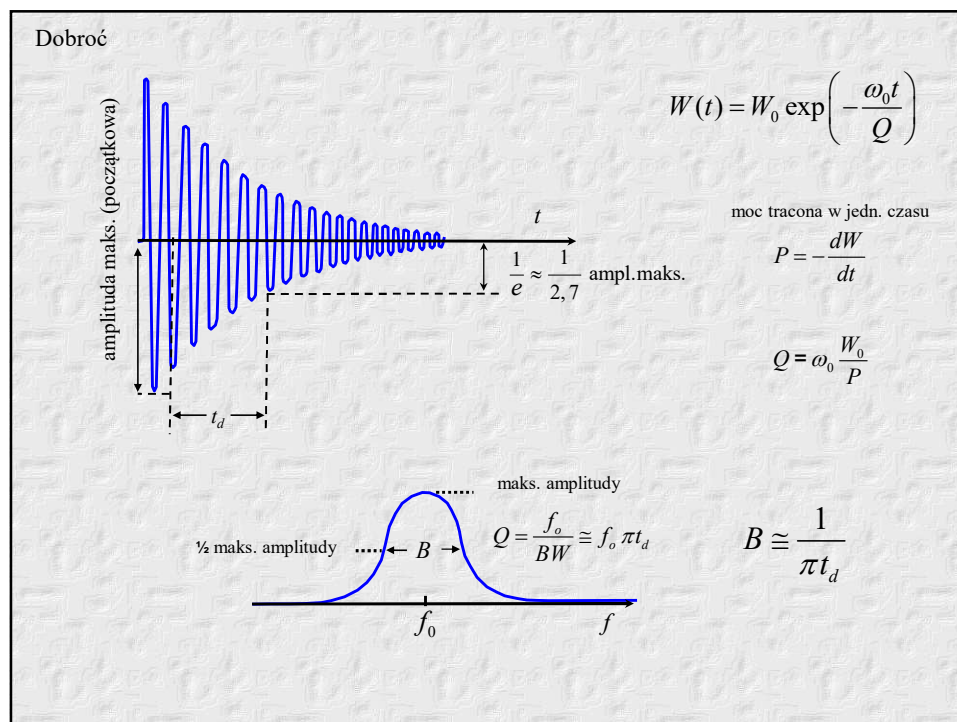
$$\varphi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}$$

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

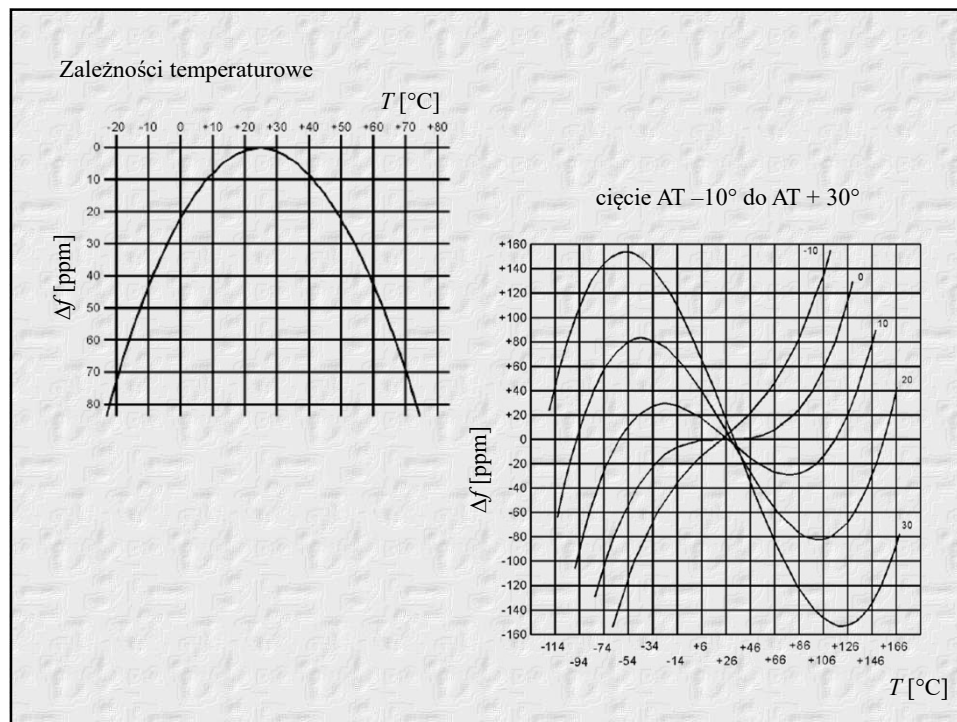
$$\frac{d\varphi}{df} \cong \frac{360}{\pi} \frac{Q}{f_s}$$

przenikalność elektryczna (dla $\text{SiO}_2 \approx 40 \text{ pF/m}$)
 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

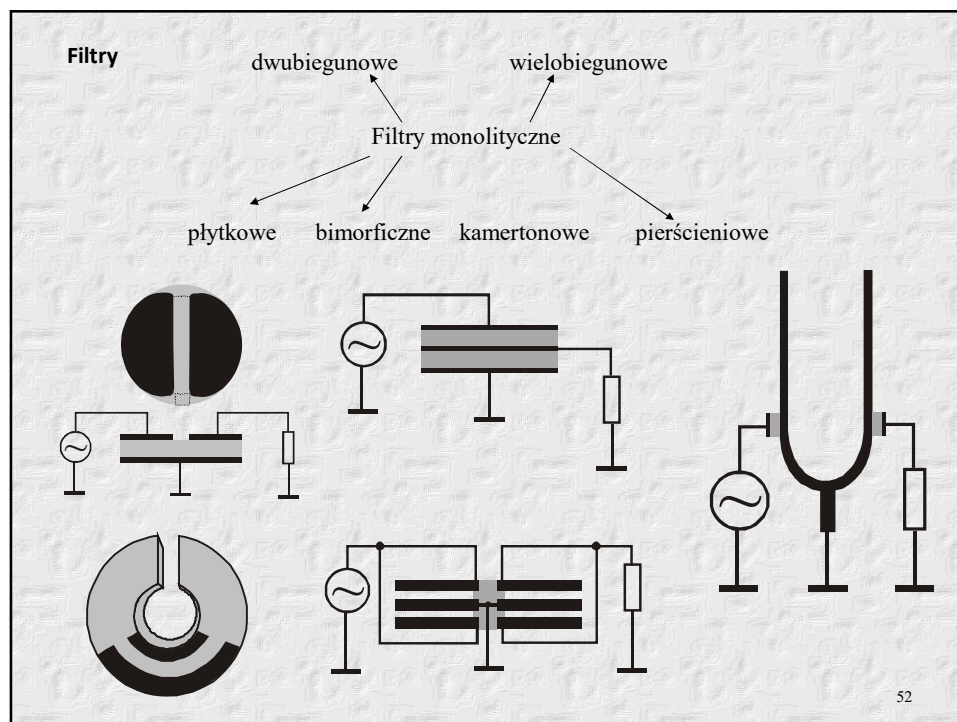
49



50

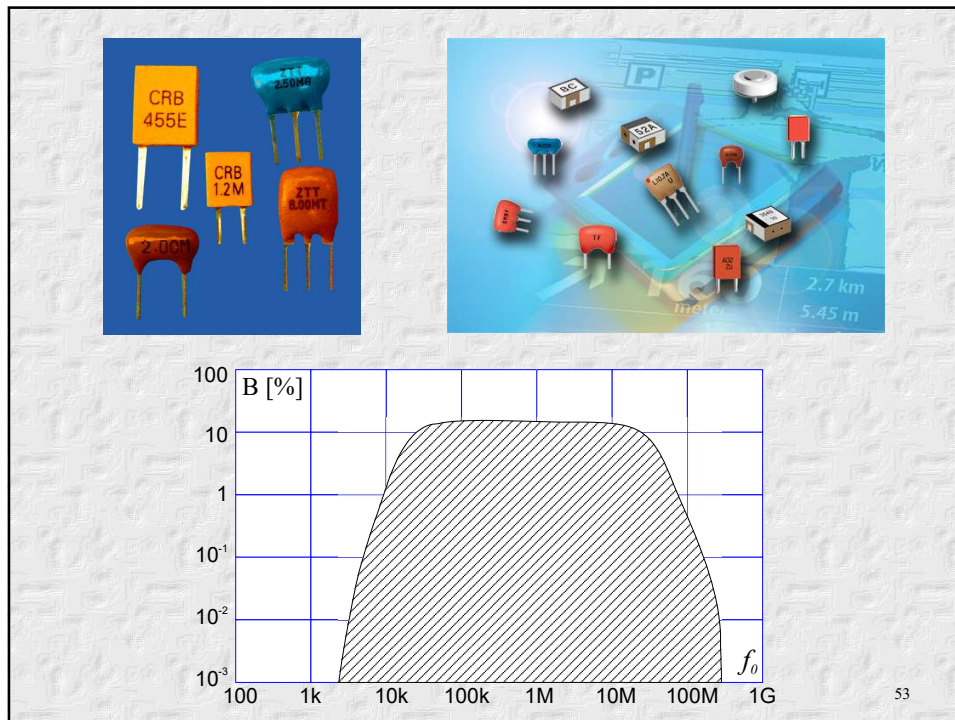


51



52

52



53

Stosy piezoelektryczne

$$C \approx \frac{n\epsilon_{33T}A}{d}$$

$n=L/d$ – liczba warstw
 ϵ_{33T} – przenikalność elektryczna przy stałym naprężeniu
 A – powierzchnia elektrod
 d – grubość warstwy

$$i_{sr} \approx fCU_{pp} \quad i_{\max} \approx \pi fCU_{pp}$$

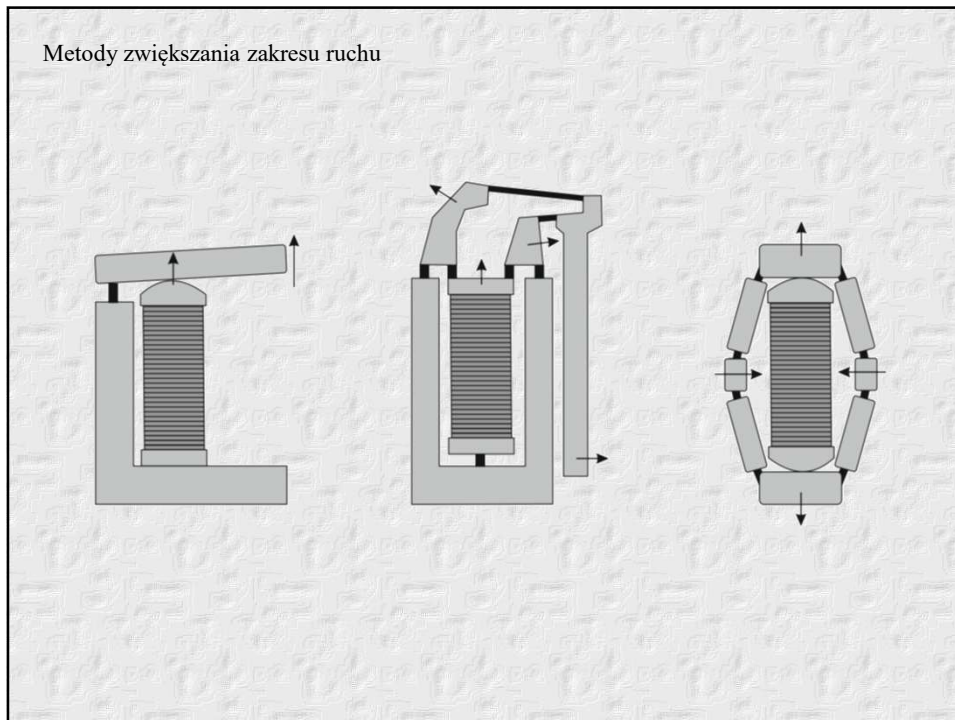
$$f_{\max} \approx \frac{i_{\max}}{2CU_{pp}}$$

$$P_{sr} \approx CU_{\max} U_{pp} f \quad P_{\max} \approx \pi CU_{\max} U_{pp} f$$

$$P_{\text{JOULE'a}} \approx \frac{\pi}{4} \tan \delta f CU_{pp}^2$$

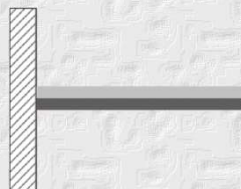
54

Metody zwiększania zakresu ruchu



55

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

56

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

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

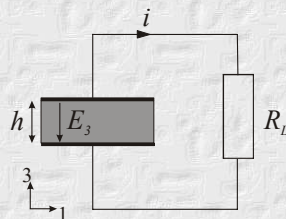
Z prawa Ohma:

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

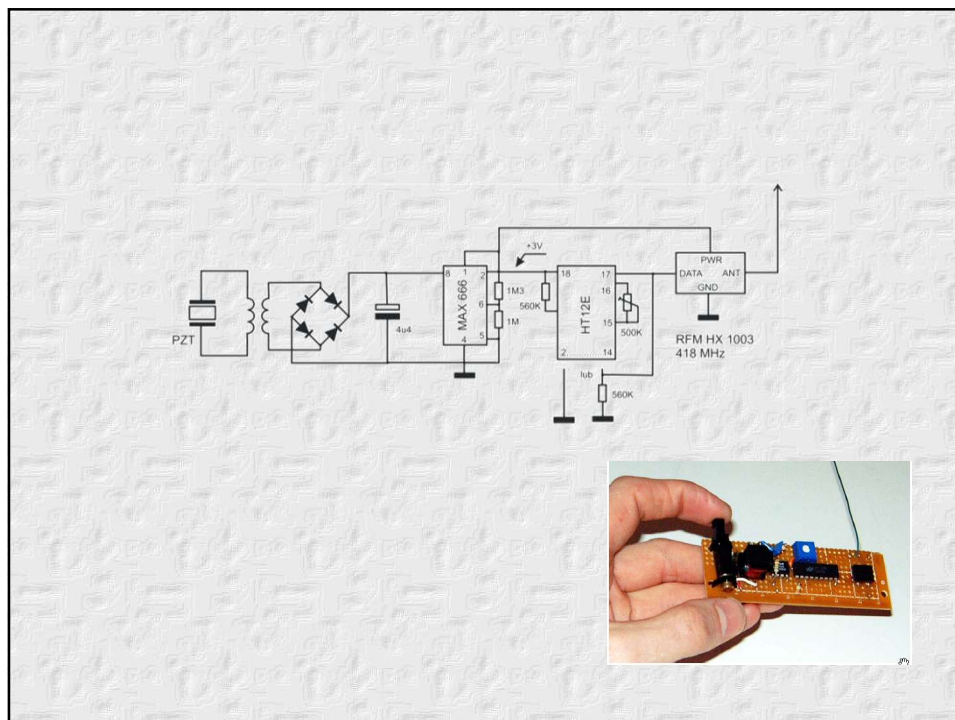
Z tego:

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

~ pojedyncze mW



57



58

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

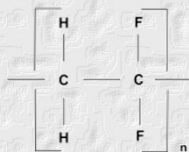
wysoka odporność chemiczna

obojętność fizjologiczna

niska palność

wyjątkowa odporność na działanie UV oraz czynników atmosferycznych

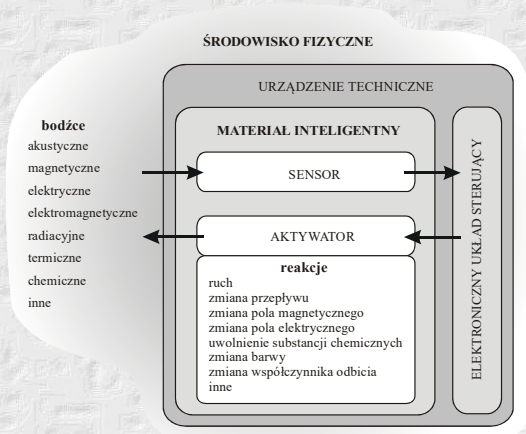
dobra skrawalność oraz sprężystość zwrotna



59

Materiały inteligentne (ang. smart materials)

Są to struktury łączące własności czujnika i aktywatora



60

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)			

61

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.

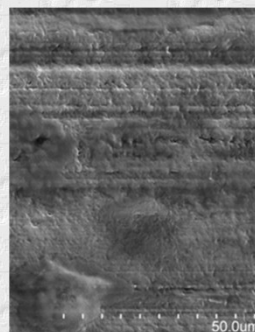
62

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

63

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

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

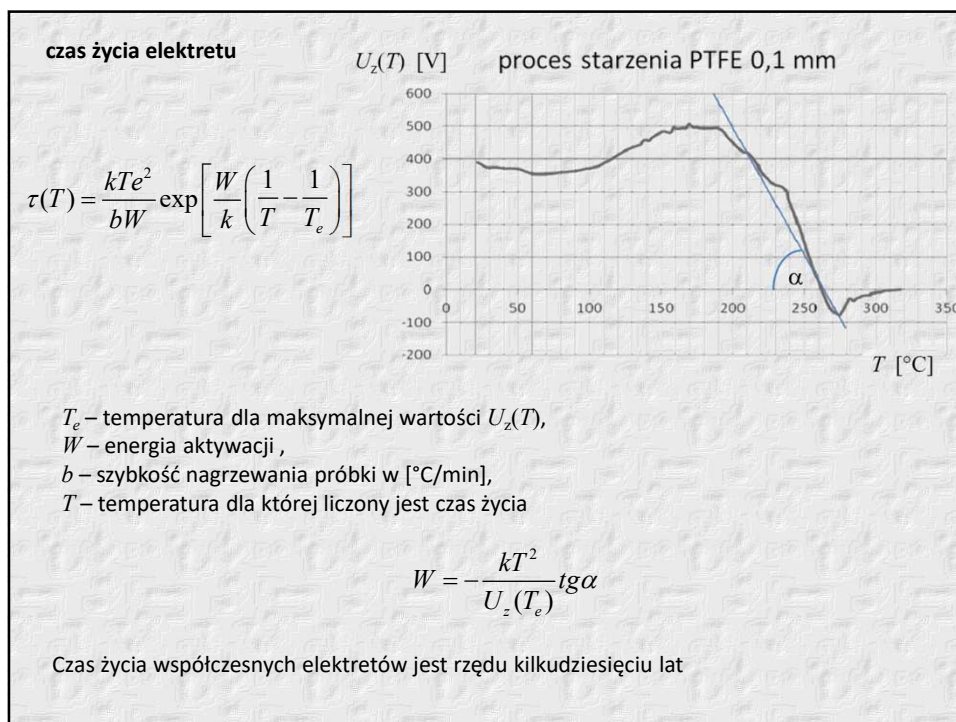
ϵ_r – bezwzględna przenikalność elektryczna elektretu
 σ – konduktywność elektretu

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

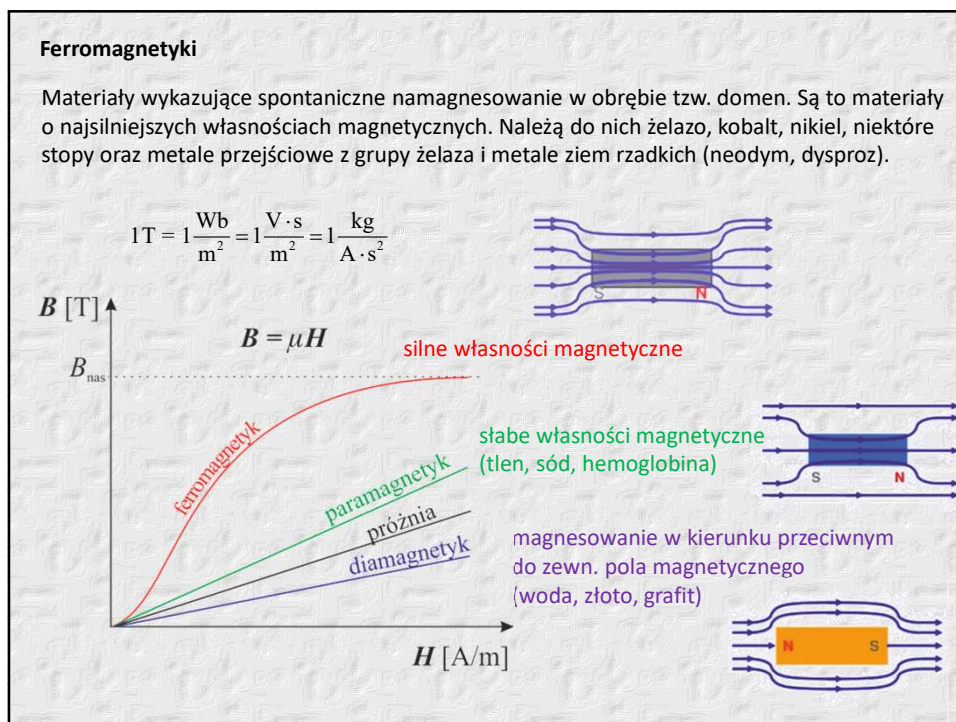
Dzięki temu procesowi zmniejsza się efektywna gęstość powierzchniowa ładunku; pozostały ładunek wykazuje większą stabilność czasową.

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

64



65



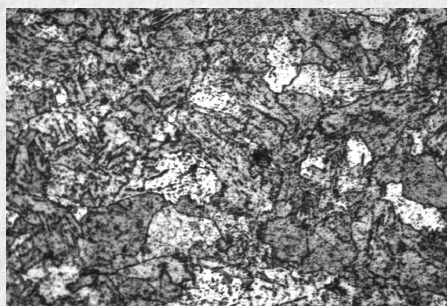
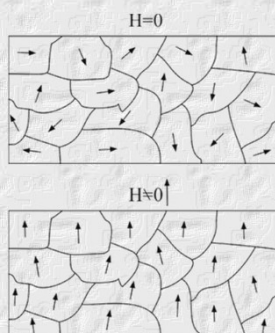
66

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.

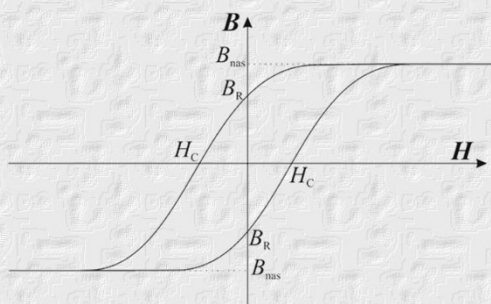
Zawartość węgla w roztworze waha się od 0,008 w temp. pokojowej do ok. 0,02 w temperaturze 723 °C, w której przechodzi on w paramagnetyczny austenit.

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



67

Historia magnesowania = histereza

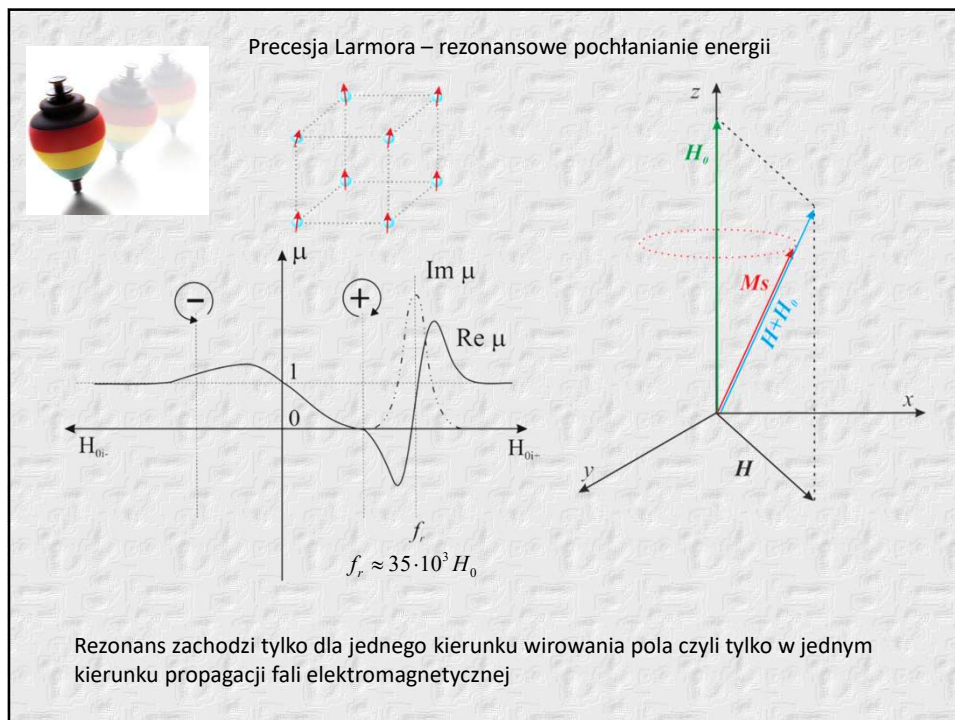


Remanencja (pozostałość magnetyczna) – wielkość namagnesowania po zaniku pola magnesującego

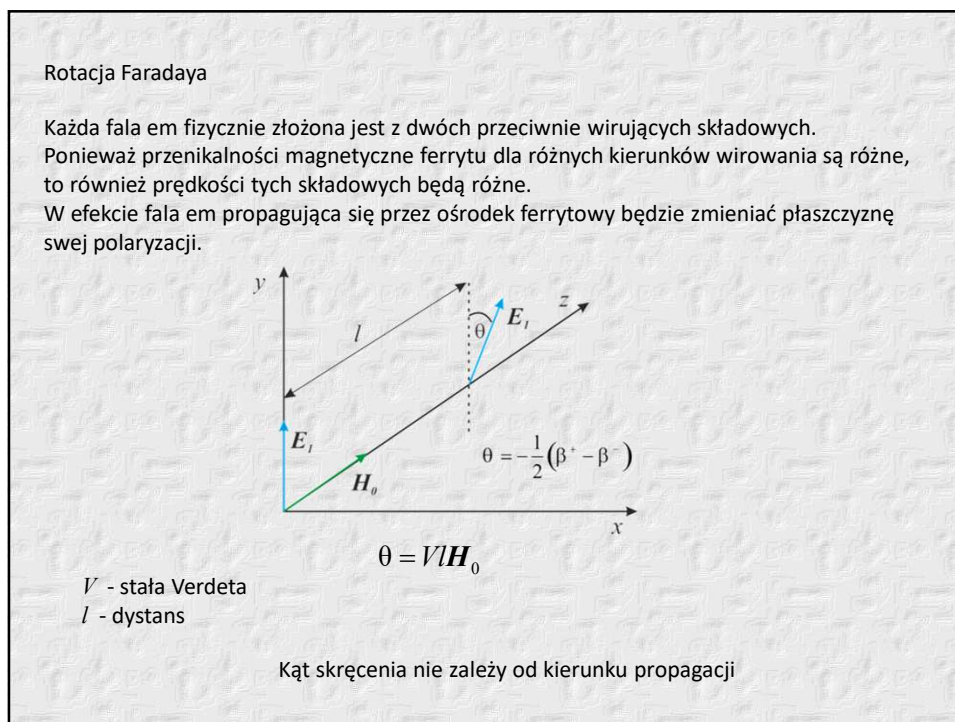
Koercja – wartość pola magnetycznego potrzebna do całkowitego zaniku namagnesowania
poniżej 1000 A/m mówi się o materiałach magnetycznie miękkich

Temperatura Curie – wartość temperatury, powyżej której zanikają własności ferromagnetyczne

68

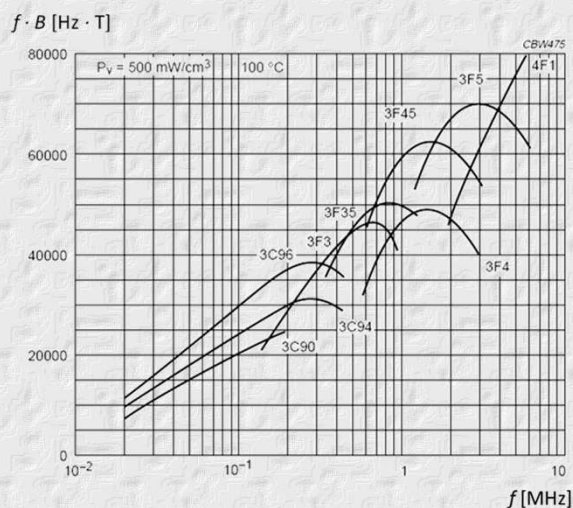


69



70

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



71

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	Sm ₂ (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/m ³]	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

72

Materiały ferrytowe

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

zastosowania: transformatory, dławiki dużej mocy

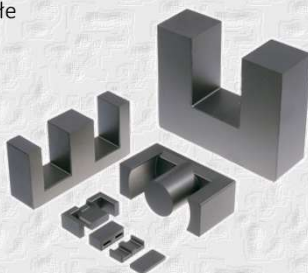
- materiały do konstrukcji filtrów charakteryzujące się niskimi stratami w szerokim zakresie częstotliwości,

wysoką stabilnością temperaturową i wysoką dobrocią

zastosowania: anteny obwody rezonansowe transformatory szerokopasmowe, dławiki i cewki

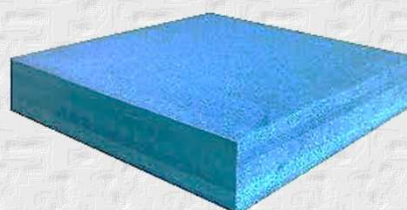
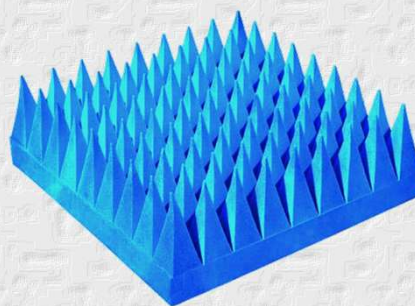
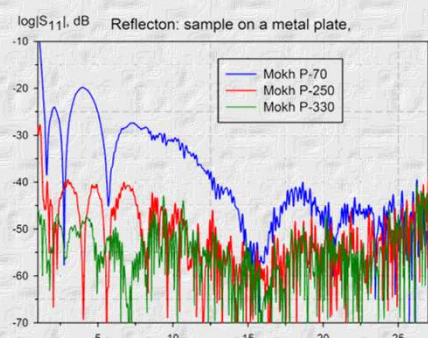
- materiały o wysokiej przenikalności magnetycznej

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

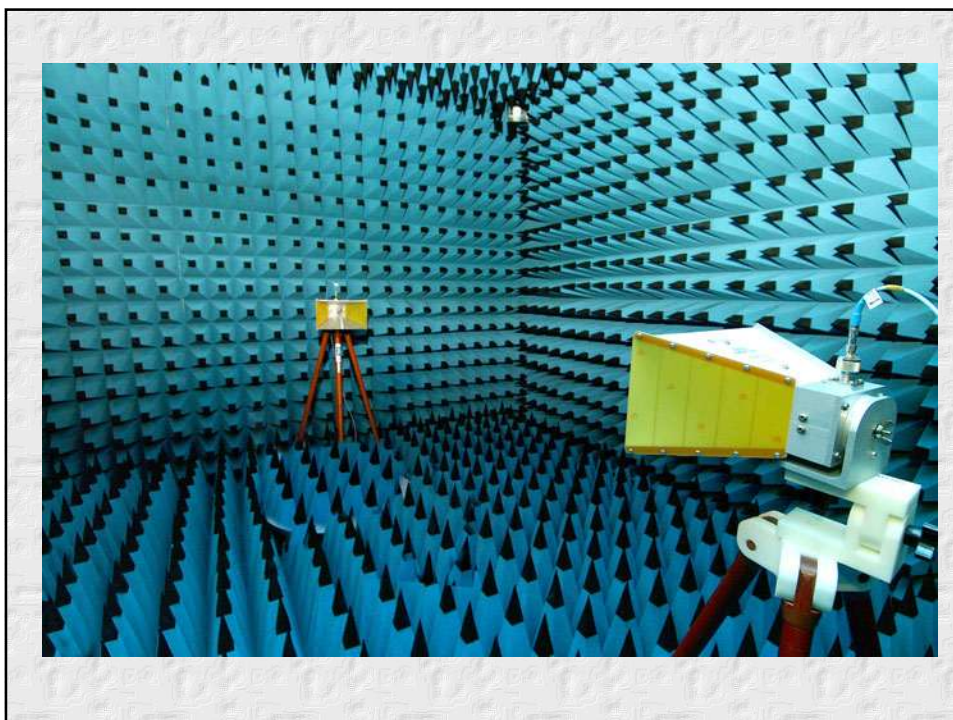


73

Proszki ferromagnetyczne



74



75

Ceramiki

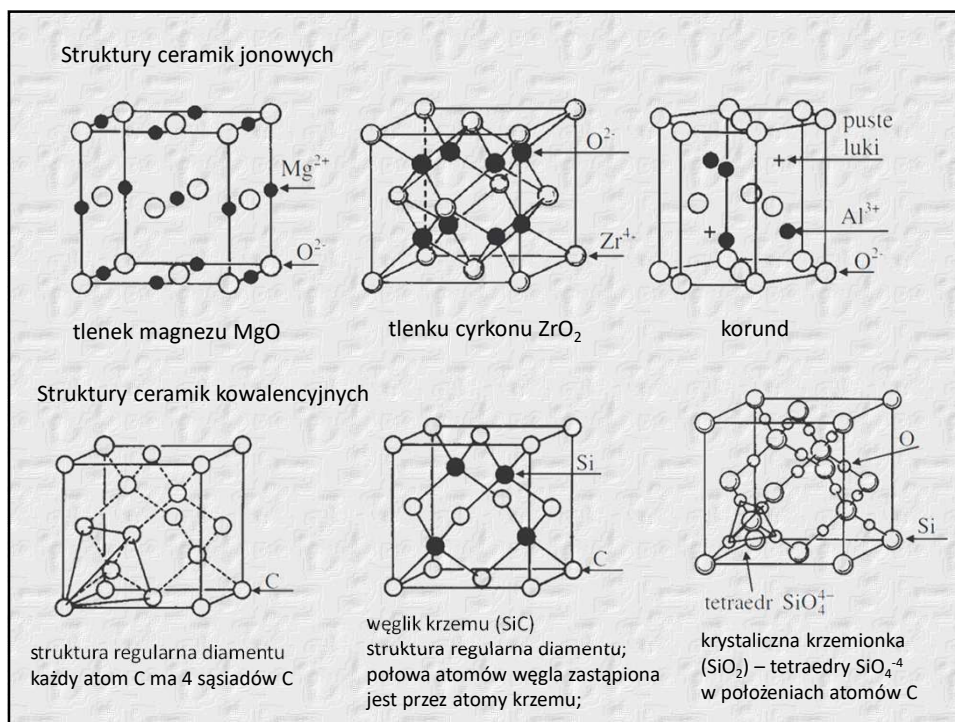
Są to nieorganiczne materiały niemetaliczne (zarówno krystaliczne jak i amorficzne), złożone głównie ze związków metali i niemetalu Al, Si, Ti, C, O, N, tworzących formy przestrzenne o jonowych, kowalencyjnych bądź mieszanych wiązaniach międzyatomowych.

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)



76



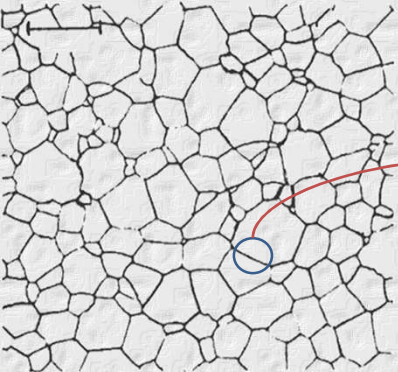
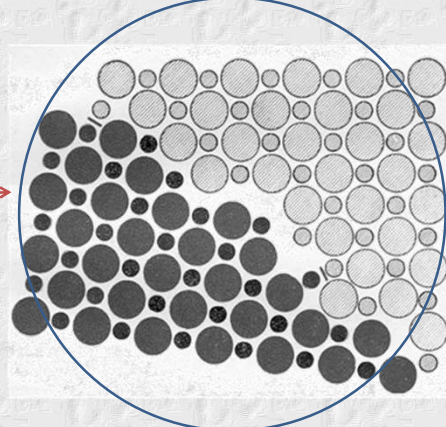
77

Ziarnista mikrostruktura ceramiki – granica ziarna

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

Wielkość ziaren jest często mniejsza od 1 μm , 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 250-280 m^2/g

78

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)

79

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

80

Porowatość ceramiki

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

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

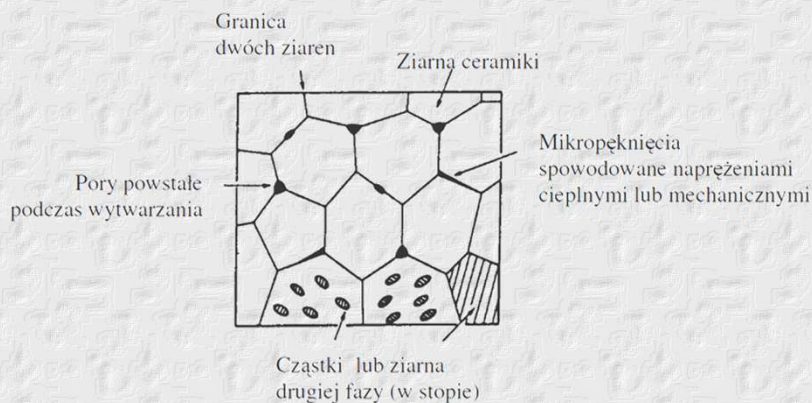
ρ_{cl} – gęstość ceramiki litej

ρ_{cp} – gęstość ceramiki porowatej

m_{cs} – masa próbki suchej

m_{cpow} – masa próbki w powietrzu

m_{cwod} – masa próbki w wodzie



81

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

82

Zastosowania typowe dla elektroniki



83

Zastosowania typowe dla elektrotechniki



84

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.

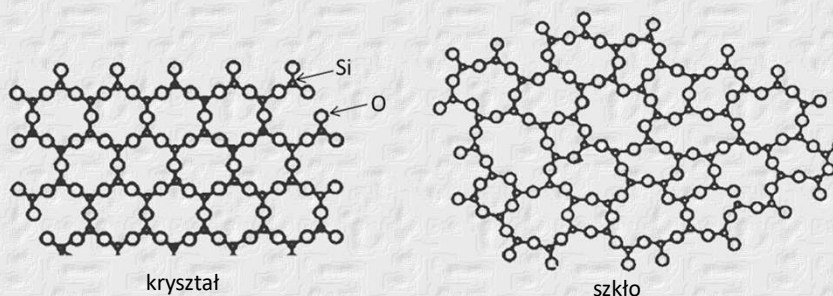
Głównymi składnikami są SiO_2 , B_2O_3 i P_2O_5 , zaś dodatkami tlenki arsenu i germanu oraz siarka, selen i tlenek ołowiu.

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

85

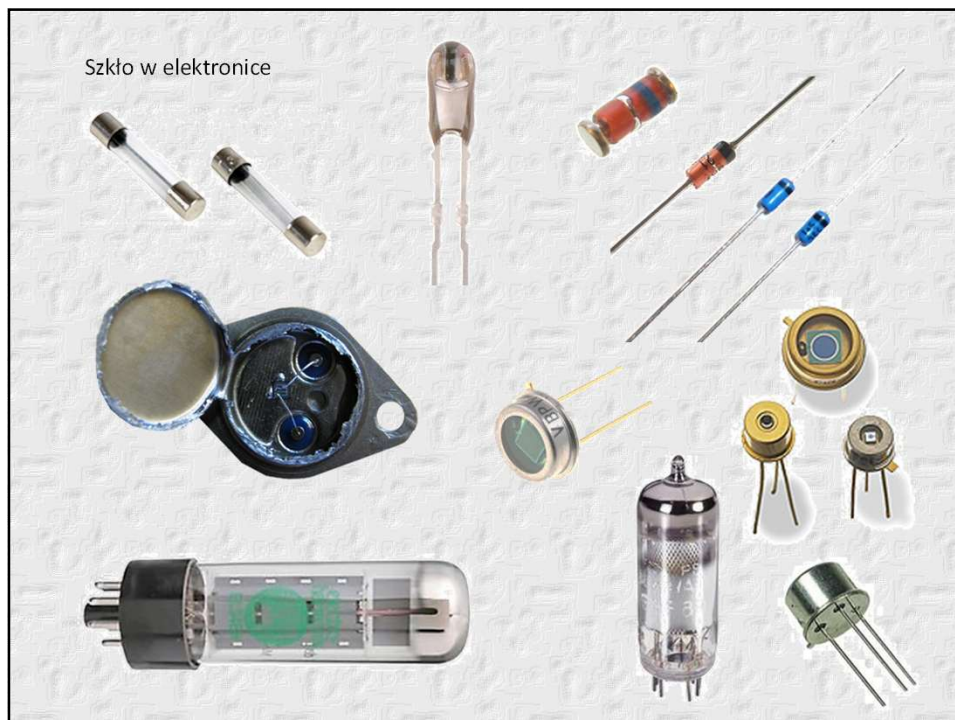
Najszerze zastosowanie znalazły **szkła krzemianowe**

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.

86



87

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

88

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

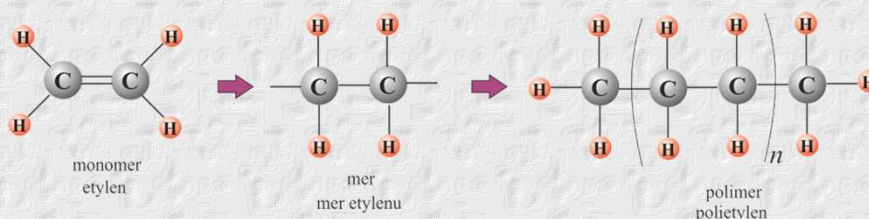
89

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).

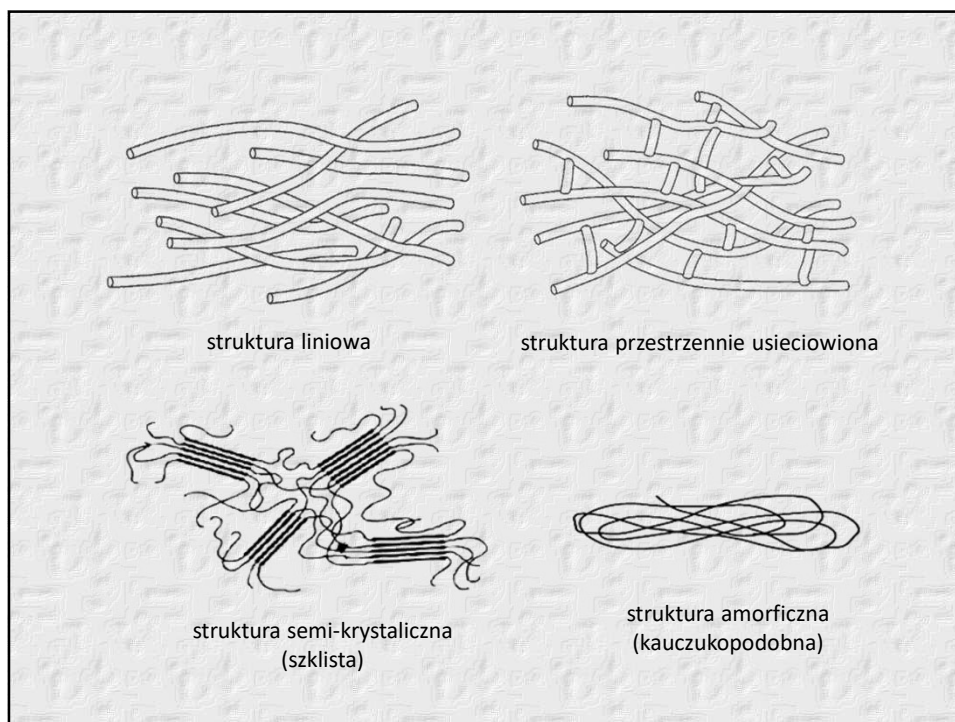
Podstawowe właściwości polimerów zależą głównie od ciężaru cząsteczkowego. Polimery o niskim ciężarze cząsteczkowym są płynne, oleiste, zaś o wielkim ciężarze cząsteczkowym są ciałami stałymi.

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

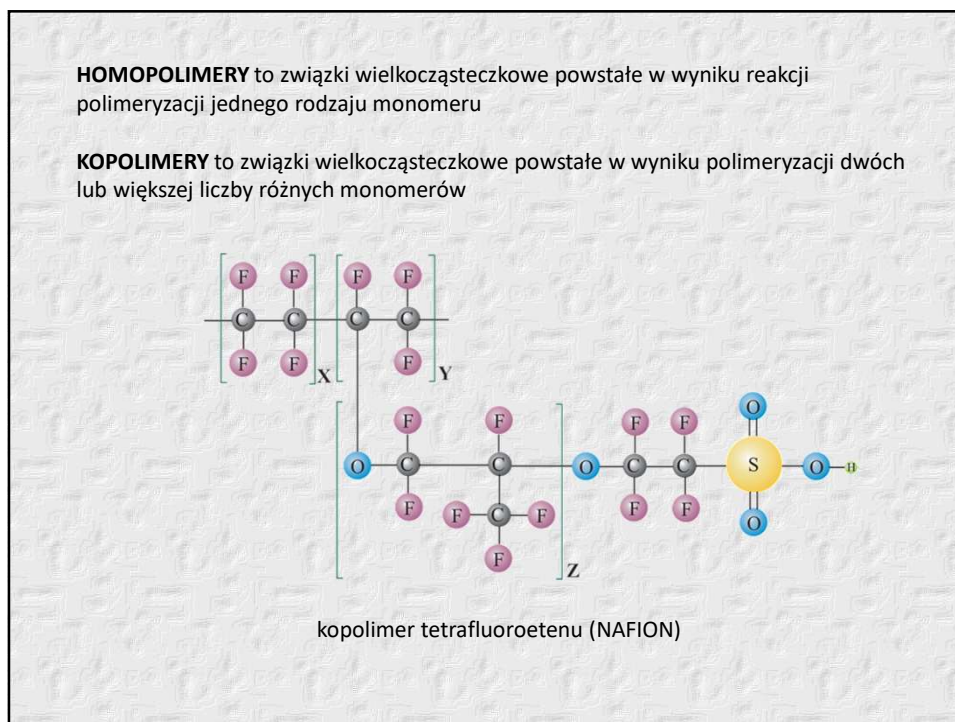
Każda makrocząsteczka składa się z elementów podstawowych zwanych merami (monomerami). Proces łączenia się merów w substancję wielkocząsteczkową nazywa się polimeryzacją, a uzyskany produkt polimerem. Proces odwrotny nosi nazwę depolimeryzacji



90



91



92

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.

93

Przykłady tworzyw sztucznych będących produktami polikondensacji (duropłastów):

- 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

94

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 mięknięcia (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 -> niełamliwe artykuły codziennego użytku, artykuły techniczne o wysokich właściwościach wytrzymałościowych, włókna, lekkie tkaniny, itp.

95

- 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 fozgenu 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.

96

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.

97

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.

98

Duroplasty chemoutwardzalne z odpowiednimi dodatkami stosowane są na obudowy dyskretnych przyrządów elektronicznych oraz układów scalonych



99

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

100

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

101

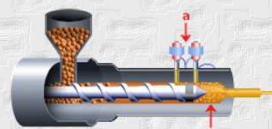
Tworzywa porowate

Tworzywa sztuczne zawierające w strukturze puste przestrzenie

dzielą się na:

tworzywa gąbczaste - pory otwarte i połączone wzajemnie

tworzywa piankowe - pory zamknięte

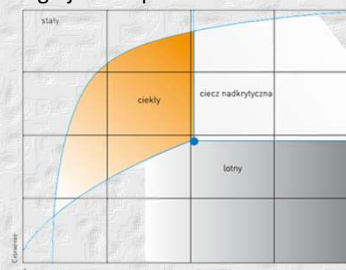


Tworzywa porowate wytwarza się w wyniku zwiększania objętości litej masy tworzywa (spienianie chemiczne lub fizyczne) lub bez jej zwiększania (wyfukiwanie)

Przy spienianiu chemicznym do tworzywa sztucznego dodaje się granulat spieniający. 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.



102

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

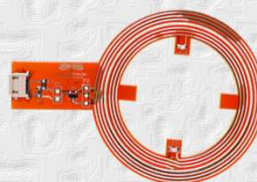
W postaci tworzyw porowatych produkuje się detale polistyrenowe, poliuretanowe, poliwęglanowe, PCW i in.

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



103

Druk 3D – technologie przyrostowe



FFF (*fused filament fabrication*)

znana pod handlową nazwą **FDM** (*fused deposition modeling*)

drukowanie przy użyciu topionego włókna termoplastycznego (filamentu)

SLA (*stereolithography*)

drukowanie przy zastosowaniu zjawiska fotopolimeryzacji różnego rodzaju żywic dobieranych zależnie od przeznaczenia – naświetlanie odbywa się od góry przy pomocy lasera

DLP (*digital light processing*) jak SLA ale źródłem światła jest projektor lub ekran LCD – naświetlanie od dołu

104

PolyJet / MJP (*multi jet printing*) – proces zbliżony do druku atramentowego 2D. Głowica natryskuje żywicę światłoutwardzalną (UV) warstwa po warstwie

CJP (*color jet printing*) natryskiwanie spoiwa i atramentu na proszek gipsowy

MJF (*multi jet fusion*) jak CJP ale ze sproszkowanymi tworzywami (poliamidy)

SLS (*selective laser sintering*) selektywne spiekanie laserem proszków z tworzyw sztucznych

SLM/DLMS (*selective laser melting/direct metal laser sintering*)
Podobnie do SLS selektywne topienie lub spiekanie laserem proszków metali

EBM (*electron beam melting*) odmiana SLM z wiązką elektronów zamiast lasera

105



106

Filamenty (najważniejsze)

PLA – tworzywem jest polilaktyd (kwas polimlekowy) pozyskiwany ze sfermentowanej skrobi roślinnej.

Zalety: nietoksyczny, biodegradowalny, niepalny, niskotopliwy (od 180°C) – łatwość druku.

Wady: łamliwość, niska odporność mechaniczna i termiczna

ABS - akrylonitrylo-butadieno-styren.

Zalety: zdecydowanie lepsza od PLA wytrzymałość mechaniczna i termiczna. Umożliwia obróbkę mechaniczną. Odporność na niskie temperatury rzędu -20 °C.

Wady: Wyższa temperatura druku, trudniej się drukuje i jest droższy

TPU - produkowany na bazie termoplastycznego poliuretanu. Elementy po wydrukowaniu mają elastyczność i sprężystość gumy.

Zalety: odporność na ścieranie i działanie chemikaliów, dobre tłumienie drgań, wibracji oraz wstrząsów; tworzywo długowieczne ale podatne na recykling

Wady: koszt produkcji, nie nadaje się do druku elementów sztywnych

PETG - politereftalan etylenu.

Zalety: odporność na zarysowania, wysoka sztywność, gładkość powierzchni, brak tendencji do skurczu, uniwersalność.



107

HIPS – produkowane z wysoko uderowego polistyrenu.

Zalety/Wady: łatwo rozpuszczalny w dedykowanych rozpuszczalnikach, biodegradowalny. Stosowany do drukowania podpór dla skomplikowanych wydruków z innych tworzyw

ASA – akrylonitryl-styren-akrylan.

Zalety: Odporność na UV i warunki środowiskowe

Wady: trudność druku, cena

Nylon – tworzywo poliamidowe

Zalety: bardzo dobra wytrzymałość mechaniczna, elastyczność i trwałość.

Wady: cena, trudniejszy w obróbce niż większość filamentów, wymaga suchego i chłodnego miejsca do przechowywania

108

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

109

	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, udary i chemikalia, wrażliwy na światło i promieniowanie UV - nadkola, przyciski, obudowy (komputery i monitory, RTV, AGD, telefony), części mebli, zabawki, rurociągi termoplastyczne

110

Oznakowania innych materiałów

substancje groźne dla środowiska, chemicznie aktywne i trujące

	baterie (ogniwa) ołowiono-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) srebrno-cynkowe (Silver-Oxide-Zinc)
	baterie (ogniwa) węglowo-cynkowe (Carbon-Zinc)
	baterie (ogniwa) alkaliczne (Alkaline) - czasami oznaczane cyfrą 9

111

Materiały celulozowe

 C PAP	 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)
		inny papier, mieszany, tektura - prasa, poczta, ulotki, papier piśmienny
		papier i tektura powlekane (PBD - PaperBoarD, inny skrót to PPB) - widokówki, opakowania mrożonek, okładki

112

Metale i szkła i inne	
	żelazo i stal blacha stalowa (FErrum) lub blacha stalowa ocynkowana
 	ALUminium
 	50 drewno (FORest), 51 korek
	bawełna
 ... 	różne materiały tekstylne
 ... 	szkła: 70 mieszane, 71 przeźroczyste, 72 zielone, 73 brązowe, 74 beżowe, 75 niskootłowiowe, 76 ołowiowe, 77 miedziowane, 78 srebrzone, 79 złożone
	papier (PAP) PET (Politereftalan ETylenu)
	papier (Pap) powlekany aluminium (Al)

113

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

114

kompozyty metamateriały

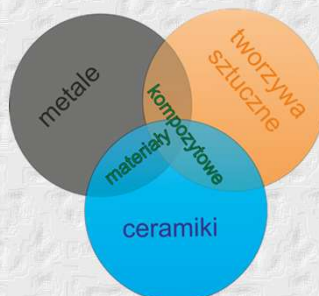
1

Kompozyty (materiały kompozytowe)

(łac. *compositus* = złożony) - materiał zbudowany z co najmniej dwóch różnych składników połączonych na poziomie makroskopowym w celu uzyskania materiału o nowych właściwościach

Właściwości kompozytu zależą od

- właściwości faz składowych
- udziału objętościowego faz
- sposobu rozmieszczenia fazy rozproszonej w osnowie
- cech geometrycznych fazy rozproszonej



2

Materiały kompozytowe znane są od starożytności

W XIII w. p.n.e. budowano domy z bloków z mieszanki błotnej wzmocnionej słomą i końską sierścią

Od co najmniej V w. p.n.e. znane były materiały otrzymywane przez przesycanie wielu cienkich warstw papieru i tkanin chińską laką

Ok. 3600 lat p.n.e.) Egipcjanie znali drewnianą sklejkę

W średniowieczu konstruowano zbroje i miecze łącząc różne metale i drewno

1942 r. PYKRET – mieszanka lodu i drewna

Obecnie najbardziej rozpowszechnione są drewniane sklejki, płyty wiórowe, paździerzowe, gipsowo-kartonowe, beton zbrojony itp.

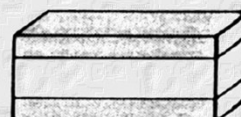
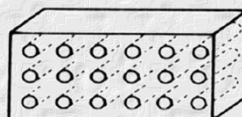
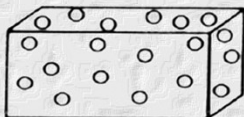
3

Kompozyty składają się z minimum 2 faz:

- ciągłej tzw. osnowy lub matrycy
- rozproszonej tzw. osnowy lub zbrojenia

Ze względu na postać fazy rozproszonej kompozyty dzielą się na:

- ziarniste
- włókniste
- warstwowe



Podstawowe cechy kompozytów:

- dobre właściwości mechaniczne,
- wysoka wytrzymałość na różne czynniki,
- mały ciężar właściwy,
- możliwość uzyskiwania określonych cech – nieosiągalnych przez inne materiały

4

Rola osnowy

- utrzymywanie zbrojenia w określonym położeniu
- zapewnienie wytrzymałości na ściskanie
- przenoszenie naprężeń zewnętrznych na zbrojenie,
- zatrzymywanie rozprzestrzeniania się pęknięć,
- nadawanie wyrobom pożądanego kształtu

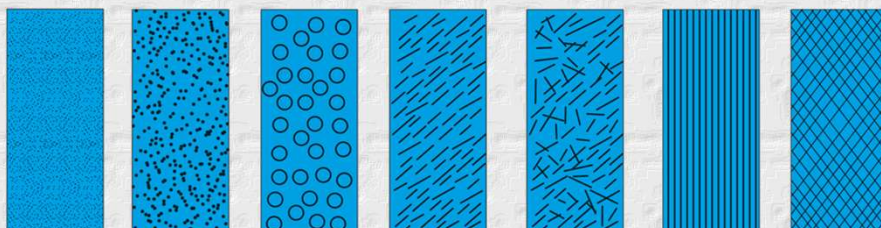


Jako osnowę najczęściej wykorzystuje się:

- polimery poliepoksydowe i poliestrowe
- metale Ti, Ni, Fe, Al, Cu lub ich stopy
- ceramikę Al_2O_3 , SiO_2 , SiC, TiO_2

5

- Zadaniem zbrojenia jest wzmacnianie materiału i poprawianie jego właściwości mechanicznych.
- Zbrojenie może mieć postać:
 - włókien ciągłych lub nieciągłych
 - rurek
 - prętów
 - granulatu
 - proszku
 - in.
- Zbrojenie może być
- zorientowane lub niezorientowane
- izotropowe anizotropowe



6

Podział kompozytów

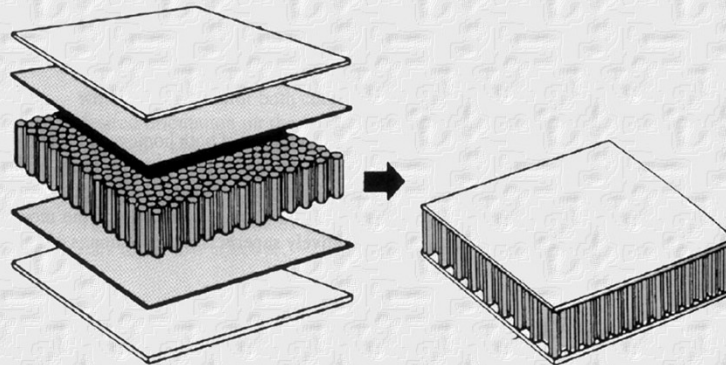
- pochodzenie (naturalne, sztuczne)
- przeznaczenie
- rodzaj osnowy
- rodzaj zbrojenia



7

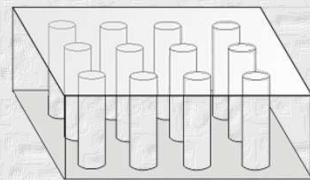
Kompozyty warstwowe

- Dwie wytrzymałe warstwy zewnętrzne rozdzielone warstwą słabszego i mniej gęstego materiału (tzw. rdzenia).
- Rolą rdzenia jest przeciwdziałać deformacjom spowodowanym siłą prostopadłą do powierzchni zewnętrznych. Często rdzeń ma strukturę plastra miodu.



8

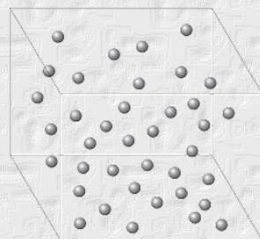
W 1986 r. Newnham przedstawił podział kompozytów na podklasy zależnie od ich struktury wewnętrznej wprowadzając oznaczenia 1-3, 0-3, 2-2 itd. odnoszące się do wymiarów zbrojenia i osnowy; np 1-3 oznacza jednowymiarowe włókna (ważna jest tylko ich długość) w trójwymiarowej osnowie.



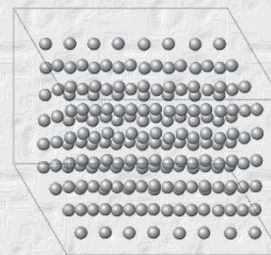
1-3



2-2



0-3



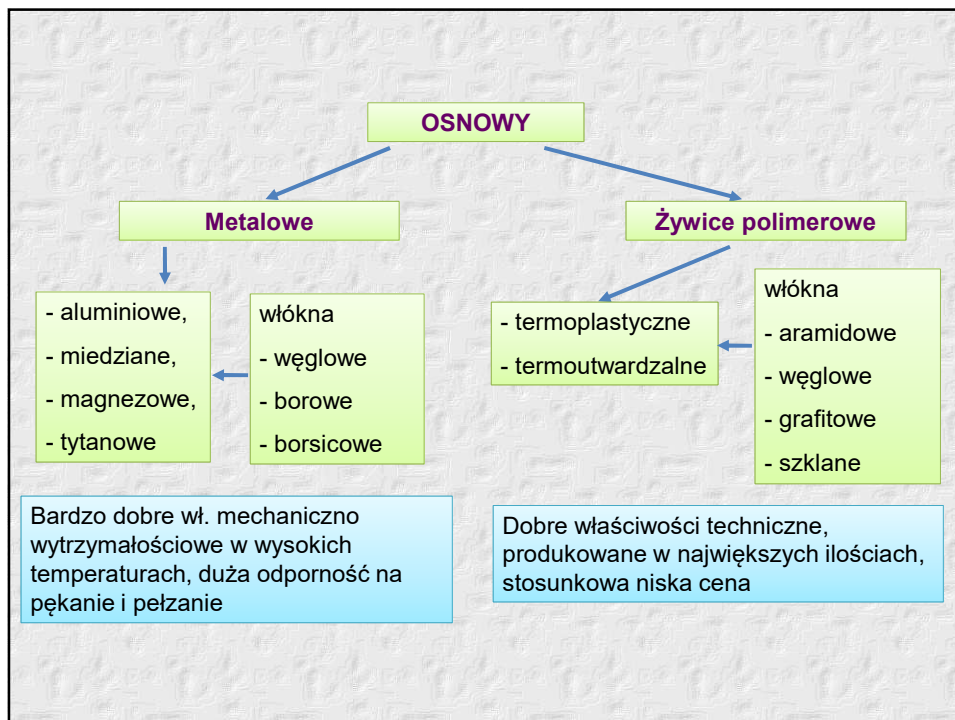
3-3

9

Typowe technologie wytwarzania

- Kompozyty cząsteczkowe – technikami metalurgii proszków,
- Kompozyty włókniste
 - przeróbka plastyczna (walcowanie, wyciskanie, prasowanie)
 - metody z ciekłą osnową (infiltracja ciekłych metali do porowatych kształtek)
- Ogólne metody wytwarzania kompozytów
 - kontaktowe
 - natryskowe
 - nawijanie włókien
 - taśmowe
 - itp.

10



11

Włókna

Charakteryzuje je duża sztywność i wytrzymałość, wielokrotnie większa od wartości odpowiednich charakterystyk dla materiału w postaci masowej (np. wytrzymałość na rozciąganie typowych stali jest rzędu 0,2-0,7 GPa, zaś wytrzymałość cienkich włókien stalowych wynosi ok. 4 GPa).

- **szklane** - najstarsze, najtańsze i najczęściej stosowane, 2 typy E(gorsze wł. mechaniczne), S (zastosowanie militarne)
- **grafitowe** – lepsze od szklanych ale droższe. Posiadają dobrze wykształconą i zorientowaną strukturę. Typy: wysokowytrzymałe, wysokomodułowe i ultrawysokomodułowe
- **węglowe** – podobne do grafitowych ale mniej uporządkowana struktura, obszary o zaburzonej strukturze krystalicznej
- **aramidowe** - zbudowane z poliamidów włóknotwórczych z grupami aromatycznymi w głównych łańcuchach polimeru. Im więcej w strukturze grup aromatycznych, tym większa odporność mechaniczna i termiczna (najbardziej znany jest KEVLAR = poli(fenyleno-1,4-diamid))
- **organiczne** – bawełna, juta, sisal po wynalezieniu włókien aramidowych stosowane na szeroką skalę w sprzęcie sportowym (nazwy Nomax, Kevlar)

12

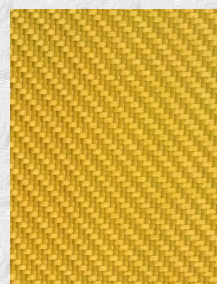
Własności wybranych żywic

żywica		parametry		
typ	rodzaj	ρ [kN/m ³]	E [GPa]	R [MPa]
TU	epoksydowa (Narmco, Vicotex)	10,8-13,7	2,1-5,5	40-85
TU	poliestrowa (Polimal)	10,8-13,7	1,3-4,1	40-85
TU	fenolowa	11,8-13,7	2,7-4,1	35-60
TP	nylonowa	10,8	1,3-3,5	55-90
TP	poliwęglanowa	11,8	2,1-3,5	55-70
TP	polietylenowa	8,8-9,8	0,7-1,4	20-35

13

Własności wybranych włókien w porównaniu ze stalą

	szklane E	szklane S	grafitowe	Kevlar 49	boron	stal
średnica w [μ m]	16	16	7-8	12	100-200	
ciężar właściwy ρ [kN/m ³]	25-25,5	24,5	13,8-18,6	14,1	25,5	78,5
wytrzymałość na rozciąganie S [GPa]	1,7-3,5	2,5-4,8	1,7-2,8	2,3-3,6	3,5	~ 4
wytrzymałość właściwa S/ρ [km]	68-136	103-197	123-163	161-257	135	51
moduł Younga E [GPa]	72	86	230-250	120-124	400-410	200
moduł właściwy E/ρ [km $\cdot$ 10 ³]	2,8	3,5	12,4-18,1	8,5-8,8	16	2,6



14

Laminaty

Laminatami nazywane są kompozyty złożone z dwóch materiałów o różnych właściwościach mechanicznych, fizycznych i technologicznych, w których zbrojenie jest układane w postaci warstw (*łac. lamina – cienka blaszka, płytka*)

Rolę osnowy pełni warstwa adhezyjna.

Warstwy wzmocnienia mogą być w postaci włókien ciągłych ułożonych jednokierunkowo (tzw. rovingu), tkanin lub mat z włókna ciętego.

Laminat, ze względu na swoją strukturę, ma dobrą wytrzymałość w kierunku włókien, ale dużo słabszą w kierunku prostopadłym do warstw.

Typowym naturalnym laminatem jest drewno, w którym wytrzymałe i sprężyste, choć wiotkie włókna celulozowe są spajane w sztywne i odporne tworzywo przez ligninę (drzewnik) o wiele mniej wytrzymałą mechanicznie od celulozy.

Jednym z najpopularniejszych laminatów jest sklejka drewniana.



15

Laminaty znane i wytwarzane są od tysięcy lat. Do najstarszych (ok. V w. p. n.e.) należą laminaty na bazie chińskiej laki (sok z sumaka). Powstawały one zwykle poprzez przesycanie laką wielu cienkich warstw papieru lub tkanin.

Ze względu na pracochłonność laminaty te były stosowane do produkcji ozdób rzadko do wykonywanie elementów uzbrojenia.

Pierwsze laminaty przemysłowe (początek XX w.) wytwarzane były poprzez prasowanie w wysokiej temperaturze warstw płótna (bawełnianego, konopnego ew. jedwabnego) nasyconego termoutwardzalną żywicą fenoloformaldehydową.

Tworzywo to zwane **bakelitem** znalazło liczne zastosowania w elektrotechnice jednak z uwagi na ciężar i koszty wytwarzania obecnie zostało wyparte przez laminaty nowszej generacji oraz tworzywa sztuczne.



16

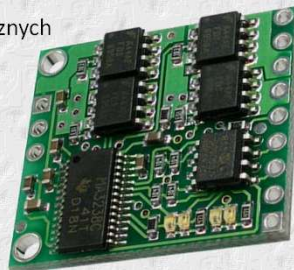
Laminaty na PCB

PCB ([ang.](#) Printed Circuit Board)

- płyta z połączeniami do montażu podzespołów elektronicznych

Do celów elektronicznych stosuje się najczęściej laminaty:

celulozowo – fenolowy
celulozowo – epoksydowy
szklano – epoksydowy
szklano – fenolowy
szklano – teflonowy
ceramiczne



Laminaty te produkuje się w wielu odmianach i grubościach **0,8...3,2** mm na jedno- i dwuwarstwowe płytki oraz o grubości **0,1...0,76** mm na obwody wielowarstwowe.

Grubość warstwy metalicznej jest również zróżnicowana i wynosi **0,018...0,105** mm.

Do najtańszych i najbardziej rozpowszechnionych należy laminat o osnowie celulozowej (papierowej) nasyczonej żywicą fenolową (celulozowo – fenolowy). Ze względu na swoje właściwości dielektryczne i technologiczne jest głównie stosowany w sprzęcie powszechnego użytku. Wykazuje dużą odporność na wilgoć

17

Laminat o osnowie celulozowej (papierowej) nasyczonej żywicą epoksydową ma dobre właściwości mechaniczne i elektryczne, nadaje się do wykrawania w temperaturze pokojowej. Jest trudno palny.

Laminat o osnowie z włókien szklanych nasyczonej żywicą epoksydową ma znacznie lepsze właściwości dielektryczne i mechaniczne od poprzedniego, lecz jednocześnie jest kosztowniejszy. Stosuje się go w sprzęcie profesjonalnym.

Laminat o osnowie z włókien szklanych nasyczonej żywicą fenolową odznacza się dużą wytrzymałością na zginanie oraz dużą stabilnością wymiarową.

Laminat o osnowie z włókien szklanych związanych z teflonem jest ze względu na swe właściwości, zwłaszcza małą stratnością elektryczną, stosowany w obwodach mikrofalowych.

Laminaty ceramiczne mają zastosowania specjalne zwłaszcza w technice mikrofal

Stosuje się również laminaty elastyczne, które stwarzają korzystne warunki dobrego upakowania elementów w obudowie oraz możliwość łatwej zmiany ich położenia. Laminaty elastyczne składają się wyłącznie z cienkiej folii metalowej związanej z elastyczną folią teflonową, poliamidową i poliestrową.



18

FR-4

Materiał ten ma postać wzmacnianego włóknem szklanym laminatu epoksydowego i jest bardzo popularnym i wszechstronnym termoutwardzalnym tworzywem sztucznym wysokiej jakości.

Produkowany jest zazwyczaj w formie arkuszy, rur lub prętów.

Charakteryzuje się wysoką wytrzymałością mechaniczną, temperaturową i chemiczną przy jednocześnie niskiej gęstości, znikomej nasiąkliwości wodą, dobrymi właściwościami elektroizolacyjnymi zarówno w warunkach suchych jak i wilgotnych.

Żywica epoksydowa wzbogacana jest związkami bromu i chloru dzięki czemu uzyskuje ogniotrwałość (samogaśnięcie).

Cechy te powodują, że materiał ten jest stosowany do szerokiej gamy zastosowań elektrycznych i mechanicznych.

Dla potrzeb elektroniki laminat pokrywa się jedno- lub obustronnie cienką warstwą miedzi (folia miedziana).

19

FR-4 - podstawowe parametry

Parametr	wartość
gęstość	1,850 g/cm ³
absorpcja wody	< 0.10%
temperatura pracy	140 °C
przewodność cieplna prostopadła	0,29 - 0,343 W/m·K
przewodność cieplna równoległa	0,81 – 1,059 W/m·K
twardość	110 w skali Rockwella
wytrzymałość na zginanie	> 345 MPa
wytrzymałość na rozciągani	> 310 MPa
wytrzymałość na ściskanie	> 415 MPa
wytrzymałość na udary	> 44 J/m
wytrzymałość na przebicie elektryczne	> 50 kV
wytrzymałość dielektryczna	20 MV/m
względna przenikalność elektryczna	4,8, 4,35 na 500 MHz, 4,34 na 1 GHz
stratność	0,017
moduł Younga	21-24 GPa
wsp. rozszerzalności cieplnej	$\alpha=1,4 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $\gamma=1,2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$, $z=7 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
wsp. Poissona	0,118 – 0,136
prędkość dźwięku	3369-3902 m/s
impedancja akustyczna	6,64 MRayl

20

W celu uzyskania systemu połączeń folia miedziana, którą pokryte są laminaty poddawana jest najczęściej trawieniu selektywnemu, które polega na chemicznym usunięciu miedzi z obszarów, gdzie jest ona zbędna, czyli z miejsc położonych między ścieżkami przewodzącymi.

Obok trawienia stosowane jest także wycinanie, frezowanie lub odparowanie miedzi przy zastosowaniu wiązki lasera.

Jeśli płytka ma więcej warstw konieczna staje się realizacja połączeń międzywarstwowych

Istnieją co najmniej trzy metody

połączenia mostkowe są kłopotliwe technologicznie, gdyż można ich wykonać w całej płytce zaledwie kilka, zwiększenie zaś liczby mostków komplikuje układ i utrudnia montaż elementów dyskretnych.

połączenia nitowane wymagają stosowania specjalnych urządzeń, a jakość uzyskanych połączeń jest stosunkowo niska ze względu na zawodność ich działania, zwłaszcza w warunkach zmiennej temperatury lub korozyjnego działania środowiska.

metalizowanie otworów jest pod względem technologicznym w produkcji wielkoseryjnej i pod względem niezawodności sposobem najlepszym.

21

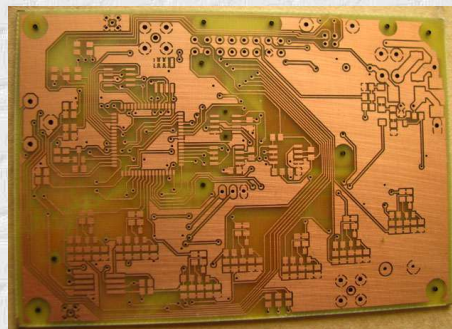
Są dwa rodzaje metalizacji: **kompleksowa** oraz **selektywna**

W metodzie kompleksowej po metalizacji chemicznej następuje metalizacja elektrochemiczna miedzią po czym kopiowany jest negatyw połączeń drukowanych.

W metodzie metalizacji selektywnej najpierw kopiowany jest negatyw połączeń drukowanych, a następnie metalizacja elektrochemiczna miedzią

Dalsze operacje w ww. metodach mają tę samą kolejność:

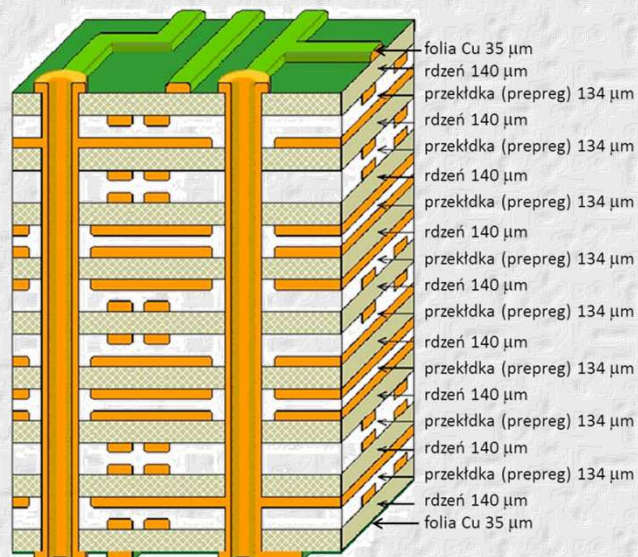
- metalizacja elektrochemiczna stopem Sn-Pb
- usuwanie emulsji ochronnej
- trawienie miedzi



22

PCB wielowarstwowe

Jeśli liczba połączeń jest tak duża, że nie mieszczą się one na jednej lub nawet dwóch powierzchniach laminatu stosuje się laminaty wielowarstwowe

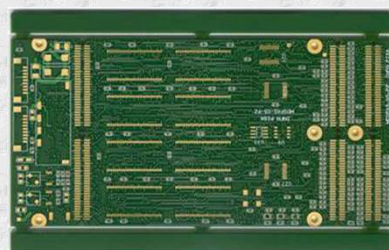
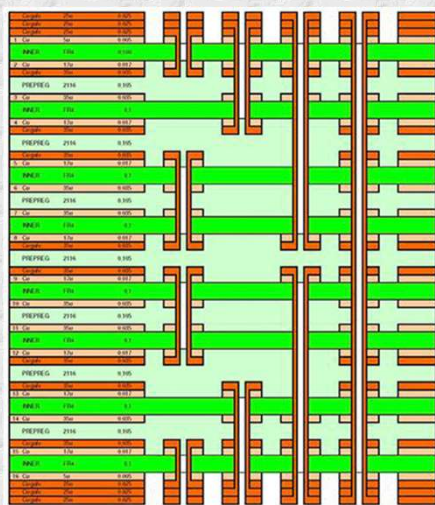


23

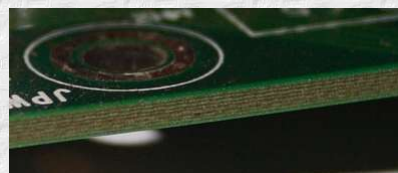
Osiągana obecnie liczba warstw sięga 64

Technologia 16 warstwowa na bazie FR-4

Cu 0,12 mm; izolacja 0,12 mm, otwory 0,2 mm, laminat 2,2 mm

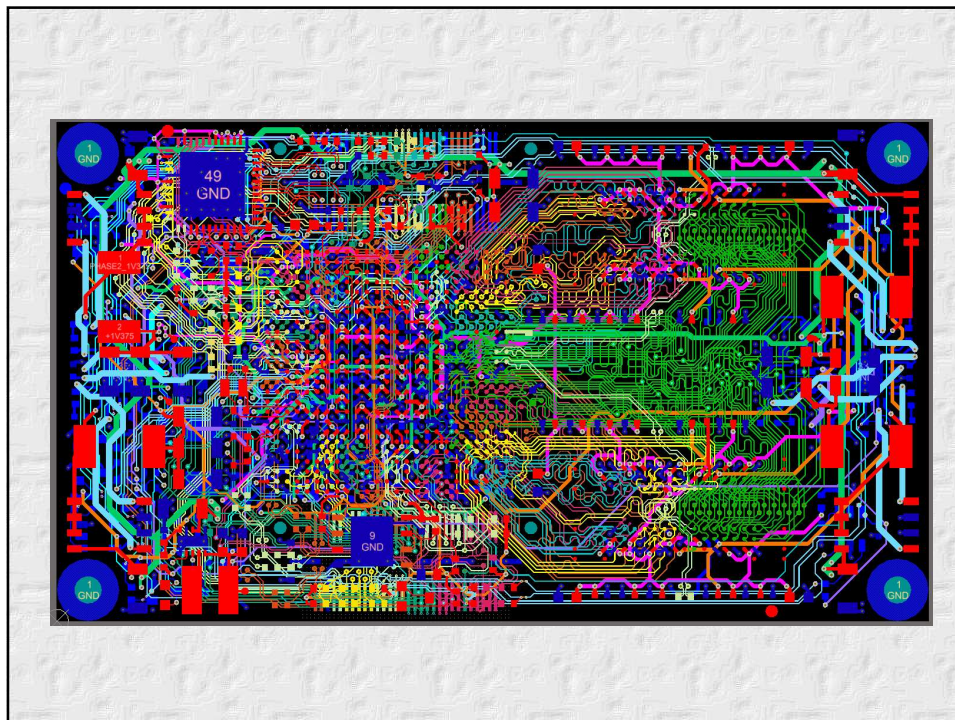


W warstwach pośrednich obok połączeń mogą być także montowane elementy.

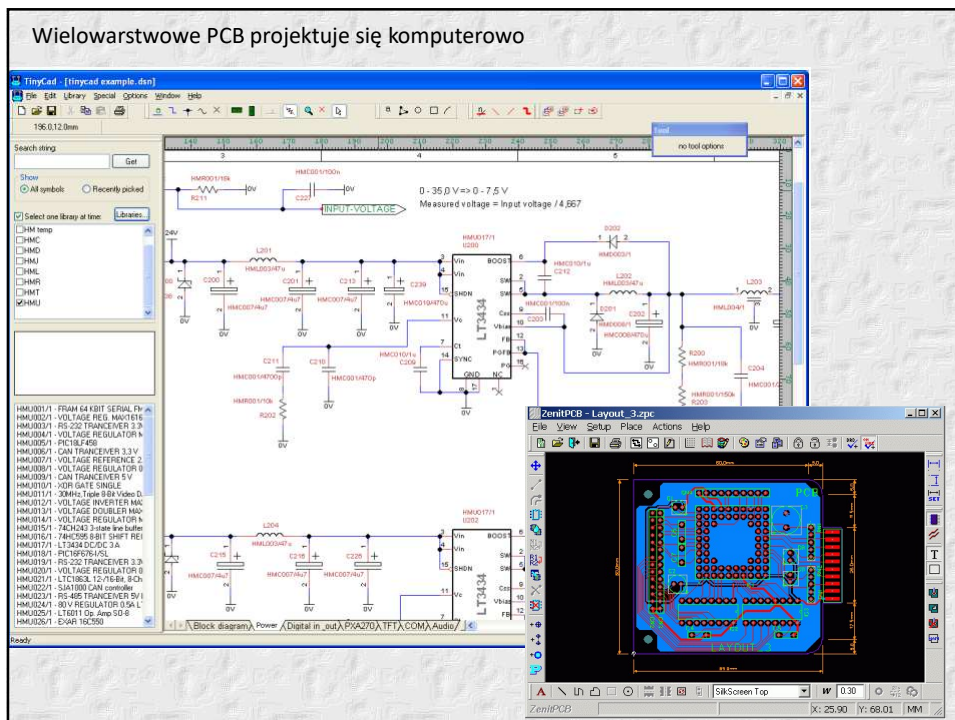


Warstwy widać dopiero w powiększeniu

24



25

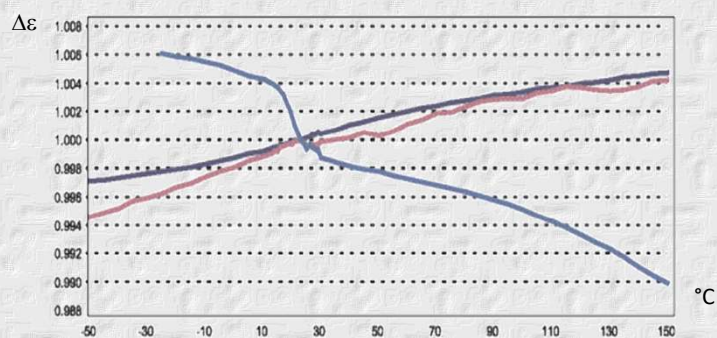


26

Laminaty epoksydowo szklane, zależnie od jakości, mogą być wykorzystywane do częstotliwości rzędu kilku GHz.

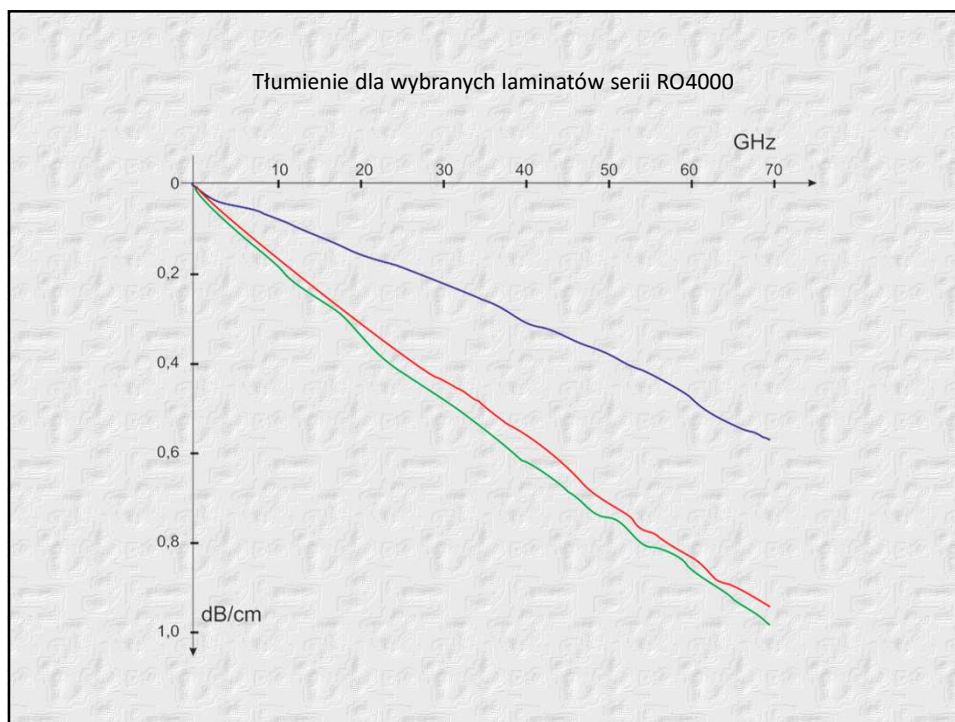
Dla częstotliwości wyższych stosuje się laminaty specjalne, które charakteryzują się stabilnością temperaturową oraz niskimi stratami.

Do najpopularniejszych należą laminaty o handlowych nazwach Duroid i Epsilam oraz różnego rodzaju laminaty ceramiczne.



zmiana przenikalności elektrycznej w funkcji temperatury dla trzech wybranych ceramicznych materiałów mikrofalowych

27



28

Zestawienie podstawowych własności różnych typów laminatów [1]

typ laminatu	maks. temp. pracy	ϵ_r	$\text{tg}\delta$ przy 1 kHz	absorpcja wody [%] po 24h	wsp. rozszerzalności cieplnej [10^{-6} /K]	zastosowanie
fenolowo-papierowy	120	4,8	0,04	0,65 - 1	25	tania elektronika użytkowa
szklano-epoksydowy	155	5,4	0,035	0,15	16	elektronika półprofesjonalna
szklano-poliestrowy	130	4,3	0,015	0,18	-	elektronika profesjonalna
aramidowo-epoksydowy	125	4,0	-	0,85	4,0	technika mikrofal
szklano-teflonowy (Duroid)	200	2,6	0,001	0,1-1,0	16,5	technika mikrofal
teflonowo-ceramiczny (Epsilam)	280	10,2	0,002	0,5-2,0	25	technika mikrofal

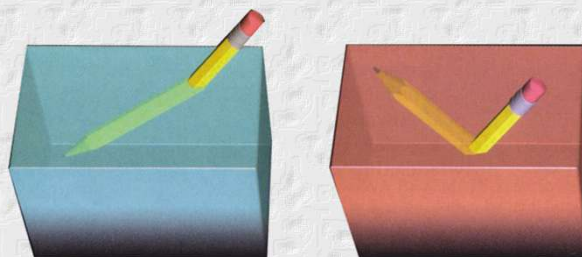
29

Metamateriały

Materiały, których własności zależą od ich struktury w skali większej niż cząsteczkowa.

Mają one szczególne znaczenie w optyce, fotonice i technice mikrofal gdzie ich własności umożliwiają wytwarzanie nieklasycznych typów soczewek, anten, modulatorów i filtrów.

Materiały takie mogą pozwalać na uzyskanie lewoskrętności bądź ujemnego współczynnika załamania



30

Metamateriał zbudowany jest zwykle z regularnej sieci przewodników i rezonatorów o rozmiarach mniejszych niż długość fali elektromagnetycznej, która propagować się ma w tym ośrodku.

