

Materialy przewodowe

Metale i stopy jako składniki materiałów przewodzących

Miedź Cu

- czerwona barwa i metaliczny połysk (czysta powierzchnia)
- gęstość = $8,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- $\gamma = 59,77 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ Cu chemicznie czysta
- $\gamma = 58 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ Cu elektrolityczna 99,9 % (przewody elektryczne)
- $R_m = 200\dots400 \text{ MPa}$, zależnie od utwardzenia przez zgniot
- trudna obróbka przez skrawanie (rzadko stosowana)
- bardzo trudne odlewanie (nie wykonuje się odlewów z Cu)
- bardzo łatwa obróbka plastyczna na zimno i na gorąco przez:
walcowanie, prasowanie, kucie, wyciskanie i przeciąganie

- znaczna odporność na korozję w normalnej atmosferze
- w obecności CO_2 i wilgoci pokrywa się patyną (związkiem węgla i wodorotlenku miedzi)
- siarka i jej związki, tlenki azotu, chlor i amoniak, powodują szybką korozję miedzi

półprodukty z Cu:

- grube druty (pręty) wytwarza się przez wyciskanie gorącej miedzi przez specjalny otwór w grubościennym zbiorniku
- cienkie druty wykonuje się z pręta o średnicy ok. 6 mm przeciągając go na zimno przez kalibrowane oczka przeciągarki
- w procesie przeciągania miedź utwardza się
- zwiększa się wytrzymałość mechaniczna, twardość i kruchość
- maleje przewodność
- wyżarzanie rekrytalizujące w temperaturze ok. 500 °C

Stopy miedzi

- dwa podstawowe rodzaje: mosiądze i brązy
- zawartość Cu w stopach przekracza 50 %
- w mosiādzach główną domieszką jest cynk Zn
- w brązach zawartość Zn jest mniejsza od innych składników
- konduktywność stopów miedzi jest mniejsza od czystej Cu
- mosiądze i brązy są lepsze od Cu od względem:
 - wytrzymałości mechanicznej
 - sprężystości
 - współczynnika tarcia
 - odporności na czynniki środowiska
 - możliwości obróbki skrawaniem

Aluminium Al

- barwa srebrzystobiała (przed utlenieniem)
- gęstość = $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- $\gamma = 38,2 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ Al chemicznie czyste
- $\gamma = 35 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ Al elektrolityczne 99,5 % (przewody elektryczne)
- $R_m = 70\dots 170 \text{ MPa}$, zależnie od utwardzenia przez zgniot
- duża odporność na korozję
- pokrywa się samorzutnie spoistą ok. $0,5 \mu\text{m}$ warstewką izolacyjną AlOOH i Al_2O_3 chroniącą skutecznie przed dalszym utlenianiem
- duża odporność na kwas azotowy i kwasy organiczne
- brak odporności na kwas solny i fluorowodorowy oraz na wodorotlenki sodu i potasu

druty z aluminium

- przeciąganie na zimno przez oczka przeciągarki
- aluminium utwardza się
- zmniejszenie jego konduktywności
- wyżarzanie rekrytalizujące w temperaturze 300 do 350 °C

Stopy aluminium

- elementy konstrukcyjne aparatów i urządzeń elektrycznych
- najczęściej stosowane duraluminium AlCu3Mg1 i silumin AlSi9
- duża wytrzymałość mechaniczna przy niewielkiej gęstości
- duraluminium - obróbka plastyczna
- silumin - odlewanie

Cyna Sn

- barwa srebrzystobiała (trwały połysk)
- gęstość = $7,28 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- temperatura topnienia = $232 \text{ }^\circ\text{C}$
- niewielka wytrzymałość mechaniczna
- odporna na działanie powietrza, wody, słabych kwasów i zasad
- stosuje się jako dodatek stopowy i jako składnik lutów miękkich

Cynk Zn

- barwa srebrzysta o niebieskawym odcieniu
- gęstość = $7,14 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- temperatura topnienia = $419,5 \text{ }^\circ\text{C}$
- odporny na działanie czynników atmosferycznych dzięki cienkiej warstwie zasadowego węglanu cynku $\text{Zn}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$
- zastosowanie:
 - składnik stopów, głównie mosiądzu
 - na pokrycia antykorozyjne m.in. elementów stalowych

Wolfram W

- barwa stalowoszara
- gęstość = $19,29 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- temperatura topnienia = $3410 \text{ }^\circ\text{C}$
- bardzo twardy i trudno obrabialny
- odporny na czynniki atmosferyczne, kwasy i zasady
- utlenia się w temperaturze powyżej $400 \text{ }^\circ\text{C}$
- $R_m = 1200\text{...}4200 \text{ MPa}$ (zależnie od stopnia utwardzenia)
- wytwarza się przez spiekanie jego proszku w atmosferze ochronnej i temperaturze niższej od temperatury topnienia
- zastosowanie:
 - żarniki żarówek
 - elektrody lamp fluorescencyjnych
 - rezystory grzejne
 - styki łączników dużych mocy

Molibden Mo

- własności zbliżone do wolframu
- bardziej miękki
- gęstość = $10,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$
- temperatura topnienia = $2622 \text{ }^\circ\text{C}$
- zastosowanie
 - głównie jako składnik stopów, a właściwie spieków
 - w elektrotechnice: elementy żaroodporne i styki łukoodporne

Materiały na przewody i połączenia przewodzące

Wymagania:

- możliwie mała wartość rezystywności
- duża wytrzymałość mechaniczna
- duża wartość przewodności cieplnej
- wysoka dopuszczalna temperatura pracy
- możliwie mała aktywność chemiczna
- odporność na korozję
- możliwość łączenia przez lutowanie, zgrzewanie lub spawanie
- niskie koszty pozyskiwania surowców
- łatwa technologia wytwarzania przewodów i połączeń przewodzących
- materiały przewodowe mogą pełnić rolę „akumulatora ładunku elektrycznego” (okładziny kondensatorów)
- oraz rolę elementu kontaktowego (połączenia nierozłączalne)

Materiały na przewody elektroenergetyczne gołe

- przewody gołe - głównie w liniach napowietrznych WN
- podstawowy materiał: aluminium
- przy tej samej oporności przewód z Al w porównaniu do przewodu z Cu ma większy przekrój o prawie 70 %, ale jego ciężar jest dwukrotnie mniejszy
- stare linie niskiego napięcia: linki z twardego Al
- linie wysokiego napięcia: linki stalowo-aluminiowe
- rdzeń przewodu: linka z drutów stalowych ocynkowanych
- warstwa przewodząca: druty z Al twardego
- linie wysokiego napięcia: linki z tzw. aldreju
- stop Al z Mg (ok. 0,4 %), Si (ok. 0,5 %) i Fe (ok. 0,3 %)
- własności aldreju: $\gamma = 30 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$ $R_m = 350 \text{ MPa}$
- linie wysokiego napięcia: linki wykonane z drutów stalowych, na których wytłoczono grubą, hermetyczną warstwę aluminium

Materiały na żyły przewodów elektroenergetycznych izolowanych

- przewody izolowane:
 - przewody jednożyłowe i wielożyłowe
 - przewody kabelkowe i kable elektroenergetyczne
 - przewody izolowane linii napowietrznych
- żyły przewodów izolowanych:
 - najczęściej z miedzi miękkiej
 - rzadziej z aluminium półtwardego
 - w nielicznych przypadkach ze stopów miedzi
- wykonanie żył:
 - drut okrągły (gdy przekrój nie przekracza 10 mm^2)
 - linka z drutów okrągłych
 - linka z drutów profilowanych

Materiały na druty nawojowe

- uzwojenia transformatorów, maszyn elektrycznych, dławików, elektromagnesów, cewek
- druty nawojowe miedziane pokryte cienką warstwą izolacji
- druty cienkie (setne części milimetra): Cu półtwarda
- druty o większych średnicach: Cu miękka
- cienkie druty nawojowe są zwykle okrągłe
- grube druty - przekroje zbliżone do prostokątnych (lepsze wypełnienie cewki miedzią, łatwiejsze nawijanie)

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

- najczęściej stosowane:
 - przewody drutowe
 - przewody foliowe (folia przewodząca na laminacie izolacyjnym – obwody drukowane)
- najlepszy materiał: Cu 99,9 $\gamma \geq 58,4 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$
- ochrona przed utlenianiem: powlekanie przewodów miedzianych
 - cyną Sn do 150 °C
 - srebrem Ag do 200 °C
 - niklem Ni do 260 °C
- zwiększenie wytrzymałości mechanicznej (na zginanie i drgania) przez dodanie do miedzi niewielkiej ilości (do 1 %) najczęściej:
 - srebra (Cu-Ag)
 - kadmu (Cu-Cd)
 - chromu (Cu-Cr)

Materiały na połączenia w układach elektronicznych scalonych hybrydowych grubowarstwowych

Materiały na elementy przewodzące:

- srebro Ag, stop Ag-Pd, złoto Au, platyna Pt, stop Au-Pt
- w warstwach lutowalnych Au w niewielkich ilościach

Technologia układów scalonych grubowarstwowych:

- podłoże: płytka z ceramiki alundowej (Al_2O_3 powyżej 96 %)
- nanoszenie past zawierających drobnoziarniste proszki metali lub tlenków metali oraz szkliwa niskotopliwego
- technika sitodruku
- wypalanie w piecu tunelowym
- temperatura od 500 do 1400 °C, zależnie od rodzaju warstwy

Materiały na połączenia w układach elektronicznych scalonych monolitycznych

- układ scalony monolityczny:

wszystkie elementy układu (ścieżki przewodzące, miejsca kontaktowe, rezystory, kondensatory, diody, tranzystory) wykonane z zastosowaniem tej samej technologii, np. wzmacniacze, generatory, procesory, pamięci itp.

Materiały na elementy przewodzące:

- ścieżki: najczęściej aluminium Al (dobra przyczepność do SiO_2)
- wyprowadzenia: aluminium Al, złoto Au

Technologia układów scalonych monolitycznych:

- podłoże: monokrystaliczne płytki krzemowe Si
- utlenienie powierzchni płytki Si - warstwa izolacyjna SiO_2
- naparowanie w próżni warstwy Al
- zgrzewanie wyprowadzeń Al lub Au (grubość rzędu $20 \mu\text{m}$)

Materiały na rezystory

Wymagania:

- duża rezystywność
- mały współczynnik temperaturowy rezystancji α (*TWR*)
- wysoka dopuszczalna temperatura pracy
- odporność na utlenianie
- duża wytrzymałość mechaniczna
- stabilność własności w czasie

Podział ze względu na przeznaczenie:

- rezystory precyzyjne (pomiarowe)
- rezystory techniczne (regulacyjne)
- rezystory grzejne
- rezystory w układach scalonych (precyzyjne i techniczne)

Materiały na rezystory precyzyjne

- wzorce rezystancji, rezystory w przyrządach pomiarowych
- wymagania podstawowe:
 - możliwie słaba zależność ρ od temperatury i czasu
 - mała wartość jednostkowej siły termoelektrycznej (STE) w odniesieniu do materiału przewodu (najczęściej Cu)

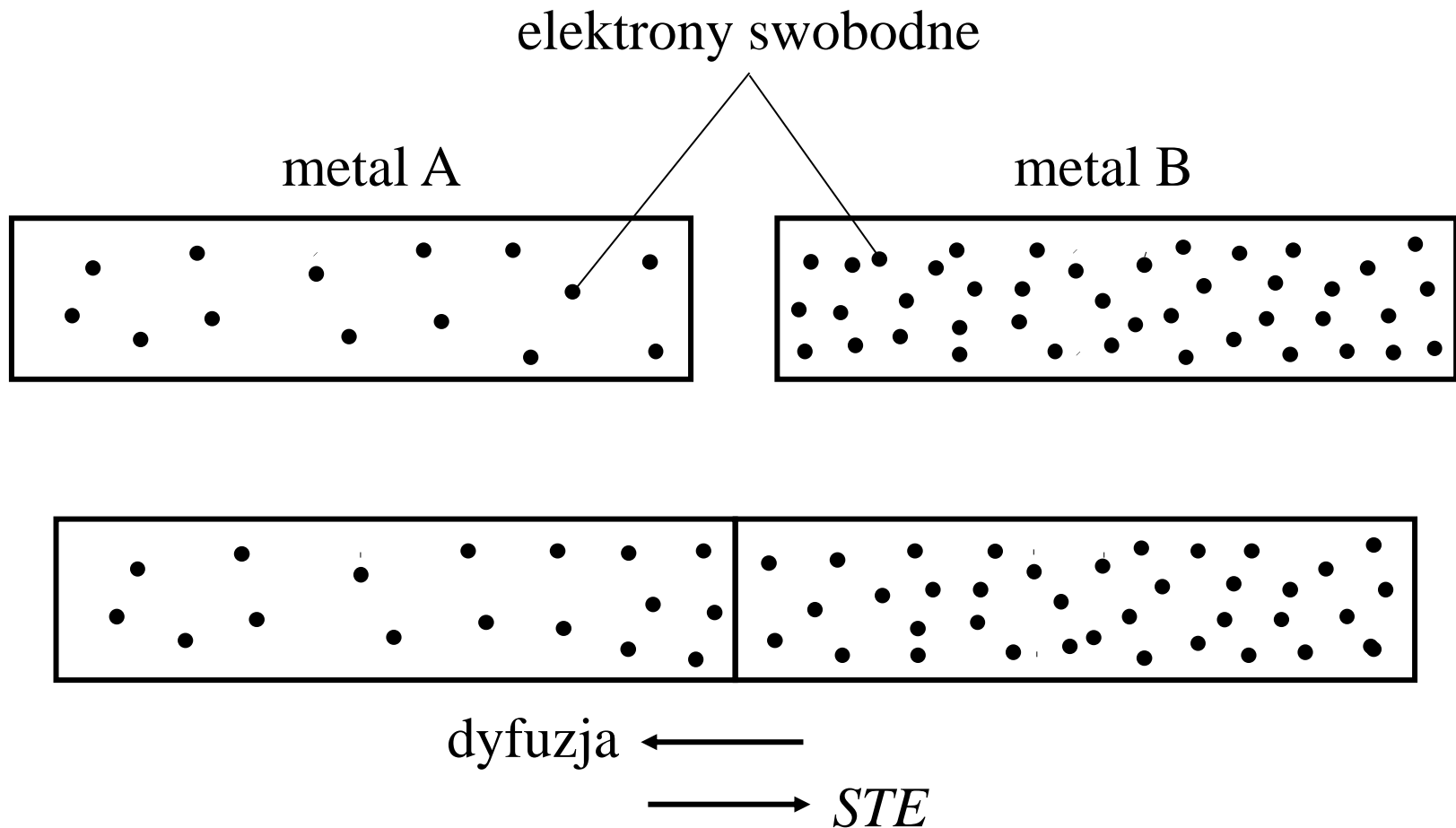
Materiały:

- głównie stopy miedzi z metalami kolorowymi i żelazem:
 - Cu₈₆Mn₁₂Ni₂ (manganin)
 - Cu₈₄Mn₁₃Al₃ (izabelin)
 - Cu_{82,5}Mn₁₂Al₄Fe_{1,5} (inmet)
 - Cu₅₅Ni₄₅ (konstantan)

Własności:

- zbliżone wartości: $\rho = 0,5 \mu\Omega\text{m}$, $\alpha = 2 \cdot 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
- $STE_{Cu} < 1 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ (manganin, izabelin, inmet)
- $STE_{Cu} = -42,6 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ (konstantan)
- dopuszczalne temperatury pracy: 250... 400 °C

Siła termoelektryczna (STE) w miejscu połączenia różnych metali lub stopów



- równowaga sił na poziomie zależnym od temperatury złącza
- wartość STE - większa, im wyższa temperatura złącza

Materiały na rezystory techniczne

- rezystory rozruchowe i regulacyjne do silników
- rezystory ograniczające prąd w układach z kondensatorami, cewkami i przyrządami półprzewodnikowymi
- Materiały:
 - w kolejności coraz większych obciążeń prądowych:
 - konstantan Cu55Ni45
 - nikielina Cu54Ni26Zn20
 - żeliwo stopowe Fe93,9Zn3,6Si1,7Mn0,8

Własności:

- rezystywność $\rho \cong 0,5 \mu\Omega\text{m}$
- nikielina: $\alpha = 2,3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$, $T_{dop} = 300 \text{ }^\circ\text{C}$
- żeliwo stopowe: $\alpha = 1 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$, $T_{dop} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$

Materiały metaliczne na rezystory grzejne

- urządzenia elektrotermiczne przemysłowe (piece, suszarki)
- urządzenia i przyrządy ogólnego użytku (grzałki, grzejniki, żelazka, kuchnie elektryczne, lutownice itp.)
- wymagania podstawowe:
 - możliwie wysoka dopuszczalna temperatura pracy ciągłej
 - odporność na korozję - trwała warstwa tlenków

Materiały:

- nichromy:
 - chromonikielina bezzelazowa Ni80Cr20 1,1 $\mu\Omega\text{m}$ 1150 °C
- ferronichromy:
 - chromonikielina żelazowa Fe20Ni65Cr15 1 $\mu\Omega\text{m}$ 1150 °C
- ferrochromale:
 - kanthal Fe68Cr24Al15,5Co1,5 1,45 $\mu\Omega\text{m}$ 1375 °C
- czyste metale:
 - molibden Mo, wolfram W 1500...3000 °C (atmosfera ochronna)

Materiały niemetaliczne na rezystory grzejne

Materiały wysokotemperaturowe:

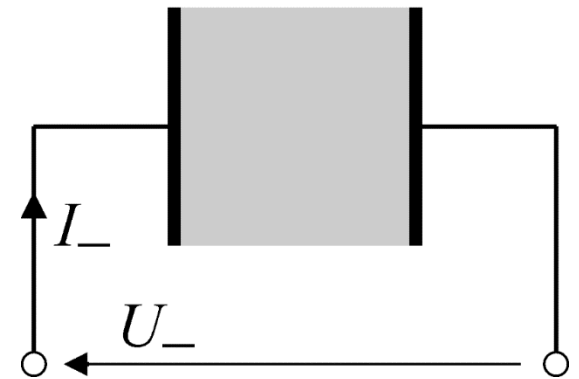
- węglik krzemu SiC $T_{dop} = 1650 \text{ }^\circ\text{C}$ pręty grzejne: silit i globar
- krzemek molibdenu MoSi₂ $T_{dop} = 1900 \text{ }^\circ\text{C}$ superkanthal, mosilit
- węglik niobu NbC (podobne własności jak superkanthal)
- węgiel, grafit C $T_{dop} = 3000 \text{ }^\circ\text{C}$ (atmosfera ochronna)

Materiały niskotemperaturowe:

- materiały organiczne (głównie kauczuki silikonowe)
napełnione sproszkowaną sadzą, grafitem lub metalem
- $T_{dop} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$

Materiały na rezystory w układach elektronicznych scalonych

- z materiałów metalicznych i niemetalicznych
- stop Cr-Ni (chromonikielina)
 - $\rho = 30 \dots 400 \Omega$ (na kwadrat powierzchni warstwy)
 - $\alpha = 10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ K}^{-1}$
 - stabilny, powtarzalne parametry
 - dobra przyczepność do podłoża
- inne stopy: np. Cr-Ti, Ta-Au
- czyste metale: np. Ti, Cr, Ta, W
- rezystory warstwowe z tlenków Sn, Sb i In, podstawowy SnO_2
 - chlorki Sn, Sb i In + H_2O , natryskiwane na podłoża ($500 \text{ }^\circ\text{C}$)
 - grubość ok. $1 \mu\text{m}$, rezystancja na kwadrat do 500Ω
 - odporne na narażenia mechaniczne i temperatury do $240 \text{ }^\circ\text{C}$
- węgiel polikrystaliczny uzyskiwany w procesie pirolizy
 - warstwy o grubości rzędu $0,01 \dots 1 \mu\text{m}$
 - rezystancja na kwadrat od kilku do kilkuset omów
 - $\alpha = -10^{-4} \text{ K}^{-1}$



- rezystory cermetowe
jednoczesne naparowanie lub napylenie katodowe na podłoże metalu (np. Cr) lub stopu (np. Ni-Cr) i składników ceramicznych (np. SiO, SiO₂)
- rezystory z drobnoziarnistych proszków metali i szkliwa
 - najczęściej stosowane pallad Pd i srebro Ag (ziarna 0,5 μm)
 - szkło ołowiowo-borowo-krzemowe (ziarna 5 μm)
 - szkło wypełnia przestrzeń między ziarnami Ag, Pd i PdO
 - średnia grubość warstwy: 25 μm
 - rezystancja na kwadrat: 1...25 kΩ
 - wartość *TWR*: rzędu 10⁻⁵...10⁻⁴ K⁻¹.
- rezystory kompozytowe
 - składnik przewodzący: węgiel w postaci sadzy lub grafitu
 - składnik wiążący: żywice termoutwardzalne (fenolowo-formaldehydowe, silikonowe, epoksydowe)
 - wypełniacz polepszający rozmieszczenie ziaren węglowych (talk, mączka mikowa, dwutlenek tytanu)
 - duża wartość rezystancji, nawet do 10¹² Ω
 - rezystancja na kwadrat: 1...25 kΩ