Metale i stopy jako składniki materiałów przewodzących

Miedź Cu

- masa właściwa = 8,9 $g \cdot cm^{-3}$,
- temperatura topnienia = 1083°C,
- konduktywność γ = 59,77 $MS \cdot m^{-1}$ (Cu chemicznie czysta), γ = 58 $MS \cdot m^{-1}$ (Cu 99,9% na przewody elektryczne),
- wytrzymałość na rozciąganie R_m = 200...400 MPa, zależnie od utwardzenia przez zgniot.

Druty z miedzi

Grube druty (pręty) wytwarza się przez wyciskanie gorącej miedzi przez specjalny otwór w grubościennym zbiorniku.

Cienkie druty wykonuje się z prętów o średnicy około 6 mm przeciągając je na zimno przez kalibrowane oczka przeciągarki.

W procesie przeciągania miedź utwardza się, rośnie liczba defektów sieci krystalicznej, zwiększa się jej wytrzymałość mechaniczna, twardość i kruchość, maleje konduktywność.

Wyżarzanie rekrystalizujące w temperaturze około 500°C przywraca poprzednie własności miedzi.

Stopy miedzi

- dwa podstawowe rodzaje stopów to mosiądze i brązy,
- zawartość Cu w mosiądzach i brązach przekracza 50 %,
- w mosiądzach 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 pod względem:
    - wytrzymałości mechanicznej i sprężystości,
    - odporności na czynniki środowiska,
    - możliwości obróbki skrawaniem.

Aluminium Al

- masa właściwa = 2,7 $g \cdot cm^{-3}$,
- temperatura topnienia = 658,7 °C,
- konduktywność γ = 38,2 $MS \cdot m^{-1}$ Al chemicznie czyste,
- γ = 35 $MS \cdot m^{-1}$ (Al 99,5 % na przewody elektryczne),
- wytrzymałość na rozciąganie R_m = 70...170 MPa,

Al ma dużą odporność na korozję, pokrywa się samorzutnie spoistą około 0,5 μm warstewką izolacyjną ($AlOOH + Al_2O_3$).

Druty z aluminium

Druty z Al uzyskuje się przez przeciąganie na zimno przez oczka przeciągarki. Al utwardza się, maleje jego konduktywność. Stosuje się wyżarzanie rekrystalizujące w temperaturze 300 do 350°C.

Stopy aluminium

- elementy konstrukcyjne aparatów i urządzeń elektrycznych,
- najczęściej stosowane duraluminium $AlCu_3Mg_1$ i silumin $AlSi_9$.

Srebro Ag

- masa właściwa = 10,5 $g \cdot cm^{-3}$,
- temperatura topnienia = 961°C,
- konduktywność γ = 61,8 $MS \cdot m^{-1}$ Ag chemicznie czyste, γ = 61 $MS \cdot m^{-1}$ (Ag na połączenia przewodzące),
- wytrzymałość na rozciąganie R_m = 70...170 MPa.

Cyna Sn

- masa właściwa = 7,28 $g \cdot cm^{-3}$,
- temperatura topnienia = 232°C
- wytrzymałość na rozciąganie R_m = 30 MPa.

Cynk Zn

- masa właściwa = 7,14 g·cm^{-3},
- temperatura topnienia = 419,5 °C,

Cynk pokrywa się warstwą zasadowego węglanu cynku $Zn_2CO_3(OH)_2$, odporną na czynniki zewnętrzne.

Wolfram W

- masa właściwa = 19,29 g·cm^{-3},
- temperatura topnienia = 3410 °C,
- wytrzymałość na rozciąganie R_m = 1200...4200 MPa,

Wolfram jest bardzo twardy i trudno obrabialny. Elementy z wolframu (elektrody lamp, rezystory grzejne, styki łączników dużych mocy itp.) wytwarza się przez spiekanie.

Molibden Mo

- masa właściwa = 10,2 g·cm^{-3},
- temperatura topnienia = 2622 °C,

Molibden ma własności zbliżone do wolframu, jest mniej twardy. Jest stosowany jako składnik spieków oraz na 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 i odporność na korozję,
- możliwość łączenia przez lutowanie, zgrzewanie, spawanie.

Materiały przewodowe mogą pełnić rolę „akumulatora ładunku elektrycznego” (okładziny kondensatorów), a także rolę elementu kontaktowego (połączenia nierozłączalne).

Materiały na przewody elektroenergetyczne gołe

Przewody gołe stosuje się głównie w liniach napowietrznych WN. Podstawowym materiałem na te przewody jest 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.

Materiały na przewody gołe w liniach napowietrznych niskiego i wysokiego napięcia:

- 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: γ = 30 MS·m^{-1} R_m = 350 MPa,
- linie wysokiego napięcia: linki wykonane z drutów stalowych, na których wytłoczono grubą, hermetyczną warstwę aluminium.

Materiały na żyły przewodów izolowanych

Do przewodów izolowanych stosowanych w elektrotechnice można zaliczyć przewody jednożyłowe i wielożyłowe, kable elektroenergetyczne itp.

Żyły przewodów izolowanych wykonuje się najczęściej z miedzi miękkiej.

Materiały na druty nawojowe

Na uzwojenia transformatorów, elektromagnesów, cewek i dławików stosuje się druty nawojowe miedziane pokryte cienką warstwą izolacji.

Na druty cienkie (o średnicy setnych części milimetra) stosuje się miedź półtwardą. Na druty o większych średnicach stosuje się miedź miękką.

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

Najczęściej stosowane są:

- przewody drutowe,
- przewody foliowe (folia przewodząca na laminacie izolacyjnym - obwody drukowane).

Najlepszy materiał na te przewody: Cu 99,9 %, $\gamma \geq 58$ MS·m^{-1}.

Dla ochrony przed utlenianiem przy wyższych temperaturach pracy przewody miedziane powleka się :

- cyną Sn do 150 °C,
- srebrem Ag do 200 °C,
- niklem Ni do 260 °C.

Dla zwiększenia wytrzymałości mechanicznej (na zginanie i drgania) dodaje się 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

Rezystory, kondensatory, ścieżki przewodzące (o grubości kilkudziesięciu mikrometrów) tworzą układ scalony. Do układu dołącza się gotowe elementy półprzewodnikowe.

Na ścieżki przewodzące stosuje się najczęściej: srebro Ag, stop Ag-Pd, złoto Au, platynę Pt, stop Au-Pt.

Technologia układów scalonych grubowarstwowych:

- podłoże: płytka z ceramiki alundowej (Al_2O_3 powyżej 96 %),
- nanoszenie techniką sitodruku past zawierających proszki metali i szkliwa niskotopliwego oraz parafiny,
- wypalanie w piecu tunelowym w temperaturze 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 itp.) są wykonane z zastosowaniem tej samej technologii. Jako układy scalone monolityczne wykonuje się wzmacniacze, generatory, procesory, pamięci itp.

Materiały na elementy przewodzące:

- na ścieżki przewodzące stosuje się najczęściej aluminium cechujące się dobrą przyczepnością do podłoża, którym jest często warstwa tlenku SiO_2,
- na wyprowadzenia stosuje się aluminium Al lub złoto Au.

Technologia układów scalonych monolitycznych:

- podłoże: monokrystaliczne płytki krzemowe Si,
- utlenienie powierzchni płytki - warstwa izolacyjna SiO_2,
- naparowanie w próżni warstwy Al,
- zgrzewanie wyprowadzeń Al lub Au (grubość rzędu 20 μm).

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,
- mała wartość jednostkowej siły termoelektrycznej (STE) w odniesieniu do materiału przewodu przyłączeniowego (dotyczy materiałów na rezystory precyzyjne}.

Podział ze względu na przeznaczenie:

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

Materiały na rezystory precyzyjne

Rezystory precyzyjne to między innymi wzorce rezystancji i 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

Stosuje się stopy miedzi z metalami kolorowymi i żelazem:

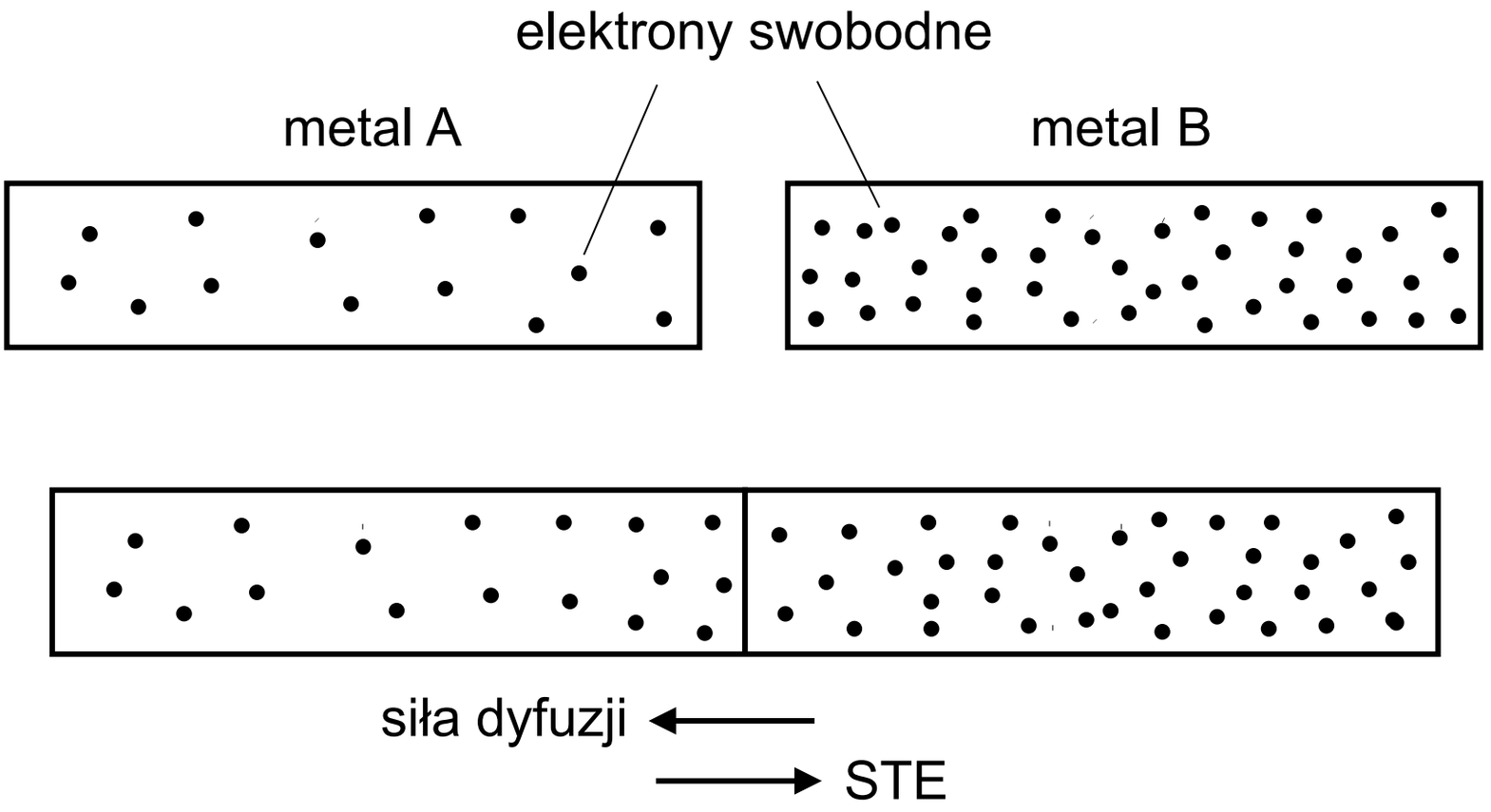
- Cu86Mn12Ni2 (manganin),
- Cu84Mn13Al3 (izabelin),
- Cu82,5Mn12Al4Fe1,5 (inmet),
- Cu55Ni45 (konstantan).

(Liczby po symbolach pierwiastków oznaczają ich udział procentowy w stopie).

Wartości parametrów wymienionych materiałów:

- $\rho \cong 0{,}5\ \mu\Omega\text{m}$, $\alpha \cong 2 \cdot 10^{-5}\ \text{K}^{-1}$,
- $\text{STE}_{\text{Cu}} < 1\ \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$ (konstantan $\text{STE}_{\text{Cu}} = -42{,}6\ \mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}$),
- dopuszczalna temperatura pracy: 250... 400 °C.

Wartość siły termoelektrycznej (STE) w miejscu połączenia dwóch różnych metali lub stopów zależy od różnicy koncentracji elektronów swobodnych w tych metalach oraz od temperatury w miejscu ich połączenia.



Równowaga sił (STE = siła dyfuzji) występuje na poziomie zależnym od temperatury złącza.

Wartość siły termoelektrycznej STE rośnie wraz ze wzrostem temperatura złącza.

Materiały na rezystory techniczne

Rezystory techniczne to między innymi rezystory regulacyjne w układach i urządzeniach elektrycznych i elektronicznych, a także rezystory ograniczające prąd w układach z cewkami, kondensatorami i przyrządami półprzewodnikowymi.

Materiały

Przykładowe materiały w kolejności coraz większych obciążeń prądowych:

- konstantan Cu55Ni45,
- nikielina Cu54Ni26Zn20,
- żeliwo stopowe Fe93,9Zn3,6Si1,7Mn0,8.

Wartości parametrów wymienionych materiałów:

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

Materiały na rezystory grzejne

Rezystory grzejne stosuje się w urządzeniach przemysłowych (piece, suszarki) oraz w urządzeniach i przyrządach ogólnego użytku (grzałki, grzejniki, lutownice itp.)

Wymagania podstawowe:

- możliwie wysoka dopuszczalna temperatura pracy ciągłej,
- odporność na korozję, m.in. dzięki trwałej warstwie tlenków.

Materiały metaliczne

Wybrane materiały, ich rezystywność i dopuszczalna temperatura pracy:

- chromonikielina bezżelazowa Ni80Cr20, 1,1 $\mu\Omega$m, 1150°C,
- chromonikielina żelazowa Fe20Ni65Cr15, 1 $\mu\Omega$m, 1150°C,
- kanthal Fe68Cr24Al5,5Co1,5, 1,45 $\mu\Omega$m, 1375°C,
- molibden Mo, wolfram W; 1500...3000°C (atmosfera ochronna).

Materiały niemetaliczne

Wybrane materiały i ich dopuszczalna temperatura pracy:

- węglik krzemu SiC 1650°C; silit i globar (w postaci prętów),
- krzemek molibdenu $MoSi_2$, 1900°C; superkanthal, mosilit,
- węgiel, grafit C, T_{dop} = 3000°C (atmosfera ochronna).

Niskotemperaturowe materiały organiczne

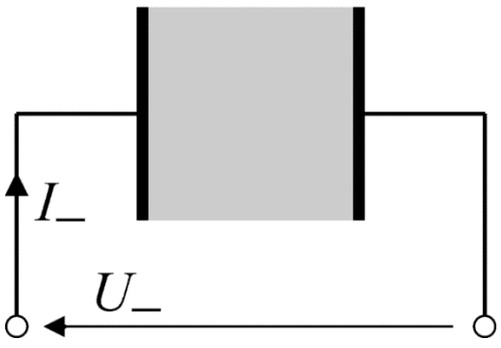
- kauczuki silikonowe napełnione proszkami sadzy, grafitu lub metalu, dopuszczalna temperatura pracy 400°C.

Materiały na rezystory w układach elektronicznych scalonych

Materiały na rezystory w układach scalonych monolitycznych cienkowarstwowych (grubość $\cong$ 1 μm)

Materiały metaliczne:

- stop Cr-Ni (chromonikielina) charakteryzujący się dobrą przyczepnością do podłoży oraz stabilnymi parametrami:
  - ρ = 30...400 Ω (na kwadrat powierzchni warstwy),
  - α = 10^{-6}...10^{-5} K^{-1}.
- inne stopy: np. Cr-Ti, Ta-Au.
- czyste metale: np. Ti, Cr, Ta, W.



Do wytwarzania rezystorów stosuje się metodę naparowania lub napylania katodowego na podłoże.

Materiały niemetaliczne:

- mieszanina tlenków cyny SnO, antymonu, Sb_2O_3 i indu In_2O_3

  Chlorki $SnCl_2$, $SbCL_3$ i $InCl_3$ + H_2O, natryskuje się na podłoże w temperaturze 500°C. Tlen zastępuje chlor w tych związkach.

  Uzyskuje się rezystancję na kwadrat do 500 Ω.

- węgiel polikrystaliczny uzyskiwany w procesie pirolizy

  Uzyskuje się np. z metanu CH_4 przez jego rozkład termiczny (pirolizę) w temperaturze około 1000°C. Uwolniony węgiel osiada na podłożu tworząc warstwę o grubości 0,01...1 μm, o rezystancji na kwadrat od kilku do kilkuset omów oraz temperaturowym współczynniku rezystywności $\alpha = -10^{-4}\ K^{-1}$.

- materiały cermetowe

  Uzyskuje się je przez jednoczesne naparowanie lub napylenie katodowe na podłoże metalu (np. Cr) lub stopu (np. Ni-Cr) i składników ceramicznych (np. SiO, SiO_2).

Materiały na rezystory w układach scalonych hybrydowych grubowarstwowych (grubość ≅ 20…80 μm)

Materiały niemetaliczne:

- materiały w postaci mieszaniny sproszkowanych metali i szkła

  Najczęściej stosuje się pallad Pd i srebro Ag (ziarna (0,5 μm), zmieszane ze szkłem ołowiowo-borowo-krzemowym (ziarna 5 μm). Materiał w postaci pasty nakłada się na podłoże metodą sitodruku i wypala. Grubość warstwy: ~25 μm, rezystancja na kwadrat: 1...25 kΩ, TWR: 10^{-5}...$10^{-4}\ K^{-1}$.

- materiały kompozytowe (zawierające w składzie materiał organiczny)

Typowy materiał kompozytowy na rezystory w układach scalonych grubowarstwowych składa się z:

- materiału przewodzącego (węgiel w postaci sadzy lub grafitu),
- materiału wiążącego (żywice termoutwardzalne takie, jak fenolowo-formaldehydowe, silikonowe, epoksydowe),
- materiału wypełniającego, polepszającego rozmieszczenie ziaren węglowych (talk, mączka mikowa, dwutlenek tytanu).

Wykonany, po zmieszaniu składników i utwardzeniu żywicy, rezystor ma grubość kilkudziesięciu mikrometrów.

Uzyskuje się wartość rezystancji na kwadrat w zakresie od 1 do 25 kΩ.