

## Metale i stopy jako składniki materiałów przewodzących

### *Miedź Cu*

- masa właściwa =  $8,9 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,
- temperatura topnienia =  $1083^\circ\text{C}$ ,
- konduktywność  $\gamma = 59,77 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$  (Cu chemicznie czysta),  
 $\gamma = 58 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$  (Cu 99,9% na przewody elektryczne),
- wytrzymałość na rozciąganie  $R_m = 200\ldots 400 \text{ MPa}$ ,  
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 rekrytalizujące w temperaturze około  $500^\circ\text{C}$  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 =  $2,7 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,
- temperatura topnienia =  $658,7^\circ\text{C}$ ,
- konduktywność  $\gamma = 38,2 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$  Al chemicznie czyste,
- $\gamma = 35 \text{ MS}\cdot\text{m}^{-1}$  (Al 99,5 % na przewody elektryczne),
- wytrzymałość na rozciąganie  $R_m = 70\ldots 170 \text{ MPa}$ ,

Al ma dużą odporność na korozję, pokrywa się samorzutnie spoistą około  $0,5 \mu\text{m}$  warstewką izolacyjną ( $\text{AlOOH} + \text{Al}_2\text{O}_3$ ).

## Druty z aluminium

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

### ***Stopy aluminium***

- elementy konstrukcyjne aparatów i urządzeń elektrycznych,
- najczęściej stosowane duraluminium  $\text{AlCu}_3\text{Mg}_1$  i silumin  $\text{AlSi}_9$ .

### ***Srebro Ag***

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

### ***Cyna Sn***

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

## **Cynk Zn**

- masa właściwa =  $7,14 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,
- temperatura topnienia =  $419,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

Cynk pokrywa się warstwą zasadowego węglanu cynku  $\text{Zn}_2\text{CO}_3(\text{OH})_2$ , odporną na czynniki zewnętrzne.

## **Wolfram W**

- masa właściwa =  $19,29 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,
- temperatura topnienia =  $3410 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- wytrzymałość na rozciąganie  $R_m = 1200\ldots 4200 \text{ MPa}$ ,

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 =  $10,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ,
- temperatura topnienia =  $2622 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ,

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

### ***Materiały na żyły przewodów 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 %,  $\gamma \geq 58 \text{ MS} \cdot \text{m}^{-1}$ .

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 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$  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  $\text{SiO}_2$ ,
- na wyprowadzenia stosuje się aluminium Al lub złoto Au.

### Technologia układów scalonych monolitycznych:

- podłoże: monokrystaliczne płytki krzemowe Si,
- utlenienie powierzchni płytki - warstwa izolacyjna  $\text{SiO}_2$ ,
- naparowanie w próżni warstwy Al,
- zgrzewanie wyprowadzeń Al lub Au (grubość rzędu  $20\text{ }\mu\text{m}$ ).

## Materiały na rezystory

### Wymagania:

- duża rezystywność,
- mały współczynnik temperaturowy rezystancji  $\alpha$  ( $TWR$ ),
- 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  $\rho$  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:

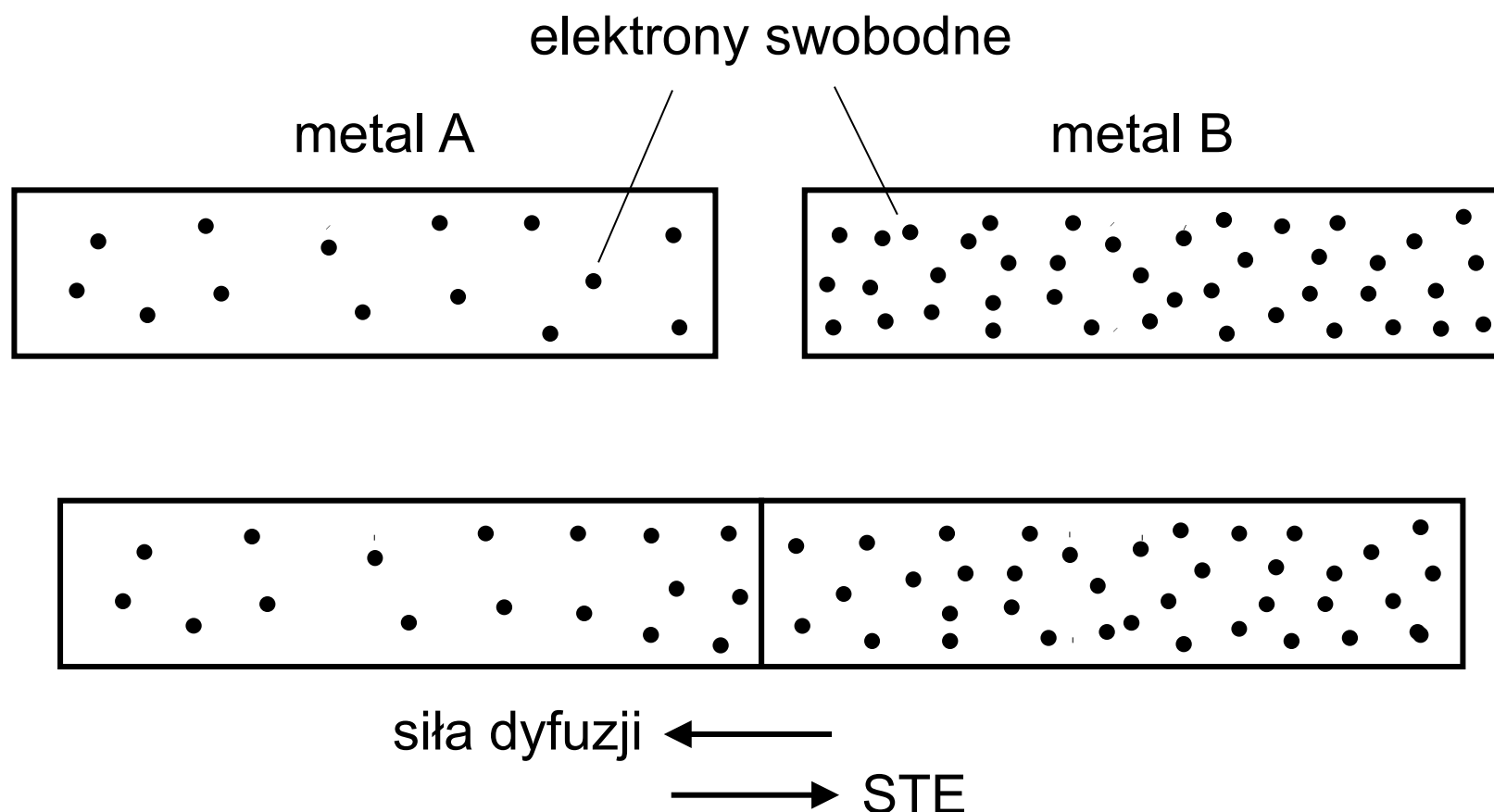
- Cu86Mn12Ni2 (manganin),
- Cu84Mn13Al3 (izabelin),
- Cu82,5Mn12Al4Fe1,5 (inmet),
- Cu55Ni45 (konstantan).

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

## ***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 beżelazowa Ni80Cr20,  $1,1 \mu\Omega\text{m}$ ,  $1150^{\circ}\text{C}$ ,
- chromonikielina żelazowa Fe20Ni65Cr15,  $1 \mu\Omega\text{m}$ ,  $1150^{\circ}\text{C}$ ,
- kanthal Fe68Cr24Al5,5Co1,5,  $1,45 \mu\Omega\text{m}$ ,  $1375^{\circ}\text{C}$ ,
- molibden Mo, wolfram W;  $1500\ldots3000^{\circ}\text{C}$  (atmosfera ochronna).

Materiały niemetaliczne

Wybrane materiały i ich dopuszczalna temperatura pracy:

- węglik krzemu SiC  $1650^{\circ}\text{C}$ ; silit i globar (w postaci prętów),
- krzemek molibdenu MoSi<sub>2</sub>,  $1900^{\circ}\text{C}$ ; superkanthal, mosilit,
- węgiel, grafit C,  $T_{dop} = 3000^{\circ}\text{C}$  (atmosfera ochronna).

Niskotemperaturowe materiały organiczne

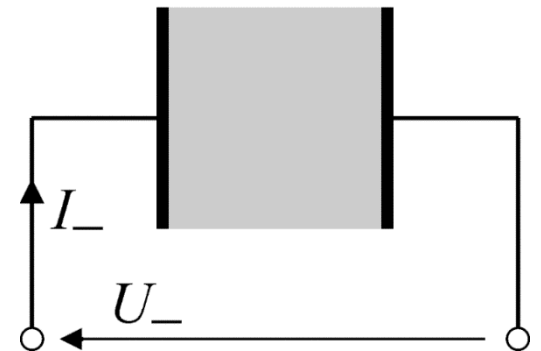
- kauczuki silikonowe napełnione proszkami sadzy, grafitu lub metalu, dopuszczalna temperatura pracy  $400^{\circ}\text{C}$ .

## ***Materiały na rezystory w układach elektronicznych scalonych***

### Materiały na rezystory w układach scalonych monolitycznych cienkowarstwowych (grubość $\cong 1 \mu\text{m}$ )

#### Materiały metaliczne:

- stop Cr-Ni (chromonikielina) charakteryzujący się dobrą przyczepnością do podłoża oraz stabilnymi parametrami:
  - $\rho = 30 \dots 400 \Omega$  (na kwadrat powierzchni warstwy),
  - $\alpha = 10^{-6} \dots 10^{-5} \text{ K}^{-1}$ .
- inne stopy: np. Cr-Ti, Ta-Au.
- czyste metale: np. Ti, Cr, Ta, W.



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

#### Materiały niemetaliczne:

- mieszanina tlenków cyny  $\text{SnO}$ , antymonu,  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  i indu  $\text{In}_2\text{O}_3$   
 Chlorki  $\text{SnCl}_2$ ,  $\text{SbCl}_3$  i  $\text{InCl}_3 + \text{H}_2\text{O}$ , natryskuje się na podłoże w temperaturze  $500^\circ\text{C}$ . Tlen zastępuje chlor w tych związkach. Uzyskuje się rezystancję na kwadrat do  $500 \Omega$ .

- węgiel polikrystaliczny uzyskiwany w procesie pirolizy  
Uzyskuje się np. z metanu  $\text{CH}_4$  przez jego rozkład termiczny (pirolizę) w temperaturze około  $1000^\circ\text{C}$ . Uwolniony węgiel osiada na podłożu tworząc warstwę o grubości  $0,01 \dots 1 \mu\text{m}$ , o rezystancji na kwadrat od kilku do kilkuset omów oraz temperaturowym współczynnikiem rezystywności  $\alpha = -10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .
- 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,  $\text{SiO}_2$ ).

Materiały na rezystory w układach scalonych hybrydowych grubowarstwowych (grubość  $\cong 20 \dots 80 \mu\text{m}$ )

Materiały niemetaliczne:

- materiały w postaci mieszaniny sproszkowanych metali i szkła  
Najczęściej stosuje się pallad Pd i srebro Ag (ziarna  $0,5 \mu\text{m}$ ), zmieszane ze szkłem ołowiowo-borowo-krzemowym (ziarna  $5 \mu\text{m}$ ). Materiał w postaci pasty nakłada się na podłoże metodą sitodruku i wypala. Grubość warstwy:  $\sim 25 \mu\text{m}$ , rezystancja na kwadrat:  $1 \dots 25 \text{ k}\Omega$ , TWR:  $10^{-5} \dots 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

- 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 k $\Omega$ .