



# MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

BMF KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet  
és  
MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutató Intézet

## 6. HŐMÉRSÉKLETÉRZÉKELŐK II. RÉSZ

2008/2009 tanév 1. félév

1

# 6. ELŐADÁS

1. Termoelektromos effektusok, termoelemek
2. (Fém) ellenállás-hőmérők
3. Termisztorok

2

## HŐMÉRSÉKLET-VILLAMOS JEL ÁTALAKÍTÁS

A hőmérséklet villamos jellé való átalakításának, és így a hőmérsékletnek elektromos úton való érzékelésének és mérésének három klasszikus eszköze

- a termelem,
- az ellenállás-hőmérő
- és a termisztor.

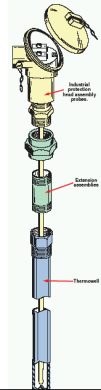


A termoelem generátor típusú, a másik kettő pedig modulátor típusú érzékelő.

3

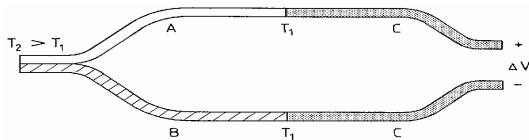
## TERMOELEMES HŐMÉRSÉKLET MÉRÉS ÉS ÉRZÉKELÉS

A hőmérséklet az iparban a leggyakrabban mért paraméter, és a termelem az egyik legfontosabb hőmérsékletérzékelő.



A termoelemek (hőelemek) működésének alapja a termoelektromos (Seebeck-) effektus.

## TERMOELEM – SEEBECK EFFEKTUS



- $\Delta V = \alpha_{ab} \Delta T$ ,  $\alpha_{ab}$  a Seebeck állandó A és B anyag között
- Az AC és BC átmenetek hőmérséklete legyen azonos.
- A mért feszültség nem függ a vezetékek alakjától
- Hőmérsékletkülönbségek mérésére alkalmas
- A termoelem bármely két különböző fém vagy félvezető villamos érintkeztetésével kialakítható.

Thomas Johann Seebeck (1770-1831) német fizikus

## A SEEBECK EFFEKTUS

Ha az érintkezési pont (ún. melegpont) hőmérséklete ( $T_1$ ) a szabad végek hőmérsékletétől ( $T_0$ ) eltér, akkor azok között ún. termofeszültség vagy Seebeck-feszültség ( $U_S$ ) mérhető

$$U_S = (\alpha_A - \alpha_B) (T_1 - T_0) = \alpha_{AB} (T_1 - T_0)$$

$\alpha_A$  és  $\alpha_B$  a Seebeck együtthatók  
 $\alpha_{AB}$  az anyagpárra jellemző termoelektromos együttható

A Seebeck-együtthatók az anyagok sávszerkezetének (elektron szerkezetének) és a töltéshordozók transzport-mechanizmusának függvényei.

6

## A SEEBECK EFFEKTUS

Seebeck-együtthatók tipikus értékei

Fémek néhány  $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$  – néhányszor  $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Félvezetők néhányszor  $100 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$

Néhány fém termoelektromos feszültségsora (pozitívtól a negatív felé):

Sc, Sb, Fe, Sn, Cu, Ag, Au, Zn, Pb, Hg, Pt, Ni, Bi

Termoelem: érintkezés pont melegítésekor az az ág lesz pozitív a másikhoz képest, mely a sorban előbb van.

7

## TERMOFESZÜLTÉSÉG: GYAKORLATI ASPEKTUSOK

A keletkező termofeszültségek egyértelmű meghatározására a platinát (Pt) tekintik alapfémnek. Ekkor a relatív skálán a Pt termofeszültsége 0 V.

A termoelem érzékenysége annál nagyobb minél távolabb helyezkedik el a két alkotó fém a termoelektromos feszültségsorban.

8

## TERMOELEM HŐÉRZÉKLŐ ÉS HŐMÉRŐ

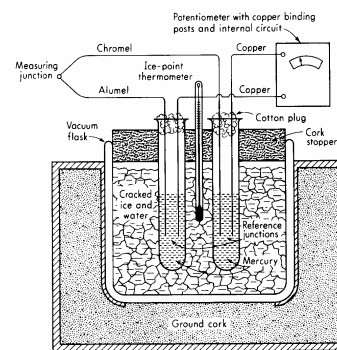
A gyakorlatban használt termoelemek szabványosítottak, számos (nemesfém és nem nemesfém alapú) típusuk terjedt el.

A hidegpont stabil hőmérséklete olvadó jég és víz elegyével biztosítható, vagy az ingadozásokat kiegyenlítő ún. kompenzátor elektronikát alkalmaznak.

Termoelem hőmérő/hőérzékelő előnyei:

- biztosítja a hőérzékelő kis hőkapacitását és kis sugárzási hibáját,
- a hőmérsékleti értékek regisztrálása könnyen megoldható,
- nehezen hozzáférhető helyen is alkalmazható.

## HIDEGPONT LABORÁTORIUMI MEGVALÓSÍTÁSA



10

## TERMOELEKTROMOSSÁG: FIZIKAI HATÁSOK

A termoelektromos mérőátalakítók – vagy az elterjedtebben használt elnevezésük szerint hőelemek – néhány termikus-elektromos energiaátalakítással kapcsolatos fizikai hatáson alakulnak. Ezek az alábbiak

Seebeck –effektus,  
Peltier-effektus,  
Thomson- effektus.

A fenti effektusok általában együttesen érvényesülnek, ezek alapján jönnek létre az úgynevezett termofeszültségek, és lehetővé teszik a hőelemek készítését, használatát.

11

## PELTIER-EFFEKTUS

A Peltier hatás a hőnek villamos energiává vagy viszont való alakításával függ össze. A két különböző anyagú vezető végeiket összekötve (forrasztva, hegesztve, vagy fémesen összesajtolva), ha áram folyik rajtuk, akkor az egyik kötési pont melegszik, a másik hűl, illetve a fordított folyamatban az egyik pont melegítése (vagy a másik hűtése) a hurkon áramot hajt keresztül.

$$Q = \pm \pi I$$

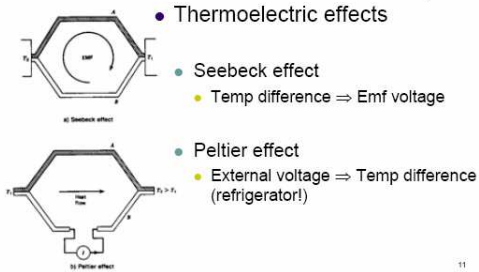
Q – a kötés által felvett (vagy leadott) teljesítmény, W

I – az áramkörben folyó áram, A

$\pi$  – az úgynevezett Peltier-tényező, V

12

## SEEBECK- ÉS PELTIER EFFEKTUS

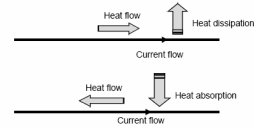


13

## THOMSON EFFEKTUS

Ha az árammal átjárt homogén vezető mentén hőmérsékletváltozás is fellép, akkor a vezeték mentén hő válik ki, vagy nyelődik el

Current flowing in a wire in which temperature gradient is present shows a heat exchange with its environment.



$$Q = \pm \sigma I$$

$\sigma$  - Thomson tényező

14

## KAPCSOLAT A TERMOELEKTROMOS JELENSÉGEK KÖZÖTT

Seebeck- gyűthető  $S = \frac{dU_T}{dT}$

A Peltier- és a Seebeck-egyűthetők közötti összefüggés

$$\pi = S T$$

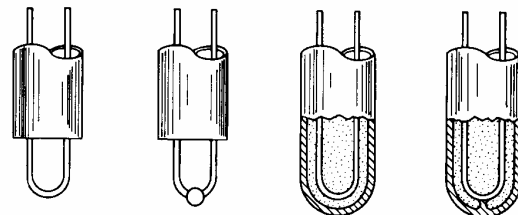
A fenti két egyenletből adódik

$$U_T = \int_{T_1}^{T_2} \pi \frac{dT}{T}$$

15

## HŐELEMEK MEGVALÓSÍTÁSI FORMÁI

A gyakorlati megvalósítás két eltérő fém jó minőségű hegesztési pontjának létrehozása. Gyakori forma az ún. köpenyhőelem (termokoax).



Bare wire butt welded

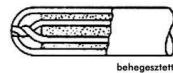
Bare wire beaded

Insulated junction

Grounded junction

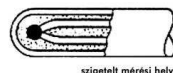
## KÖPENYHŐELEMEK

Ipari felhasználásoknál a hőlempárok huzaljait egymástól pl. kerámiagyűrűkkel elszigetelik és szabványos kivitelű tokba szerelik. A tok anyaga a mérendő közeg hőmérsékletéhez illeszkedik.



behegesztett

Rövid beállási idejű hőelemek a köpenyhőelemek. Ezeknél a szigetelés  $Al_2O_3$  kerámia, ami egy nemesacél burkolatba van ágyazva. Az érzékelő külső mérete illeszkedik a mérési feladathoz, pl. nagyon kicsi átmérő, akár tűszerű érzékelő, vagy becsavarozható tok, pl. belső égésű motorok, vagy csapágyak figyelésére.



szigetelt mérési hely

17

## TERMOELEMEK A GYAKORLATBAN

Igen jó linearitás viszonylag széles hőmérsékleti tartományban, de az érzékenység kicsi. Mérete kicsi, működése gyors. A hőelemhuzal ellenállása nem lényeges. Pontosság (ipari/szabványos) típusok  $\pm(1,5-2,5)^\circ C$ .

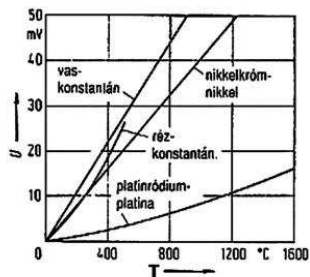
A termoelemek típusait, a használható hőmérséklet-tartományokat és a termofeszültség-hőmérséklet táblázatokat nemzetközi szabványok rögzítik.

18

## HŐELEMEK TÍPUSAI

típusa	Hőelem összetétele	méréshatár °C	$U_{100}$ mV
T	réz-konstantán (Cu-CuNi)	-270 +400	4,30
J	vas-konstantán (Fe-CuNi)	-210 +1200	5,25
K	nikkelkróm-nikkel (NiCr-Ni)	-270 +1372	4,10
S	platinaródium-platina (Pt10Rh-Pt)	-50 +1769	0,645

## SZABVÁNYOS ILLETVE GYAKORI HŐELEMPÁROK



Gyakrabban alkalmazott hőelempárok és a maximális méréshatár:  
 Cu-Ko ( réz-konstantán) kb. 500 °C ( T típus) ,  
 Fe-Ko ( vas-konstantán) kb. 700 °C ( J típus) ,  
 NiCr-Ni ( Nikkelkróm-nikkel) kb. 1000 °C és  
 PtRh-Pt ( platina-ródium-platina) 1300 °C ( korlátozottan 1600°C) ( S illetve R típus).

W-W26%Re 2800 °C-ig ( G típus)

20

## TERMOELEM TÁBLÁZATOK

TYPE J: IRON-CONSTANTAN

	0	5	10	15	20	25	30	35	40
-150	-6.50	-6.66	-6.82	-6.97	-7.12	-7.27	-7.40	-7.54	-7.66
-100	-4.63	-4.83	-5.03	-5.23	-5.42	-5.61	-5.80	-5.98	-6.16
-50	-2.43	-2.66	-2.89	-3.12	-3.34	-3.56	-3.78	-4.00	-4.21
-0	0.00	0.25	0.50	0.76	1.02	1.28	1.54	1.80	2.06
50	2.58	2.85	3.11	3.38	3.65	3.92	4.19	4.46	4.73
100	5.27	5.54	5.81	6.08	6.36	6.63	6.90	7.18	7.45
150	8.00	8.28	8.56	8.84	9.11	9.39	9.67	9.95	10.22
200	10.78	11.06	11.34	11.62	11.89	12.17	12.45	12.73	13.01
250	13.56	13.84	14.12	14.39	14.67	14.94	15.22	15.50	15.77
300	16.33	16.60	16.88	17.15	17.43	17.71	17.98	18.26	18.54
350	19.09	19.37	19.64	19.92	20.20	20.47	20.75	21.02	21.30
400	21.85	22.13	22.40	22.68	22.95	23.23	23.50	23.78	24.06

A táblázat 0 °C referenciahőmérsékletre vonatkozik. Ekkor pl. 210 °C-nál 11,34 mV a termofeszültség.

21

## TERMOELEMEK ALKALMAZÁSA

A kivezetések, illetve a hidegpont hőmérsékletét stabilizálni kell. Ma is az olvadó jég a legjobb módszer.

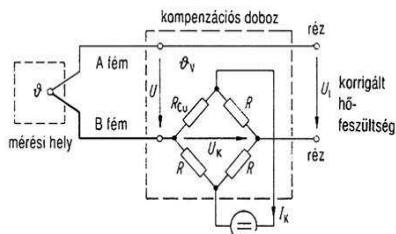
Elektronikus hidegpontstabilizálás. Pt. termosztát 50 °C-ra.

Hidegpontkompenzálás elektronikus referenciaáramkörrel.

Magasabb hőmérsékletek mérésénél feladat és ha mérési pontosságra nem tartanak igényt, referenciahőmérséklet lehet a környezeti hőmérséklet (szobahőmérséklet) is, ilyenkor a kompenzátor el is maradhat.

22

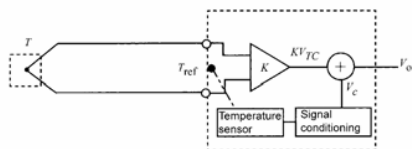
## HIDEGPONT KOMPENZÁLÁS



A hőmérsékletet a hídban elhelyezett  $R_{cu}$  réz ellenállás-hőmérő érzékeli így a híd  $U_k$  kompenzációs feszültséget szolgáltat, mely a mért termofeszültséghez hozzáadódva kompenzálja az összehasonlító hely hőmérsékletváltozását.

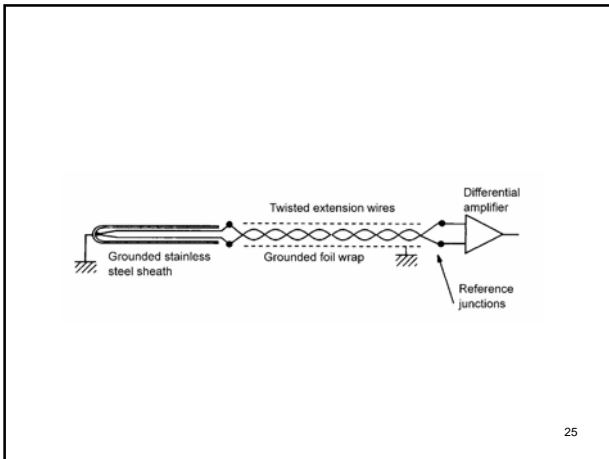
## HIDEGPONT KOMPENZÁCIÓ

Referencia (hidegpont) kompenzáció



1. Szabályozott hőmérsékletű fémblokk.
2. Referencia (hidegpont vagy jégpont) kompenzáló áramkörök.
3. Szoftveres kompenzáció.

24



25

**ANALOG DEVICES** Monolithic Thermocouple Amplifiers with Cold Junction Compensation  
**AD594/AD595**

**FEATURES**  
 Optimized for Type J (AD594) or Type K (AD595) Thermocouples  
 Can Be Used with Type T Thermocouple Inputs  
 Low Impedance Voltage Output: 10 mV/°C  
 Built-In Ice Point Compensation  
 Wide Power Supply Range: +5 V to +15 V  
 Low Power: ~1 mW typical  
 Thermocouple Failure Alarm  
 Laser-Writer Traced to 1°C Calibration Accuracy  
 Setpoint Mode Operation  
 Self-Contained Celsius Thermometer Operation  
 High Impedance Differential Input  
 Side-Braced DIP or Low-Cost CerDip

**FUNCTIONAL BLOCK DIAGRAM**

26

### KONTAKTPOTENCIÁLOK KIEGYENLÍTÉSE

Nehézséget jelenthet, ha a termoelem jelét nagy távolságra kell eljuttatni. A vezeték saját ellenállása és az esetleges toldások kontaktpotenciálja jelentős mérési hibákat okozhat.

A  $T_3$  hidegponton Fe-Ko forrasztási ponttal ellentétesen kapcsolt Ko-Fe forrasztási pont helyezkedik el, az itt keletkező termofeszültség levonódik a mérőpontban keletkező feszültségből. Ekkor az indikátor forrasztási pontnál keletkezett Ko-Cu és Cu-Ko hőelemek termofeszültségei egymást kiegyenlítik.

Thermo-element (Thermocouple)

two dissimilar electrical conductors

Fe-Const also: Pt/Rh - Pt

measured temperature (hot junction)  
reference temperature (cold junction)

$U = (\theta_2 - \theta_1)$   
4.20 mA

28

### Design Example

- Want a system to have output 2.00 V at 200°C. Use type J thermocouple, and solid-state temp sensor, whose output voltage varies 8 mV/°C, for reference temp correction.
  - $V_{J0}(200^\circ\text{C}) = 10.78 \text{ mV}$
  - Gain = 2.00 V / 10.78 mV = 185.5
  - TC sensitivity  $\approx 50 \text{ uV}/^\circ\text{C}$ 
    - Smaller than the sensor (8 mV/°C) / (50 uV/°C) = 160 times
  - $V_{\text{out}} = 185.5(V_{\text{TC}} + V_C/160) = 1.159(160V_{\text{TC}} + V_C)$

29

### Design Example

- $V_{\text{out}} = 1.159(160V_{\text{TC}} + V_C)$

30

## ELLENÁLLÁS-HŐMÉRŐK ÉS ÉRZÉKELŐK

Fizikai mechanizmus:

A hőmérsékletváltozás hatására a vezetőben, illetve a félvezetőben megváltozik a töltéshordozók koncentrációja és/vagy mozgékonyága.

Az ellenállás-hőmérők működése a tiszta fémek fajlagos ellenállásának viszonylag nagymértékű és – korlátozott tartományokban – jó közelítéssel lineáris hőfokfüggésén alapszik.

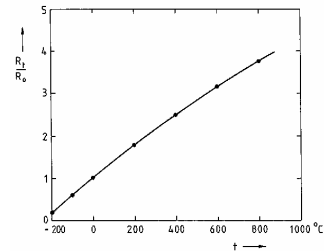
$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta T)$$

$$TK = \alpha = \Delta\rho / \rho_0 \Delta T$$

Fémek  $\alpha = (4...7) \times 10^{-3} / K$

31

## TISZTA FÉM ELLENÁLLÁS-HŐMÉRSÉKLET GÖRBÉJE



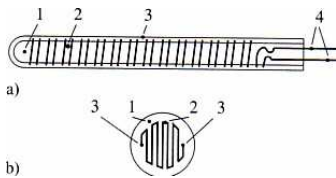
Platina (Pt) fajlagos ellenállásának hőmérsékletfüggése

32

## ELLENÁLLÁS-HŐMÉRŐK

Ellenállás-hőmérőnek szinte minden tiszta fém alkalmas. A gyakorlatban a Pt, Ni és a Cu terjedt el.

Kivétel: huzaltekerceselés, valamint vékony- és vastagréteg technológia



33

## ELLENÁLLÁS-HŐMÉRŐK

Pt – magasabb hőmérsékletek

Ni – alacsony és közepes hőmérsékletek

Cu – szobahőmérsékletek környezete

Ellenállás típus	Ajánlott T tartomány (°C)	Érzékenység ppm/°C (0 °C)
Réz	-50...150	4300
Nikkel	-60...180	6810
Platina (USA)	-220...850	3925
Platina (EU)	-220...850	3850
Platina (speciális)	-250...1000	3850

Szabványos alapérték (°C) legtöbbször 100 ohm

34

## ELLENÁLLÁS-HŐMÉRŐK

Előnyei:

Pontos

T-t mér (nem  $\Delta T$ -t)

Hátrányai:

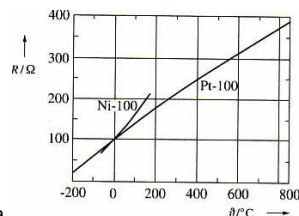
Korlátozott T-tartomány

Önfűtés

Nagy, lassú

Hozzávetések ellenállása

(3- vagy 4-vezetékű mérés)



35

## Resistance-Temperature Detectors (RTD)

- Metals
  - Platinum – repeatable, expensive
  - Nickel – less repeatable, less expensive
- Sensitivity
  - $\sim 0.4 \Omega/^\circ\text{C}$  for platinum
  - $\sim 0.5 \Omega/^\circ\text{C}$  for nickel
- Range
  - -100 to 650°C for platinum
  - -180 to 300°C for nickel



Pt – magasabb hőmérsékletek

Ni – alacsony és közepes hőmérsékletek

Cu – szobahőmérsékletek környezete

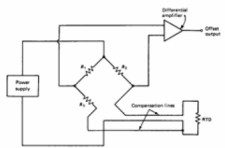
36

## Resistance-Temperature Detectors (RTD)

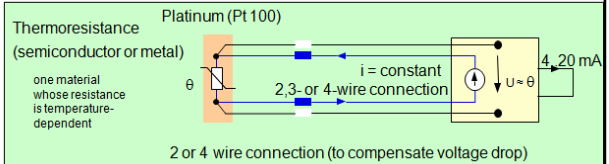
- Signal Conditioning
  - Bridge circuit
- Dissipation constant ( $P_D$ )
  - Temp rise from Self heating

$$\Delta T = \frac{P}{P_D}$$

- Example:
  - PT-100 has a resistance of 100 ohms at 0 °C and 138.4 ohms at 100 °C (0.384  $\Omega/^\circ\text{C}$  sensitivity), price >1,200 Bath



37



38

## RÉTEGTECHNOLÓGIÁVAL MEGVALÓSÍTOTT HŐMÉRSÉKLETÉRZÉKELŐK

Termoelemek:

- Vékonyréteg termoelem:
  - A megvalósításból adódóan a beállási idő akár 1e-6 s is lehet
- Vastagréteg termoelem:
  - Nem túl jó linearitás
  - Kis érzékenység
- Vékony és vastagréteg termoelemek hátránya: Hozzávezetések megvalósítása nehéz

39

## RÉTEGTECHNOLÓGIÁVAL MEGVALÓSÍTOTT HŐMÉRSÉKLETÉRZÉKELŐK

Vékonyréteg ellenállás-hőmérők:

- Pt, Ni, Cu alapanyag
- Hordozó: üveg, vagy zománczott kerámia (tapadásjavító réteg: Cr)
- TK-t befolyásolja:
  - rétegvastagság
  - szennyezőanyag tartalom
  - hordozó anyaga és felületi érdessége
  - ellenállásötvezet sztöchiometriai összetétele
  - a rétegleválasztás körülményei
  - rétegleválasztást követő hőkezelés



40

## RÉTEGTECHNOLÓGIÁVAL MEGVALÓSÍTOTT HŐMÉRSÉKLETÉRZÉKELŐK

Szabványosítható rétegenállás-hőmérők megvalósításának nehézségei:

- hordozó hőtágulása módosítja TK-t (szabványos TK biztosítása nehéz)
- ilyen hatása van a vastagréteg pasztáknál alkalmazott tapadásjavító adalékoknak
- ilyen hatása van a vékonyréteg alatt alkalmazott tapadásjavító beötveződésének
- vastagrétegnél probléma a négyzetes ellenállás kis értéke, ami miatt csak meanderrel, nagy méretben lehet elegendően nagy ellenállásértéket elérni
- vastagrétegnél csak pozitív TK valósítható meg

VÉGE

42