

ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

4. ELŐADÁS: HŐMÉRSÉKLETÉRZÉKELŐK I



2010/2011 tanév 2. félév

1

HŐMÉRSÉKLET MÉRÉS ÉS ÉRZÉKELÉS

A hőmérséklet az iparban a leggyakrabban mért paraméter.

A hőmérséklet villamos jellel 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

4. ELŐADÁS

1. Hőmérsékletérzékelők, általános bevezető
2. Hőtani alapok
3. Sugárzásos hőmérsékletérzékelés
4. Piroelektromos hőmérsékletérzékelés

2

HŐMÉRSÉKLETÉRZÉKELÉS: IPAR

Thermistance (RTD - resistance temperature detector):
metal whose resistance depends on temperature:

- ☺ cheap, robust, high temperature range (-180°C ...600°C),
- ☹ require current source, non-linear.

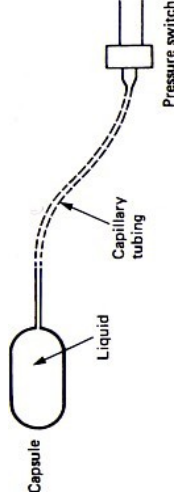
Thermistor (NTC - negative temperature coefficient):
semiconductor whose resistance depends on temperature:

- ☺ very cheap, sensitive,
- ☹ low temperature, imprecise, needs current source, strongly non-linear, fragile, self-heating

4

FOLYADÉKIGÁZ HŐMÉRŐ

Expansion of a fluid or gas
 Conventional thermometer with mercury or alcohol
 Gas thermometer is standard method
 Application: T switch in old fridges

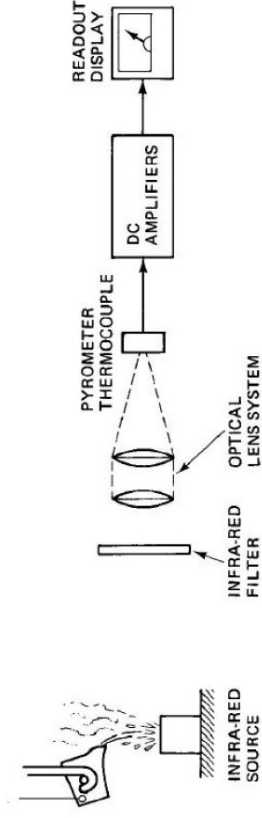


9

SUGÁRSZÉRKÉLŐS T MÉRÉS

Pyrometer using thermopile circuit

Thermopile - a circuit arranged of a number of thermocouples in series

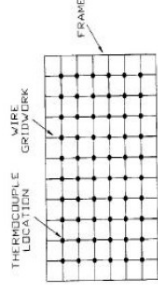


11

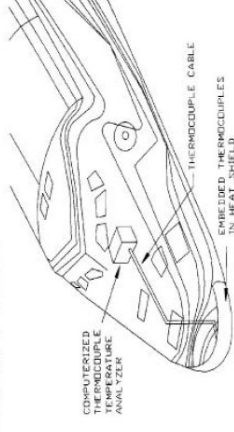
TERMOLELEM: ALKALMAZÁS

Űrtechnológiában

Thermocouple grid applied space shuttles front end



Háztartásban



10

HŐMÉRSÉKLET ÉS ENERGIA

Egy fizikai rendszer vagy állapotát a rendszer belső energiájával lehet jellemezni. Ez egy szerkezeti energia, az illető rendszer mint makroszkópikus test mozgási (kinetikus) és potenciális energiája nem számítható hozzá. A hőmérséklet mely egy termodinamikai "intenzív" paraméter a belső energiával áll kapcsolatban.

Az energia és a hőmérsékleti skálák közötti összefüggés

$$E = kT$$

k – Boltzmann állandó $1,38 \times 10^{-23}$ Joule/K.

12

A HŐMÉRSÉKLET SI MÉRTÉKEGYSÉGE

A hőmérséklet SI mértékegysége a **kelvin** (K).

Definíciója: a víz (H₂O) hármaspontja (termodinamikai) hőmérsékletének 1/273,16 –szorososa. Abszolút skála, mely a Carnot-féle körfolyamat hatásfoka, vagy az ideális gáz állapotegyenlete ($pV = RT$) szerint lehet definiálni.

A m, kg, sec, A, és a cd mellett az SI mértérendszer hatodik alapegysége.

13

Celsius-skála

- Bevezetője: Anders Celsius
- 0 értéke: olvadó jég hőmérséklete
- 100 értéke: forrásban lévő víz hőmérséklete
- Mértékegysége: °C fok (Celsius-fok)
- Jele: t
- Legelterjedtebb skála az európai kontinensen

HŐMÉRSÉKLETI SKÁLÁK

Temperature Unit	K	°R	°F	°C
Zero thermal energy	0		-459.6	-273.15
Water melting point, T _m	273.15	0	32	0
Water boiling point, T _b	373.15	80	212	100

Abszolút (termodinamikai, **Kelvin**) és relatív (**Réaumur**, **Fahrenheit**, **Celsius**) skálák. A relatív skálák alappontjai a víz olvadás- és forráspontja. A víz olvadáspontja 0° (R,C), illetve 32° (F), a forráspont és az olvadáspont közötti távolságot pedig 80, 180 illetve 100 részre osztják.

14

Reaumur-skála

- Bevezetője: René Antonie Ferchault de Réaumur
- 0 pontja: a víz fagyáspontja
- Másik alappontja: víz forráspontja
- Alappont tartomány felosztása: 80 egység
- Csak történeti jelentősége van

Fahrenheit-skála

- Bevezetője: Gabriel Daniel Fahrenheit
- 1700-as évektől használják az amerikai kontinensen
- Nulla pontja: legjobban lehűlő sós oldat fagyáspontja (így a víz fagyáspontja 32 fok)
- Másik alappontja: emberi test hőmérséklete
- Alap-pontok tartományát 96 egységre osztotta
- Mértékegysége: °F (Fahrenheit-fok)

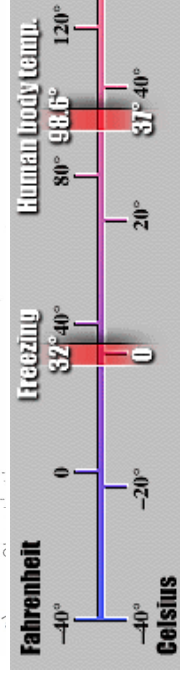
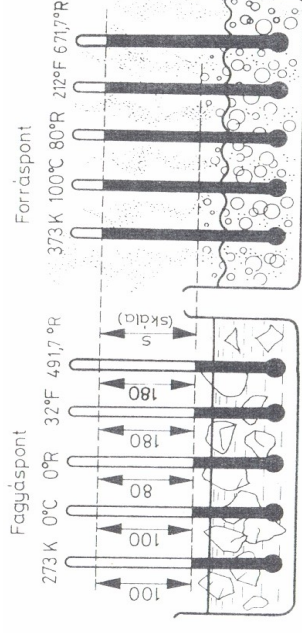
Rankine-skála

- Bevezetője: William John Macquorn Rankine
- 0 pontja: abszolút nulla
- Egysége: megegyezik a Fahrenheit egységgel
- Mértékegysége: °R (rankine-fok)
- Ritkán használják

Kelvin-skála

- Bevezetője: William Thomson (majd Lord Kelvin)
- Nulla pontja: abszolút nulla fok (-273,15 C°)
- Skálája: abszolút hőmérsékleti skála
- Egysége: megegyezik a Celsius skála egy fokával
- Mértékegysége: K (kelvin)
- Jele: T

HŐMÉRSÉKLETI SKÁLÁK ÖSSZEHASONLÍTÁSA



HŐÁRAMLÁS (KONVEKCIÓ)

A hőáramlás a hőterjedés egyik módja:

A folyadékokban, illetve gázokban a hő (energia) az anyag részecskéinek (molekulák) elmozdulása (helyváltoztatás, áramlás) révén terjed.

Magasabb hőmérséklet - nagyobb energiájú részecskék

Alacsonyabb hőmérséklet - kisebb energiájú részecskék

25

HŐVEZETÉS: ELEKTROMOS ANALÓGIA

Hővezetés "Ohm törvénye"

$$\dot{Q} / t = \dot{Q}P = \kappa \cdot \Delta T \cdot A / l$$

Hőtani paraméter	Elektromos paraméter
Hőmérséklet (ΔT)	Feszültség (U)
Hőáram ($\dot{Q}P = \dot{Q}Q/t$)	Áram (I)
Hővezetőképesség (κ)	Vezetőképesség (σ)
Stb.	

27

HŐVEZETÉS

Fizikai mechanizmus:

Közvetlenül érintkező, különböző hőmérsékletű anyagrészecskék közötti hőcserélődés. A hő a magasabb hőmérsékletű helyről az alacsonyabb hőmérsékletű hely felé áramlik.

$$\dot{Q}Q = \kappa \cdot \Delta T \cdot A \cdot t / l$$

κ - hővezetési együttható W/m K
 ΔT - hőmérséklet-különbség
A - áramlási keresztmetszet
l - áramlási hossz
t - idő

26

HŐVEZETÉSI EGYÜTTHTATÓ

Anyag	κ (W/cm K) T = 300 K
C (gyémánt)	6,6
Ag	4,18
Cu	3,85
GaN	1,3
Si	1,5
GaAs	0,46
Ge	0,6
Pb	0,38
SiO ₂	0,014

28

HŐVEZETÉS MECHANIZMUSAI

Rácsrezgések (fononok) és szabad elektronok (lyukak).

Fémek jó elektromos és hővezetők, κ és σ arányos egymással (*Wiedemann-Franz törvény*).

Egykristályok (félvezetők is) általában jó hővezetők.

Amorf, polikristályos anyagok, ötvözetek (rendezetlen szerkezetű anyagok általában) rossz hővezetők.

29

HŐSUGÁRZÁS

Sugárzás(EM) elnyelés és kibocsátás (kb. 1 – 100 α cm).
Stefan-Boltzmann törvény:

$$Q = \varepsilon \sigma T^4$$

ε - emissziós tényező (<1)

σ - abszolút fekete test sugárzási tényezője
(Stefan-Boltzmann állandó, $\sigma = \frac{2\pi^5 k^4}{15 h^3 c^2}$)
 $= 56,7 \times 10^{-9} \text{ W/m}^2 \text{K}^4$)

30

HŐMÉRSÉKLETI SUGÁRZÁS

Az anyagi testek hőmérsékletüktől függően elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. A kibocsátott EM (fény) energia a hőmérséklettel emelésével rohamosan (az abszolút hőmérséklet negyedik hatványával) nő. A sugárzás spektruma a teljes $(0, \infty)$ tartományra kiterjed, és a spektrális maximum helye hullámhosszban az abszolút hőmérséklettel fordítva arányos.

Alapvető fizikai törvények:

Planck féle sugárzási törvény

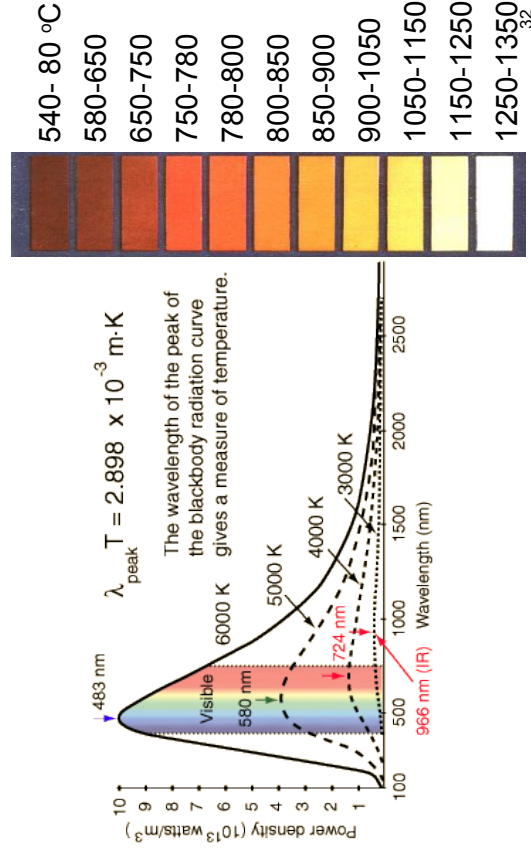
Wien féle eltolódási törvény

Stefan-Boltzmann törvény

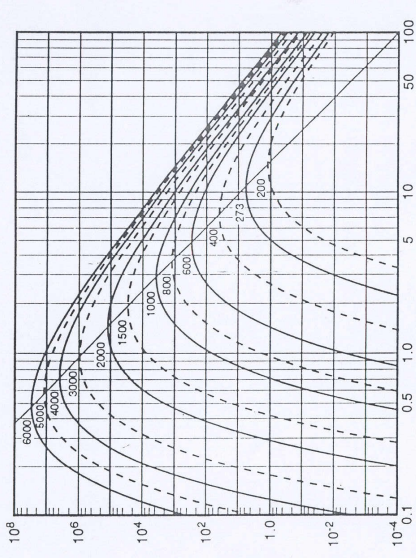
(Rayleigh-Jeans törvény)

31

TERMIKUS SUGÁRZÁS SPEKTRUMA

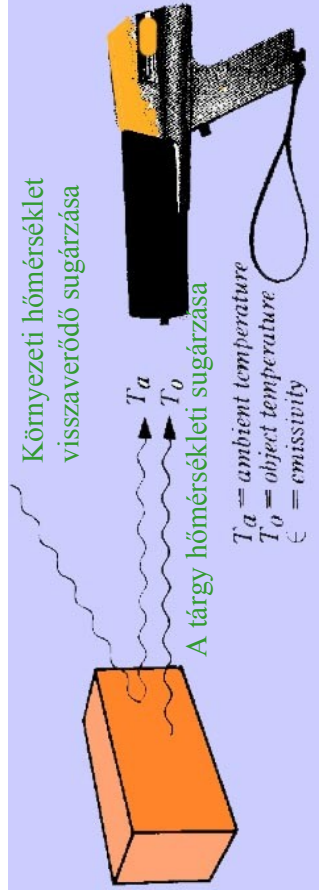


FEKETE TEST SUGÁRZÁSA



Egységnyi felületről egységnyi térszögbe egységnyi hullámhosszon (1 μm) kisugárzott teljesítmény a hullámhossz (∞m) függvényében. Az egyenes a Wien-féle eltolódási törvény) 33

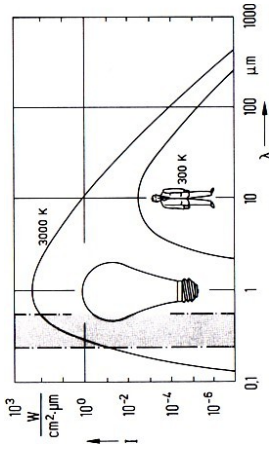
PONTHŐMÉRÉSKÉLMÉRÉS INFRAVÖRÖS (IR) SUGÁRZÁS ALAPJÁN



Minden tárgy elnyel (abszorbeál) és kibocsát (emittál) sugárzást.

A tárgy a hőmérsékletének megfelelő energia szinten bocsát ki energia sugárzást, anyagától és felületi minőségétől függő mértékben.

INFRAVÖRÖS SUGÁRZÁS



$$P_{IR} = const \cdot A \cdot \epsilon_R \cdot T^4$$

ϵ_R = emissivity;

$\epsilon_R = 1$: black body

At $\lambda=10\mu m$ most materials show $\epsilon = 0,95 \dots 1,0$ (except metals, they reflect)

The sensor also emits IR radiation:

$$P_{IR} = const(\epsilon_{object} \cdot T_{Object}^4 - \epsilon_{sensor} \cdot T_{sensor}^4)$$

TESTHŐMÉRÉSKÉLET ELOSZLÁS



A test hőmérséklet eloszlását láthatóvá tevő kamera és képernyő. Az emberi test vizsgálatánál 2-3°C-os mérettartományban 0,1°C-os pontossággal lehet hőtérképet készíteni Gyulladások, vérkeringési eltérések láthatóvá tehető

HŐÁTADÁS

A hővezetés, a hőáramlás és sokszor a hősugárzás is együtt lép fel. Ez az összetett jelenség a **hőátadás**.
A hőátadás fenomenologikus alapegyenlete

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \cdot t$$

\dot{Q} - átadott hő (energia) Joule

α - hőátadási tényező W/m^2K

A - érintkezési felület

ΔT - hőmérsékletkülönbség

t - hőcsere ideje

37

HŐÁTADÁS

A hőátadás fenomenologikus alapegyenlete

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot \Delta T \cdot t$$

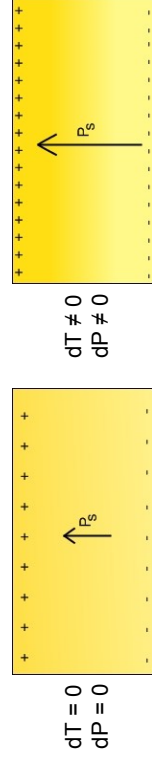
Szilárdtest-folyadék, illetve szilárdtest-gáz határfelületén csak nyugvó közegekre érvényes. Áramló folyadékok vagy gáz esetén javul a hőátadás, **lamináris** áramlásnál kisebb, **turbulens** áramlásnál nagyobb mértékben. Az áramlási sebesség növekedésével \dot{Q} is növekszik.

38

PIROELEKTROMOS EFFEKTUS

Spontán polarizáció, illetve megváltozása hőmérséklet hatására.

$$\Delta Q = p \times A \times \Delta T$$



Spontán polarizáció: piezoelektromos, ferroelektromos, elektret anyagok. Nyugalmi állapotban a töltésemlegesség miatt nem észlelhető a polarizáció. Hőmérsékletváltozás – polarizációváltozás, ez érzékelhető, utána "lecseng".

PIROELEKTROMOS EFFEKTUS

Piroelektromos együtttható

$$p = \partial P / \partial T$$

Sikkondenzátorban dielektrumként elhelyezett piroelektromos anyag esetén

$$\Delta U = p \cdot d \cdot \Delta T / \epsilon_r \cdot \epsilon_0$$

Nagy érzékenységgel
Statikus mérés nem lehetséges

Anyagok: turmalin, $NaNO_2$, $LiTaO_3$, TGS (triglicin-szulfát) ⁴⁰

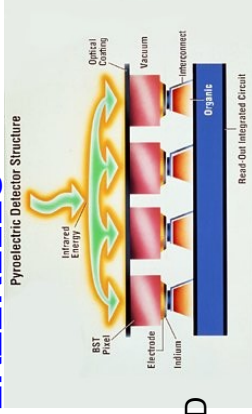
PIROELEKTROMOS ANYAGOK

	PVDF	NaNO ₂	LiTaO ₃	TGS*
p ($10^{-4} \text{ Cm}^{-2}\text{K}^{-1}$)	0.25	0.4	1.8	2.8
Permittivity, ϵ_r	9	4	47	38
c_{th} ($10^6 \text{ Jm}^{-3}\text{K}^{-1}$)	2.3	2.2	3.2	2.3
g_{th} (W/mK)	0.14	2.2	3.9	0.65

*TGS = Triglycine sulphate

41

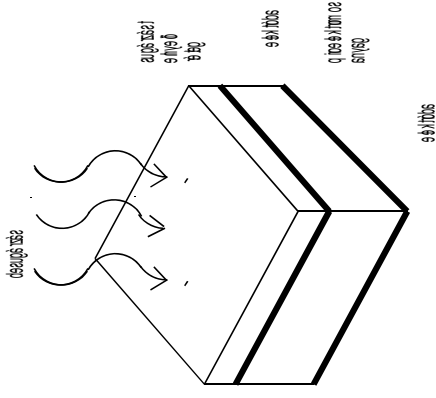
PIROELEKTROMOS HŐMÉRŐKÉLÉRTÉKELÉS



Insulator wafer Triglycine sulfide-D
 Temperature dependent electric polarization
 Generally disappears when electric field is removed
 For pyroelectric materials
 T dependent capacitor is created
 Fast response time
 Usage
 FT-IR detector
 Night vision system

43

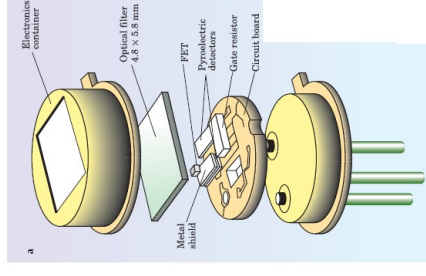
PIROELEKTROMOS CELLA



42

PIROELEKTROMOS DETEKTOROK

Intruder detection and burglar alarms
 Flame detector and fire detector
 Temperature measurement
 Automatic door switch
 IR spectrometer
 Pollution monitors
 Light control



44

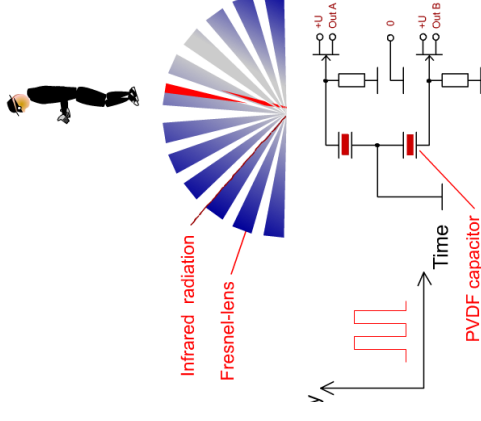
SUGÁRZÁS MÉRÉS

Kis T változás is jól mérhető hatást idéz elő. Leginkább hőmérsékletérzékelésre használható, közvetve nagy pontosságú távhőmérséklet-mérést tesz lehetővé (hősugárzás a felületi hőmérséklet függvénye. Statikus megfigyelés a sugárzás mesterséges megszakításával, pl. forgótárcsával.

Alkalmazás pl. mozgásdetektor, piroelektromos IR vidikon

45

MOZGÁS ÉRZÉKELÉS



46

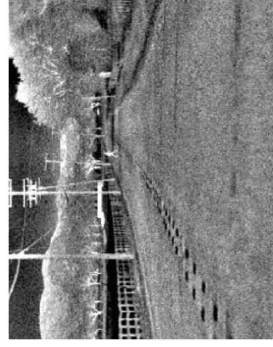
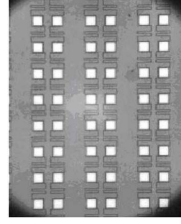
DETECTOR ARRAYS

1-D linear arrays:

infrared gas detectors arrays:
capnography

2-D arrays:

high quality IR images
fire fighting
land mine detection
process control
facial recognition
traffic control



FABRICATION TECHNOLOGY

Two main concepts:

Hybride assembly

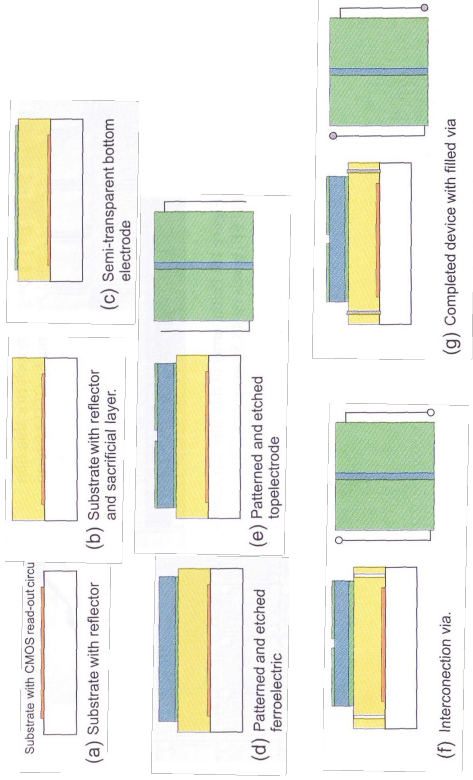
Thermal insulation → cantilever formed using micromachining techniques

Micromachining techniques:

Bulk micromachining → linear arrays

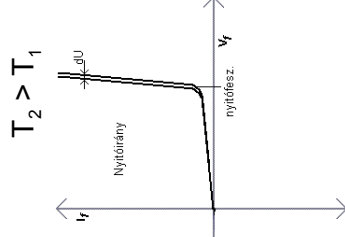
Surface micromachining → 2D arrays

Fabrication process of a pyroelectric TFFE (thin film ferroelectric) pixel



DIÓDÁS HŐMÉRSÉKLETÉRZÉKELŐ

A legegyszerűbb p-n átmenetes hőérzékelő a félvezető dióda. Ezeket széles körben használják, mert olcsók, és a $-50...+150^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékleti tartományt elfogadható linearitással és üzembiztosan mérik. Az érzékelő időállandója a dióda hőtehetlenségétől függ és hűtőborda segítségével szinte tetszőlegesen növelhető



DIÓDA (PN ÁTMENET) HŐMÉRSÉKLETÉRZÉKELŐ

Nyitóirányban előfeszített és állandó árammal átjárt pn átmeneten eső feszültség függ a hőmérséklettől, a hőmérséklet növekedésével csökken. Ennek oka a pn átmenet telítési áramának hőmérsékletfüggése

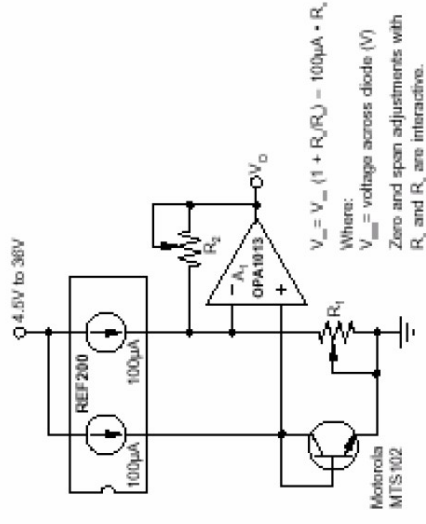
$$I_{\text{sat}} \sim n_i^2 \sim \exp(-E_G/kT)$$

Si alapanyagra szobahőmérséklettől nem túl távol

$$(dU_D/dT) = \text{const} \oplus -2 \text{ mV/K}$$

50

MÉRŐKAPCSOLÁS



51

52

TRANZISZTOR MINT ÉRZÉKELŐ

A diódákhoz hasonlóan a tranzisztor is alkalmazható hőmérséklet érzékelésre. Ekkor az emitter-bázis nyitófeszültség hőmérsékletfüggését mérjük úgy, hogy a kollektoráramot állandó értéken tartjuk, és a tranzisztor földelt bázisú kapcsolásban működtetjük. A tranzisztoroknál szűk a hőmérsékletfüggés lineáris tartománya, viszont a kollektoráram változtatásával különböző hőmérséklettartományokra állítható be a linearitás.

53

BIPOLÁRIS TRANZISZTOROS ÉRZÉKELŐ

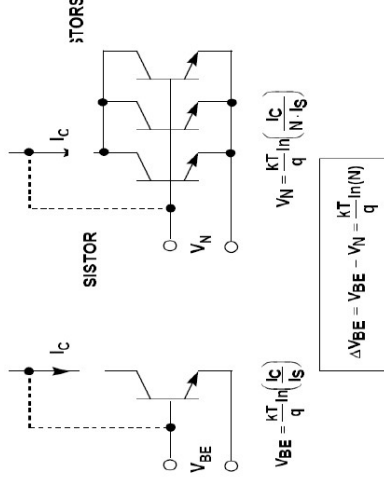
Bipoláris tranzisztorok felhasználása hőmérsékletmérésre:

- Két tranzisztor (az emitterek felülete A1 és A2) azonos árammal (áramtűkör) táplálunk
- a bázis-emitter feszültségek különbsége már csak a geometriai arányokat tartalmazza

$$\Delta U = \frac{kT}{q} \cdot \ln \left(\frac{A_2}{A_1} \right)$$

55

BÁZIS-EMITTER DIÓDA SZENZOR



Tranzisztoroknál a nyitóirányú bázis-emitter dióda I_C - U_{BE} karakterisztikáját lehet felhasználni.

54

VÉGE

56

ÉVKÖZI DOLGOZAT: VÁLASZTHATÓ TÉMÁK

1. Nyomásérzékelő alkalmazás: gépkocsi abroncs nyomás
2. Integrált mikroelektronikai bolométeres/termoelemes sugárzásérzékelő
3. Mikrofluidikai eszközök MEMS technológiával
4. CMOS optikai (kép) érzékelők
5. Vérmérés érzékelő
6. Nukleáris sugárzás érzékelők
7. Ultraibolya sugárzásérzékelő
9. MEMS giroszkópok
9. GMR (óriás mágneses ellenállásváltozás) alapú érzékelők
10. Pásztafőzőszondás mikroszkóp (STM, AFM)
11. Infravörös optikai érzékelők, alkalmazások
12. Mozgásérzékelők (mikrohullámú, piroelektromos)
13. Érzékelő alkalmazások: robotika
14. Akusztikus hullámok érzékelése (mikrofonok)
15. Piroelektromos detektorok