



MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

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

1. ELŐADÁS

2008/2009 tanév 1. félév

1

1. ELŐADÁS

1. Általános bevezetés az 1. félévhez
2. Az érzékelőkkel kapcsolatos alapfogalmak áttekintése
3. Érzékelők csoportosítása és általános tulajdonságai

2

ÁLTALÁNOS BEVEZETÉS

1. A mikroelektronikai érzékelők tantárgy
2. A tantárgy időbeli beosztása
3. Az 1. félév tematikája
4. Kötelező és ajánlott irodalom
5. Félév végi követelmények

A TANTÁRGY CÉLKITŰZÉSEI

A leendő villamosmérnökök megismertetése a klasszikus és a mikroelektronikai szenzorok (érzékelők) és mérő-átalakítók működésének fizikai alapjaival, az eszközök felépítésével és működésével, az alkalmazásukhoz szükséges jelkondicionáló elektronikus áramkörök tulajdonságaival és tervezésével.

4

TEMATIKAI ÖSSZEFOGLALÓ

1. Klasszikus és mikroelektronikai szenzorok tulajdonságai, karakterisztikái, működési mechanizmusai.
2. A mikroelektronikai szenzorok anyagai és technológiái.
3. A szenzorok működtető és jelfeldolgozó áramkörei.
4. Mechanikai (erő, deformáció, nyomás, gyorsulás), hőtani, optikai (fény), mágneses és sugárzás érzékelők. Gáz-, kémiai-, és biológiai érzékelők. Száloptikai érzékelők.
5. Beavatkozók (aktuátorok).
6. Autonóm (tápellátás szempontjából) szenzorok, távérzékelés.
7. Kitekintés: nanotechnológiai és nanoelektronikai érzékelők.

5

AZ 1. FÉLÉV TEMATIKAI VÁZLATA ÉS ISMERETANYAGA

1. Érzékelők általános tulajdonságai. Érzékelő típusok, karakterisztikák, jellemző paraméterek, szerkezeti jellemzők. Érzékelők működési mechanizmusai.
2. Mikroelektronikai érzékelőkben felhasznált félvezető tulajdonságok és jelenségek. A szilícium mint (mikro)mechanikai anyag tulajdonságai.
3. Mikroelektronikai és mikroelektromechanikai (MEMS) érzékelők és rendszerek előállítása és kialakítása. Főbb technológiai lépések.

6

AZ 1. FÉLÉV TEMATIKAI VÁZLATA ÉS ISMERETANYAGA (FOLYT.)

4. Hőmérsékletérzékelők. Hőtani alapok, hőátadási jelenségek. Termoelektromos jelenségek. Klasszikus hőmérséklet és hőmérsékleti sugárzás érzékelők. Ellenállás (fémellenállás illetve oxidtermisztor) hőmérsékletérzékelők. Pn-átmenetes hőmérséklet-érzékelők. Infravörös sugárzásérzékelők. Hőérzékelő szenzorok illesztő és mérőáramkörei és elektronikus kapcsolásai.

5. Fényérzékelők. Fizikai alapok, fény és félvezető kölcsönhatása. A megvilágított pn átmenet fizikája. Fotoellenállások, fényelemek és fotodiódák. Bolométerek, pirotektromos detektorok. Fényérzékelők illesztő és mérőáramkörei.

7

AZ 1. FÉLÉV TEMATIKAI VÁZLATA ÉS ISMERETANYAGA (FOLYT.)

6. Nyomás-, erő, és deformációérzékelők. Klasszikus mérési és érzékelési módszerek. Félvezető- illetve mikroelektronikai nyomás és erőérzékelők. A piezorezisztív effektus. Piezorezisztív és kapacitív elvű nyomásérzékelők. Mérő és illesztő kapcsolások, hőmérsékletkompenzálás

7. Sugárzásérzékelők. Sugárzás intenzitás és besugárzás (dózis) alapfogalmi és mértékegységei. Radioaktív, nukleáris és ionizáló sugárzások tulajdonságai, biológiai és élettani hatások. Sugárzás és anyag kölcsönhatása, a sugárzás-érzékelés fizikai elvei. Félvezető és mikroelektronikai sugárzásérzékelők és elektronikus áramkörei.

8

AZ 1. FÉLÉV TEMATIKAI VÁZLATA ÉS ISMERETANYAGA (FOLYT.)

8. Mágneses érzékelők. Fizikai működési elvek. Hall-érzékelő, magnetorezisztor, magnetotranzisztor. A mágneses érzékelők alapanyagai és konstrukciói. Lineáris elmozdulás és helyzet, szögelfordulás és szöghelyzet érzékelése. Beavatkozás nélküli árammérés. Magnetometria, ferromágneses tárgyak detektálása. Mágneses érzékelők mérő és jelfeldolgozó áramkörei. Mágneses érzékelők jellegzetes alkalmazásai.

9

KÖTELEZŐ IRODALOM (1. ÉS 2. FÉLÉV)

Hahn Emil, Harsányi Gábor, Lepsényi Imre, Mizsei János, *Érzékelők és beavatkozók*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1999.

Szentiday Klára, Dávid Lajos: *Mikroelektronikai szenzorok és alkalmazástechnikájuk*, Marktech, Budapest, 2000.

SensEdu – an Internet Based Short Course in Sensorics Letölthető: BME Elektronikus Technológia Tanszék honlapjáról: www.ett.bme.hu/sensedu

10

AJÁNLT IRODALOM (1. ÉS 2. FÉLÉV)

S. M. Sze (szerk.): *Semiconductor Sensors*, Wiley, New York, 1994.

Mojzes Imre (szerk.): *Mikroelektronika és mikroelektronikai technológia*, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1994. (6. fejezet, 243-256 old., 12.1-12.3. fejezet, 383-393 old.)

Mizsei János: *Félvezetős kémiai érzékelők*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1987.

Lajta György, Szép Iván (szerk.): *Fénytávközlő rendszerek és elemeik*, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1987. (5. fejezet, 219-266 old. Fénydetektorok fizikája és technológiája.)

Mojzes Imre, Kókényesi Sándor: *Fotonikai anyagok és eszközök*, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 1997. (3.3. fejezet, 163-178 old., 6.3. fejezet, 289-305 old.)

11

FOLYÓIRATCIKKEK (VÁLOGATÁS)

Almási István, és tsai, *Piezorezisztív szilícium nyomásérzékelők*, *Mérés és Automatika* **32** (4) 132 (1984).

R. Amador, és tsai, *Félvezető hőmérséklet-érzékelők linearizálása*, *Híradástechnika* **39** (7) 325 (1988).

H. P. Baltes, R. S. Popovic, *Integrated semiconductor magnetic field sensors*, *Proc. IEEE* **74** (8) 1107 (1986).

J. Bryzek et al., *Micromachines made of silicon*, *IEEE Spectrum* **31** (5) 20 (1994).

Cser László, *Gyorsulásmérők alkalmazási lehetőségeinek kutatása*, *Híradástechnika* **55** (11) 24 (2001).

Inzelt György, *A mérőkötől a nanoméregig*, *Természet Világa* **134** (9) 404 (2003).

12

FOLYÓIRATCIKKEK (VÁLOGATÁS)

IEEE Spectrum **35** (9) September 1998, *The E-nose, silicon scents a need*, special report.
Lendvay Ödön és tsai, *III-V fotodiódák és detektorok fejlesztése*, *Finommechanika-Mikrotechnika* **24** (3) 65 (1985).
Mizsei János, Kolonits Pálné, *Vastagréteg technológiával megvalósítható gázérzékelők*, *Mérés és Automatika* **32** (4) 143 (1984).
Pásztor Gyula, és tsai, *Terjedési ellenállás elvén alapuló hőérzékelő*, *Híradástechnika* **36** (4) 171 (1985).
Pásztor Gyula, Erlaky György, Hahn Emil, *Félvezető optoelektronikai érzékelők*, *Mérés és Automatika* **32** (4) 127 (1984).

13

FOLYÓIRATCIKKEK (VÁLOGATÁS)

Riesz Ferenc, *Korszerű fotodiódák vegyület-félvezetőkkel*, *Elektronikai Technológia - Mikrotechnika* **29** (1) 1 (1990).
Somogyi Károly, Pődör Bálint, Bodó Boglárka, *Félvezető anyagok termoelektromos feszültségének mérése*, *Mérés és Automatika* **21** (4) 130 (1973).
Szabó János, *Fényvezető szál érzékelők*, *Mérés és Automatika* **32** (4) 137 (1984).
Szentpáli Béla, *Termisztorok és bolométerek zajhatárolt érzékenysége*, *Híradástechnika* **62** (10) 35 (2007).
P. A. Tove, *Review of semiconductor detectors for nuclear radiation*, *Sensors and Actuators* **5** () 103 (1984).
Vásárhelyi Gábor, és tsai, *Tapintásérzékelő tömbök – tervezés és jelfeldolgozás*, *Híradástechnika* **62** (10) 47 (2007).

14

AZ ÉRZÉKELŐK FOGALMA, CSOPORTOSÍTÁSA, JELLEMZŐI

15

ÉRZÉKELŐ, SZENZOR

A magyarban is használt **szenzor** (angol **sensor**) a latin *sentire*-ből ered, melynek jelentése észlel, érzékel.

Egy lehetséges meghatározás:

A szenzor egy eszköz, mely reagál (válaszol) egy fizikai (vagy kémiai) behatásra (gerjesztésre, stimulusra, pl. hő, fény, hang, nyomás, mágnesség, mozgás, stb.) és továbbítja a válaszjelet mérési eredményként, vagy egy folyamat beavatkozó-jeleként.

A szenzor vagy érzékelő képes tehát egy bemeneti jelet (vagy energiát) detektálni, és azt egy megfelelő kimeneti jellel (vagy energiává) alakítani.

16

SZENZOR, TRANSDUKTOR

Közeli rokonkifejezés a **transzduktor** vagy átalakító (angol **transducer**), mely a latin *transducere* (jelentése átvezet) szóra vezethető vissza. A szenzor és a transzduktor kifejezéseket sokszor szinonimaként használják.

17

TRANSDUCERS, SENSORS, ACTUATORS

- **Transducer Transzduktor**
 - Eszköz mely egy elsődleges energiaalakot megfelelő jellel vagy más alakú energiává alakít át
 - **Primary Energy Forms:** mechanical, thermal, electromagnetic, optical, chemical, etc.
 - Két fajtája van: **sensor** vagy **actuator**
- **Sensor** (pl. hőmérő)
 - eszköz mely egy jelet vagy gerjesztést mér/érezkel
 - információt szerez a „való világról” (“real world”)
- **Actuator** (pl. fűtőszál)
 - Eszköz, mely jelet vagy gerjesztést hoz létre



ÉRZÉKELŐ LEHETSÉGES DEFINÍCIÓJA

Érzékelő (szenzor):

- mérendő mennyiséget vagy paramétert információhordozó jellé alakítja
- régebben: elektromos jel az információhordozó
- ma: optikai érzékelők is elterjedtek, általánosítani kell

19

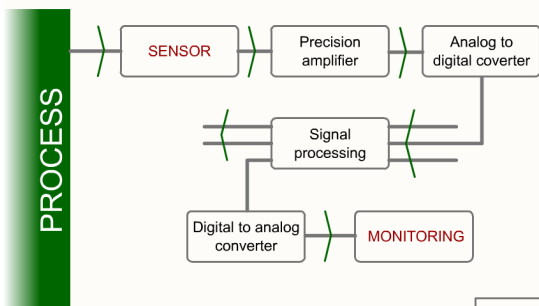
MÉRŐESZKÖZ/RENDSZER

Az érzékelők alkalmazhatók egyszerű **mérőeszközökben** vagy bonyolultabb **mérőrendszerekben**, valamint visszacsatolást tartalmazó **szabályozó rendszerekben**.

Mérőrendszerben az érzékelő jele feldolgozásra és maga a mérendő mennyiség pedig kijelzésre kerül.

20

MÉRŐESZKÖZ/RENDSZER



Érzékelő és kijelző elem mérőkörben. Az érzékelő jele feldolgozásra, a mérendő mennyiség pedig kijelzésre kerül.²¹

→ Definitions

SZABÁLYOZÓ RENDSZER

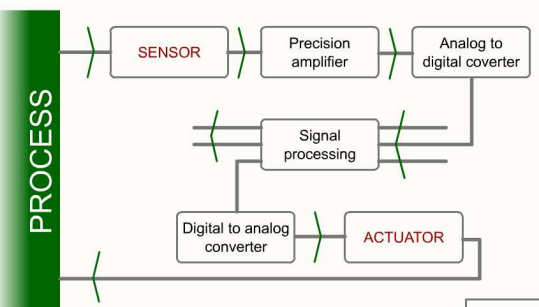
Szabályozó rendszerben kijelzés nem feltétlenül szükséges. A megfigyelt folyamatba azonban a beavatkozás mindig megtörténik a mért/érezkelt paraméter módosítása érdekében.

Beavatkozást végző eszköz: **beavatkozó**, illetve **aktuátor**.

A **beavatkozó/aktuátor** a kapott jelek függvényében valamilyen változtatást végez a megfigyelt rendszerben.

22

SZABÁLYOZÓ RENDSZER



Érzékelő és beavatkozó elem a szabályozó körben. A beavatkozó a kapott jelek függvényében valamilyen változtatást végez a megfigyelt rendszerben.

→ Definition

23

ÉRZÉKELŐK CSOPORTOSÍTÁSA

ÉRZÉKELŐK CSOPORTOSÍTÁSA:

Az érzékelők különböző szempontok alapján osztályozhatók és csoportosíthatók.

- mérendő mennyiség szerint,
- a jel természete alapján,
- a jel kialakításában szereplő kölcsönhatások szerint,
- aszerint, hogy kell-e külső energiaforrás vagy nem.

24

CSOPORTOSÍTÁS A MÉRENDŐ MENNYISÉG SZERINT

Mechanikai érzékelők:

- helyzet, elmozdulás, erő, gyorsulás, nyomás, áramlási sebesség, fordulatszám, ultrahang és hanghullámok, stb.

Termikus mennyiségek:

- hőmérséklet, hőmennyiség, hőáram, stb.

Elektromos és mágneses mennyiségek:

- elektromos és mágneses tér, töltés, feszültség, áram, ellenállás, stb.

25

CSOPORTOSÍTÁS A MÉRENDŐ MENNYISÉG SZERINT

Sugárzásérezékelők:

- elektromágneses sugárzás (rádió-, mikro-hullám, fény, Röntgen és gamma-sugárzás), korpuszkuláris sugárzás (alfa-, betasugár, ionizált és semleges részecskék, neutronok), stb.

Kémiai mennyiségek:

- semleges és töltött (ion) komponensek koncentrációja és aktivitása különböző közegekben, stb.

Biológiai (orvosbiológiai) érzékelők:

- élő szervezetekre jellemző speciális paraméterek, stb.

26

CSOPORTOSÍTÁS JEL ALAPJÁN

Az érzékelőben energiafajta közötti átalakítás megy végbe. Az alábbi tíz energiaféleség különböztethető meg:

1. Atom energia (nukleonok és elektronok közötti erő)
2. Elektromos energia
3. Gravitációs energia
4. Mágneses energia
5. Tömeg-energia (relativisztikus)
6. Mechanikai energia
7. Molekuláris energia
8. Magenergia (nukleonok közötti erő)
9. Sugárzási energia (elektromágneses hullámok)
10. Termikus energia (atomok és molekulák mozgási energiája)

27

CSOPORTOSÍTÁS A JELEK ALAPJÁN

Minden energiaforráshoz egy jel rendelhető. Gyakorlati szempontok alapján nem tekintjük a tömeg- illetve mag-energiát. Az atom- és molekuláris energia összevonható, ez eredményezi a kémiai jelet. A gravitációs és a mechanikai energia egyaránt a mechanikai jelhez kapcsolható.

Tehát mérés-technikai szempontból hat jelféleség van:

1. Elektromos jel
2. Kémiai jel
3. Mágneses jel
4. Mechanikai jel
5. Sugárzási jel
6. Termikus jel

28

CSOPORTOSÍTÁS KÖLCSÖNHATÁS SZERINT

A jelkialakításban szerepet játszó kölcsönhatás típusa szerint

- fizikai érzékelők,
- kémiai érzékelők,
- bioérezékelők.

A bioérezékelők olyan érzékelők, melyek működése az élő szervezetekre jellemző specifikus reakción alapul. Pl. a véroxigén-érezékelő NEM bioszenzor, hanem egy, az orvosbiológiai célokra kialakított kémiai érezékelő. Ugyanakkor az enzimatis reakciókon alapuló alkohol-érezékelő bioszenzor, még akkor is, ha azt ipari folyamatokban használják oldatok összetételének meghatározására.

29

GENERÁTOR ÉS MODULÁTOR TÍPUSÚ ÉRZÉKELŐK

Generátor (vagy aktív) típusú érezékelők

- nem igényelnek külön energiaforrást, a megfigyelt közegből nyerik a jelek előállításához szükséges energiát.

Modulátor (vagy passzív) típusú érezékelők

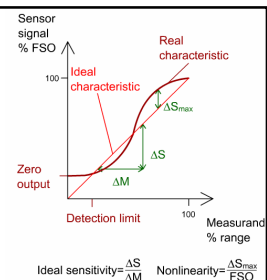
- olyan paraméterek változnak meg bennük az érezékelés során, melynek detektálásához, illetve megméréséhez külső energiaforrásra van szükség.

30

ÉRZÉKELŐK ÁLTALÁNOS JELLEMZŐI

31

Statikus karakterisztika
A mérendő jel és az érzékelő kimeneti jele közötti függvénykapcsolat



Végkitérés
FSO full scale output

Nullhiba (offset)

A mérendő mennyiség nulla értéke mellett mért kimenőjel.

Érzékenység (válaszképesség)

A karakterisztika meredeksége. Lineáris karakterisztika esetén állandó. Nemlineáris karakterisztika esetén a bemeneti paraméter függvénye.

32

Linearitás

Lineáris érzékelő, a be és kimeneti jelek megváltozásai között arányosság áll fenn.

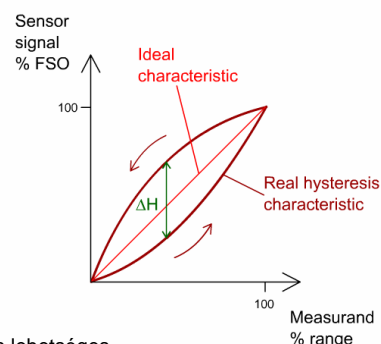
Linearitási hiba

A valódi karakterisztika (kalibrációs görbe) maximális eltérése a feltételezett lineáris (ideális) karakterisztikától az adott tartományban.

Hiszterézis hiba

A kimeneti jel maximális lehetséges eltérése egy adott tartományban növekvő, illetve csökkenő mérendő paraméter változásnál.

33



Hiszterézis hiba

A kimeneti jel maximális lehetséges eltérése egy adott tartományban növekvő, illetve csökkenő mérendő paraméter változásnál.

34

Érzékelés alsó határa (detektálási küszöb)

A mérendő paraméter azon legkisebb értéke, mely még biztosít mérhető kimeneti jelváltozást.

Felbontás

A mérendő mennyiség legkisebb mérhető változása.

Nullponteltolódás (drift)

A nullhiba változása a külső feltételek (pl. hőmérséklet-változás, hosszú idejű tárolás, stb.) mellett.

Érzékenység eltolódás

Hasonlóan definiálható mint a drift.

Ismétlési (reprodukciós) hiba

Eltérés a kimeneti jelben ugyanazon mérendő jel és azonos egyéb körülmények között ismételt mérésnek.

Csereszabotosság mértéke

Két azonos típusú érzékelő elem felcserélése által a kimeneti jelben okozott eltérés (hiba).

Szelektivitás

A mérendő mennyiség mellett más paraméterek változására létrejövő kimeneti jelváltozás mértéke.

Beállási idő

Időtartam mely alatt a válaszjel tranziense egy adott hibahatáron belül eléri az állandósult értékét a mérendő paraméter ugrásszerű megváltozása esetén.

Élettartam

Az üzembehelyezéstől számított időtartam mely alatt az érzékelő a megadott specifikációk szerint megbízhatóan működtethető.

36

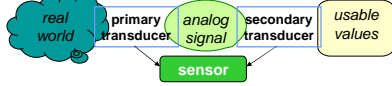
Sensor Systems

Typically interested in **electronic sensor**

- convert desired parameter into electrically measurable signal

General Electronic Sensor

- **primary transducer**: changes "real world" parameter into electrical signal
- **secondary transducer**: converts electrical signal into analog or digital values

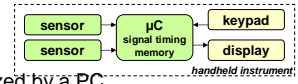


Typical Electronic Sensor System

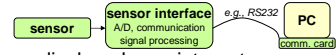


Example Electronic Sensor Systems

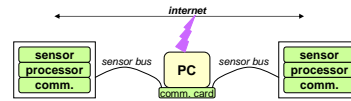
- Components vary with application
 - digital sensor within an instrument



- analog sensor analyzed by a PC



- multiple sensors displayed over internet



Primary Transducers ELSŐDLEGES ÁTALAKÍTÓK

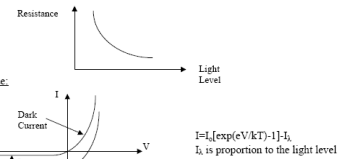
- Conventional Transducers **Hagyományos átalakítók**
large, but generally reliable, based on older technology
 - thermocouple: **temperature difference**
 - compass (magnetic): **direction**
- Microelectronic Sensors **Mikroelektronikai érzékelők**
millimeter sized, highly sensitive, less robust
 - photodiode/phototransistor: **photon energy (light)**
 - infrared detectors, proximity/intrusion alarms
 - piezoresistive pressure sensor: **air/fluid pressure**
 - microaccelerometers: **vibration, Δ-velocity (car crash)**
 - chemical sensors: **O₂, CO₂, Cl, nitrates (explosives)**
 - DNA arrays: match **DNA sequences**

PÉLDÁK ELSŐDLEGES ÁTALAKÍTÓKRA

- Light Sensor

- photoconductor

Photoconductor: (Light sensitive semiconductor resistor)



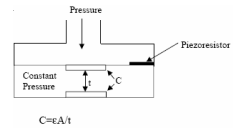
- photodiode

$$I = I_s [\exp(eV/kT) - 1] - I_s$$

I_s is proportion to the light level

- membrane pressure sensor

- resistive
- capacitive



Connecting Smart Sensors to C/Network INTELLIGENS ÉRZÉKELŐK

- "Smart sensor" = sensor with built-in signal processing & communication
 - e.g., combining a "dumb sensor" and a microcontroller
 - **Intelligens érzékelő: érzékelő, integrált jelfeldolgozó és jeltovábbító áramkörökkel**
- Data Acquisition Cards (DAQ)
 - PC card with analog and digital I/O
 - interface through LabVIEW or user-generated code

VÉGE

(AZ ELSŐ ELŐADÁSNAK,
ILLETVE A VETÍTÉSNEK...)