



MIKROELEKTRONIKAI ÉRZÉKELŐK I

Dr. Pődör Bálint

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

8. ELŐADÁS: MECHANIKAI ÉRZÉKELŐK I

2008/2009 tanév 1. félév

1

8. ELŐADÁS

1. Mechanikai érzékelők
2. A Si mint mechanikai anyag, MEMS
3. Piezorezisztív effektus
4. Si alapú nyomásérzékelők

Az előadás részben felhasználja Ádám Antalné (MTA MFA) hasonló témájú előadásának anyagát.

2

MECHANIKAI ÉRZÉKELŐK



Mechanikai mennyiségeket (erő, súly, tömeg, elmozdulás, gyorsulás, nyomás, áramlási sebesség, folyadék szint, sűrűség...) mérnek.

A mérés közvetlenül a szenzor paramétereire gyakorolt hatáson keresztül történik, ez többnyire szintén mechanikai természetű.

Membrán → deformáció → jelátalakítás

Csoportosítás:

- A mérendő mennyiség szerint (pl. nyomásmérő, gyorsulásmérő)
- A jelátalakítás módszere szerint: optikai, piezoelektromos, piezorezisztív, kapacitív

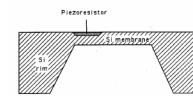
3

A SZENZOROK ÁLTALÁNOS FELÉPÍTÉSE

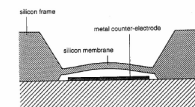


Piezorezisztív érzékelők

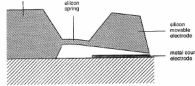
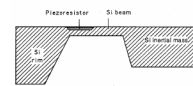
Membrán típusú szenzor:



Kapacitív érzékelők



Befogott tartó típusú szenzor:



4

Si ALAPÚ MECHANIKAI ÉRZÉKELŐK



A Si alapú mechanikai érzékelők előnyös tulajdonságai

- jól meghatározott elektromos tulajdonságok mellett rendkívül jó mechanikai tulajdonságok
- jelentős a méretcsökkentés lehetősége
- tömeggyárthatóság
- integrálhatóság

5

PIEZOREZISZTÍV ÁTALAKÍTÓK



piezorezisztivitás:

mechanikai feszültség \implies vezetőképesség változás

A Si alapú piezorezisztív érzékelők előnyei:

- a fémekhez képest több mint egy nagyságrenddel nagyobb érzékenység
- kiváló mechanikai tulajdonságok
- az érzékelő elem és a membrán egybe integrálható, nincs hiszterézis, és paraméter tisztaság
- a mechanikai feszültség tökéletesen átadódik a membránból az átalakító elembe
- az ellenállások közvetlenül a meghajló, illetve csavarodó elem legfelső rétegében vannak elhelyezve, azaz azon a helyen, ahol a keletkezett mechanikai feszültség maximális
- az ellenállások értéke pontosan beállítható, ez a Wheatstone hidas jelfeldolgozásban különösen előnyös

6

A Si PIEZOREZISZTÍV TULAJDONSÁGAI



Matematikai modell:

Három dimenziós anizotróp kristályra az elektromos tér vektora (E) és az áram vektor (i) közötti kapcsolatot:

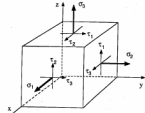
$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 & \rho_6 & \rho_5 \\ \rho_6 & \rho_2 & \rho_4 \\ \rho_5 & \rho_4 & \rho_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix}$$

3x3 elemű fajlagos ellenállás tenzor, kísérleti eredmények alapján a 9 elem 6-ra redukálható

Piezoellenállás a kristálytani irányokhoz illesztett koordinátarendszerben
Si: köbös kristály szerkezet, a derékszögű koordináta rendszert a kristály <100> irányához illesztjük.

ρ_1, ρ_3 és ρ_2 az egyirányú, ρ_2, ρ_3 és ρ_6 a kereszt irányú ellenállások.
Mechanikai feszültség mentes Si-ra $\rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho$, és ρ_4, ρ_5 és ρ_6 egyenlő 0-val

$$\begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \rho_3 \\ \rho_4 \\ \rho_5 \\ \rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho \\ \rho \\ \rho \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_5 \\ \Delta\rho_6 \end{bmatrix}$$



A dx, dy, dz méretű elemi kockára ható feszültség komponensek

7

A PIEZOREZISZTIVITÁS



A piezorezisztívitás a fenti 6 komponensnek a $\Delta\rho/\rho$ változásával írható le, a változás a 6 feszültség komponens ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3$) hatására történik:

$$\frac{1}{\rho} \begin{bmatrix} \Delta\rho_1 \\ \Delta\rho_2 \\ \Delta\rho_3 \\ \Delta\rho_4 \\ \Delta\rho_5 \\ \Delta\rho_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_{11} & \pi_{12} & \pi_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{12} & \pi_{11} & \pi_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \pi_{13} & \pi_{13} & \pi_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \pi_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$$

6x6-os mátrix, elemei a π_{ij} piezorezisztív együtthatók, mértékegységük Pa⁻¹
A Si köbös kristályszerkezeté miatt 3 különböző együttható marad: π_{11}, π_{12} és π_{44}

feszültséges, köbös szerkezetű kristályrácsban az elektromos térerő komponensei:

$$\begin{aligned} E_1 &= \rho i_1^2 + \rho \pi_{11} \sigma_1 i_1^2 + \rho \pi_{12} (\sigma_2 + \sigma_3) i_1^2 + \rho \pi_{44} (i_2 i_3 + i_3 i_2) \\ E_2 &= \rho i_2^2 + \rho \pi_{11} \sigma_2 i_2^2 + \rho \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_3) i_2^2 + \rho \pi_{44} (i_1 i_3 + i_3 i_1) \\ E_3 &= \rho i_3^2 + \rho \pi_{11} \sigma_3 i_3^2 + \rho \pi_{12} (\sigma_1 + \sigma_2) i_3^2 + \rho \pi_{44} (i_1 i_2 + i_2 i_1) \end{aligned}$$

tisztán egyirányú hatás az <100> irányban

mechanikai feszültség mentes állapot

keresztirányú hatások

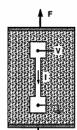
8

PIEZOREZISZTÍV EGYÜTTHATÓ



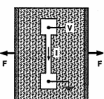
Longitudinális és tranzverzális piezorezisztív együttható

A szenzorokban leggyakrabban alkalmazott eseteket reprezentálják
Longitudinális



az E^* elektromos erőtér,
az I^* áram és
a σ^* feszültség *egy tengelyűek*

Tranzverzális



az E^* elektromos erőtér és
az I^* áram *egy tengelyűek*,
a σ^* feszültség *merőleges* mindkettőre

A * a tetszőleges koordinátarendszerre utal

9

PIEZOREZISZTÍV EGYÜTTHATÓ



Koordináta transzformációval a mechanikai feszültség és az elektromos erőtér közötti összefüggés tetszőleges, derékszögű koordinátarendszerben meghatározható.

A longitudinális és tranzverzális együtthatók a gyakorlatilag szóba jöhető irányokban:

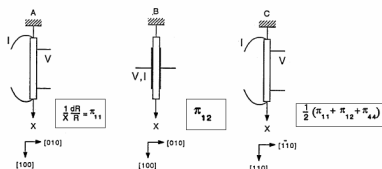
Longitudinal direction	π_{ij}	Transverse direction	π_{ij}
100	π_{11}	010	π_{12}
001	π_{11}	110	π_{12}
111	$1/3 (\pi_{11} + 2\pi_{12} + 2\pi_{44})$	110	$1/3 (\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44})$
110	$1/2 (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$	111	$1/3 (\pi_{11} + 2\pi_{12} - \pi_{44})$
110	$1/2 (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$	001	π_{12}
110	$1/2 (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})$	110	$1/2 (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})$

10

A PIEZOREZISZTÍV EGYÜTTHATÓ MÉRÉSE



A piezorezisztív együttható mérése Smith, *Physical Rev.* 94, (1954)



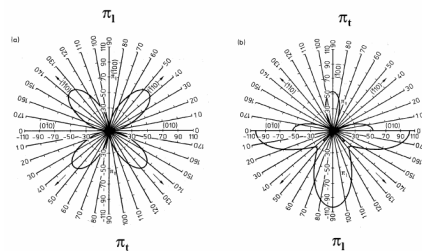
Materiál	ρ (Ωcm)	π_{11} (10 ⁻¹¹ cm ² dyn ⁻¹ or 10 ⁻¹¹ Pa ⁻¹)	π_{12} (10 ⁻¹¹ cm ² dyn ⁻¹ or 10 ⁻¹¹ Pa ⁻¹)	π_{44} (10 ⁻¹¹ cm ² dyn ⁻¹ or 10 ⁻¹¹ Pa ⁻¹)
Szilikon				
p-típus	7.6	+6.6	-1.1	+138.1
n-típus	11.7	-102.2	+13.4	-13.6
Cerium-germánium				
p-típus	1.1	-5.7	+3.2	+96.7
n-típus	15.0	-100.8	+5.2	+46.3
Ge				
n-típus	1.5	-2.3	-3.2	-138.1
p-típus	5.7	-2.7	-3.0	-136.8
Si				
n-típus	9.9	-4.7	-5.6	-137.9
p-típus	16.6	-5.2	-5.5	-138.7

11

PIEZOREZISZTÍV EGYÜTTHATÓ ANIZOTRÓPIÁJA SI-BAN



A longitudinális és tranzverzális piezorezisztív együttható az <100> síkon.



p-típusú Si

n-típusú Si

12

PIEZOREZISZTÍV EGYÜTTHATÓ: KONCENTRÁCIÓ ÉS HŐMÉRSÉKLETFÜGGÉS

$\pi(N, T) = \pi_0 P(N, T)$

A piezorezisztívitas csökken növekvő koncentrációval, és növekvő hőmérséklettel. A gyakorlatban sokszor a kis hőmérsékleti koeficiens érdekében olyan koncentrációt választanak, ahol az érzékenység kisebb.

13

ELLENÁLLÁS VÁLTOZÁS

A mechanikai feszültség hatására létrejövő ellenállás változás

A mechanikai feszültségből eredő ellenállás változás longitudinális és tranzverzális összetevőből áll:

$$\Delta R/R = \sigma_1 \pi_1 + \sigma_2 \pi_2$$

A membrán és hid szerkezetek kialakításánál jellemző kristálytani irányok:

a Si szelet felülete általában <100> síkkal határolt, és a kimart struktúra szeleit <100> és <111> síkok határolják, az élek pedig (110) irányúak, ezért a piezorezisztorok orientációja szintén (110) lesz.

Ebben a kristálytani irányban:

$$\pi_1 = (\pi_{11} + \pi_{12} + \pi_{44})/2 \quad \pi_2 = (\pi_{11} + \pi_{12} - \pi_{44})/2$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(\pi_{44})}{2} (\sigma - \sigma) \quad \text{p típusú ellenállásra az (110) irányban}$$

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{(\pi_{11} + \pi_{12})}{2} (\sigma + \sigma) \quad \text{n típusú ellenállásra az (110) irányban}$$

2-3-szor nagyobb nyomásérzékenység érhető el a p típusú ellenállással, mint az n típusival!

14

WHEATSTONE HÍD ELRENDEZÉS

Wheatstone hid elrendezés

2 ellenállás longitudinálisan, R_1, R_2
2 ellenállás tranzverzálisan, R_3, R_4

A hid kimenő feszültsége:
$$\Delta V = \frac{\Delta R}{R} V_0$$

Az érzékenység feszültség generátoros meghajtásnál:
$$S = \frac{\Delta V}{\Delta P} \frac{1}{V_0} = \frac{\Delta R}{\Delta P} \frac{1}{R}$$

Az érzékenység áramgenerátoros meghajtásnál:
$$S = \frac{\Delta V}{I_0 \Delta P} = \frac{\Delta R}{\Delta P}$$

15

HŐMÉRSÉKLETFÜGGÉS

A piezorezisztív érzékelők hőmérsékleti együtthatói

TCO Temperature Coefficient of Offset, a nullpont hőmérsékleti együtthatója. Egyszerű esetben az ellenállások hőmérsékletfüggése, a Wheatstone hidas mérésben elhanyagolható. Oka lehet-passzíváló réteg, nem megfelelő tokozás

TSO Temperature Coefficient of Sensitivity, az érzékenység hőmérsékleti együtthatója, a piezorezisztívitas a hőfokfüggése miatt

Feszültséggenerátoros meghajtás:
Az érzékenység:
$$S = \frac{1}{2\Delta P} \pi_{44} (\sigma - \sigma)$$

Az érzékenység hőmérsékletfüggése:
$$\frac{\partial S}{\partial T} = \frac{\sigma - \sigma}{2\Delta P} \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} + \frac{\pi_{44}}{2\Delta P} \frac{\partial (\sigma - \sigma)}{\partial T}$$

A hőmérsékleti együttható:
$$TCS = \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{1}{\pi_{44}} \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} \frac{1}{\sigma - \sigma} \frac{\partial (\sigma - \sigma)}{\partial T}$$

Áramgenerátoros meghajtás:
Az érzékenység:
$$S = \frac{1}{2\Delta P} R \pi_{44} (\sigma - \sigma)$$

A hőmérsékleti együttható:
$$TCS = \frac{1}{S} \frac{\partial S}{\partial T} = \frac{1}{\pi_{44}} \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} \frac{1}{R} \frac{\partial R}{\partial T} \frac{1}{\sigma - \sigma} \frac{\partial (\sigma - \sigma)}{\partial T}$$

16

FÜGGÉS AZ ADALÉKKONCENTRÁCIÓTÓL

Az érzékenység és a hőmérsékleti együtthatók függése az adalék koncentrációtól

Két olyan adalékkoncentráció is van, ahol TCS és TCR egyenlő és ellenkező előjelű!

17

SPECIÁLIS SENZOROK

Magas hőmérsékleten és agresszív közegben használható piezorezisztív nyomásmérők

Az egykristályos, egymástól p-n átmenettel elszigetelt piezo ellenállásokkal megvalósított nyomásmérők 120°C-ig üzemeltethetők a megnövekedett szivárgási áramok miatt.

Poli Si-os nyomásmérő:

- „mesa” szerkezet, oxid szigetelés
- -50°C...+200°C működési tartomány
- kis hőmérséklet függés
- kisebb érzékenység

Egykristályos és polikristályos gyémánt piezo ellenállások

18

A KAPACITÍV ÉRZÉKELÉS ELVE



A mérendő mennyiség változását kapacitás változássá alakítják át.

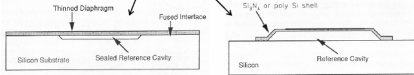
Párhuzamos elektródájú elrendezésben a kapacitás:

$$C_p = \epsilon \frac{A}{d}$$

kis elmozdulásokra, ha a kondenzátor síkkondenzátor marad az elektróda Δd -vel való elmozdulására:

$$\frac{\Delta C}{C} = -\epsilon \frac{\Delta d}{d^2}$$

Kapacitív érzékelők tömbi és felületi mikromechanikai megmunkálással:



Előnyök:

- nagy érzékenység
- a konverzió csak a mechanikai méretektől és a rugalmassági állandótól függ → a hőmérséklet függés csak a Si hőtágulásából adódik

Hátrányai:

- nemlineáris karakterisztika, ez különösen nagy lejtéslőknél van ($w/h > 0.3$), ahol w , a középpont lejtése, h a membrán vastagsága
- a közel lineáris szakaszban nem elanyagolhatóak a szórt kapacitások

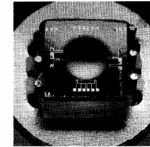
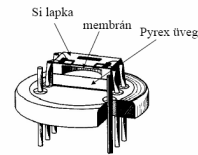
A nemlinearitás a struktúra változtatásával, illetve speciális nemlineáris konverter áramkörrel kiküszöbölhető

19

PÉLDÁK MEGVALÓSÍTOTT ÉRZÉKELŐKRE



Piezorezisztív nyomásmérő



KELLER

működési tartomány: 0,1-1000 bar, több tartományban

kimenő jel: 100-1000mV

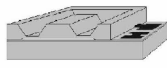
hiszterézis: <0.05% 20 bar-ig, <0.1% 20 bar-1000 bar-ig

linearitási hiba: tip ±0.2% FS, max. 0.5%

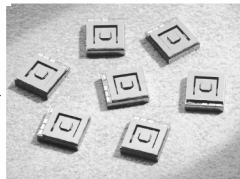
	TCO	TCS
10...50°C	0.05mV/K	0.01%/K
-20...80°C	0.1 mV/K	0.025%/K

20

KAPACITÍV NYOMÁSMÉRŐ



Felső elektróda: anizotrópán mart Si
Alsó elektróda: Si vagy Pyrex üveg
Kivezetés: Al vagy adalékolt poli Si



működési tartomány: 0.05...1.3 bar
hőmérséklet tartomány: -55...80°C
érzékenység: 20fF/mbar
hiszterézis: ±2 mbar
ismétlési hiba: ±2 mbar
TCO: -80ppm/°C

21

NYOMÁS MÉRTÉKEGYSÉGEK

A nyomás SI mértékegysége a **Pascal (Pa)**

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Gyakran használt egység (csak gázok és folyadékok nyomására) a **bar** (megfelel a normál légköri nyomásnak)

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ N/m}^2 = 10^5 \text{ Pa} = 100 \text{ kPa}$$

Blaise Pascal (1623-1662) francia matematikus, fizikus, filozófus

22

NYOMÁS MÉRTÉKEGYSÉGEK

$$1 \text{ bar} = 100 \text{ kN/m}^2 = 100 \text{ kPa}$$

$$1,02 \text{ kp/m}^2 = 1 \text{ at}$$

$$\sim 760 \text{ Hgmm}$$

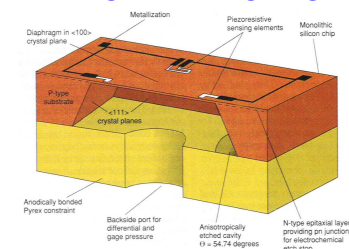
$$10,2 \text{ mH}_2\text{O}$$

$$14,502 \text{ psi}$$

at - technikai atmoszféra
att, atü - technikai atmoszféra túlnyomás
psi - pounds per square inch (USA)

23

MIKROELEKTRONIKAI NYOMÁSÉRZÉKELŐ

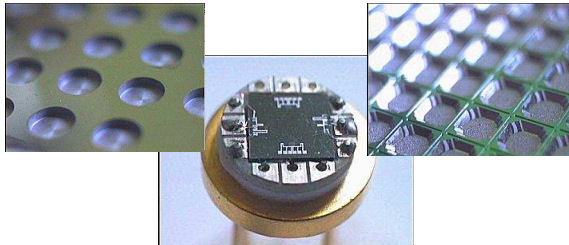


Tömbi mikromegmunkálással készült nyomásérzéklő alkáli hidroxid maróeleggyel kialakított szilícium (n-típusú) membránnal. A membrán behajlásából eredő alakváltozást bór adalékolással (diffúzió) kialakított piezoellenállások érzékelik és alakítják át villamos jellé.

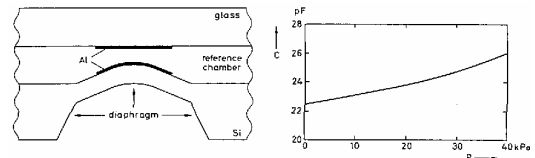
24

Pressure sensors - wafer processing

- piezoresistive (pressure ranges from 0.4bar up 600bar)
 - ion implanted piezoresistors
 - double side alignment
 - KOH backside etching for membrane formation (50-200µm)



KAPACITÍV NYOMÁSÉRZÉKELŐ



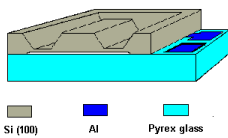
Párhuzamos fegyverzetű kondenzátor. Az egyik egy fémezett üveglap, a másik egy vékony Si membrán, a kettő között néhány µm széles réssel.

Az üveglapot anodikusan kötik a Si-hoz vákuumban, hogy hermetikusan zárt referenciakamrát kapjanak.

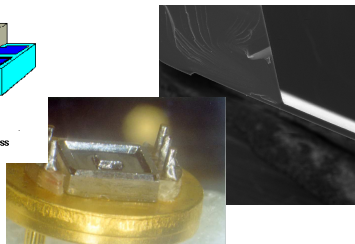
Üveg helyett Si is használható, ami csökkenti a különböző hőmérsékleti tényezők okozta problémát.

A referenciakamra helyett olyan kamra is használható, melyet „szellőzőcsatorna” köt össze a külvilággal.

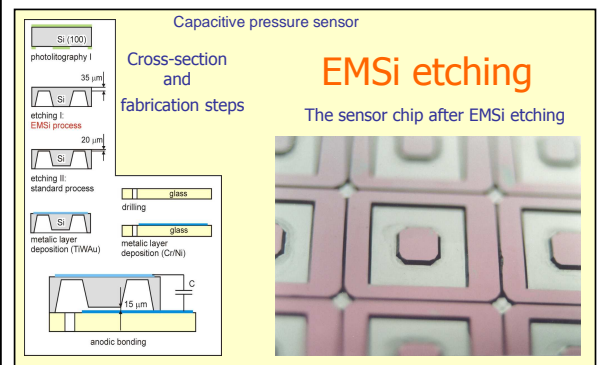
- capacitive (10mbar - 1bar)
 - double side alignment
 - alkaline etching for membrane formation (ECES)
 - membrane thickness 10-20 µm
 - counter electrode on anocally bonded Pyrex glass, optional: Si-Si direct wafer bonding



Si (100) Al Pyrex glass



KAPACITÍV ÉRZÉKELŐ TECHNOLÓGIÁJA



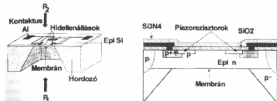
PIZOREZISZTÍV NYOMÁSMÉRŐ

Felépítés: négyzet alakú membrán tömbi mikromegmunkálással kialakítva, a peremén piezorezisztív ellenállások.

- 4 ellenállásból Wheatstone híd, az egyes hídágakban az ellenállásoknál a mechanikai feszültség ellentétes irányú
- a négy él mentén négy azonos ellenállás, a tranzverzális és longitudinális irányok váltakozó beállításával.

$$U_{ki}(p) = ISRp$$

ahol I az áthajtott áram, S az anyagi állandóktól és a geometriától függő tényező. A linearitás hibája 0,5-1%



PIZOREZISZTÍV NYOMÁSMÉRŐ

Hőfokkompenzáció lehetőségei:

- megfelelő adalékkoncentráció és áramgenerátoros táplálás:

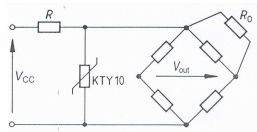
$$R(T) \approx R_0(1 + \alpha \Delta T)$$

$$\text{és } s(T) = \frac{S_0}{1 + \beta \Delta T}$$

Megfelelő adalékkoncentráció esetén: $\alpha \approx \beta$

- nullponti hőfokkompenzáció további ellenállások beépítésével
- aktív: hőmérsékletérzékelő elemmel, mely jelével arányosan változtatjuk az offsetet és az erősítést.

HŐMÉRSÉKLET-KOMPENZÁLÁS



Piezorezisztív nyomásérzékelő passzív hőmérséklet-kompenzációja. A híd kimenőjele a T növekedésével csökken. R, R_0 – fém-ellenállások, KTY10 – Si ellenállás-hőérzékelő.

31

AKTÍV HŐMÉRSÉKLET-KOMPENZÁLÁS

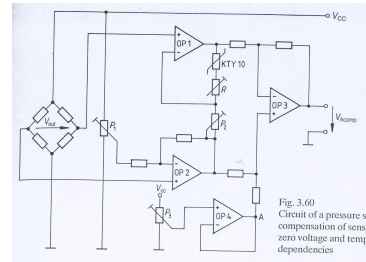


Fig. 3.60
Circuit of a pressure sensor compensation of sensitivity zero voltage and temperature dependencies

A híd kimenőfeszültsége T növekedésekor csökken. Ezt OP1 erősítése növelésével lehet kompenzálni (Si ellenállás-érzékelő). P1-nulla pont állítás, P3 és OP4: kimenet szinteltolása.

32

NYOMÁSÉRZÉKELŐK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

Paraméter	Si-piezo-ellenállás	Fém-ellenállás	Si-kapacitív
Átalakítási tényező *	1	0,02	-
Nyomás érzékenység	1	0,002	10
Lineartási hiba	1	0,5	5
Nulla hiba	1	1	10
TK (nulla hiba)	1	1	1
TK (érzékenység)	1	0,05	0,05
Hőmérsékl. hiszterézis	1	1	0,25
Stabilitás	1	0,5	0,5
Geometriai méret	1	10	1
Ár	1	10	-

* G.F. (gauge-factor): $(\Delta R/R)/(\Delta L/L)$

33

VÉGE

34