

Tema 5 :
Sensors de reactància variable
Sensors bàsats en unions semiconductores
Sensors piezoelèctrics

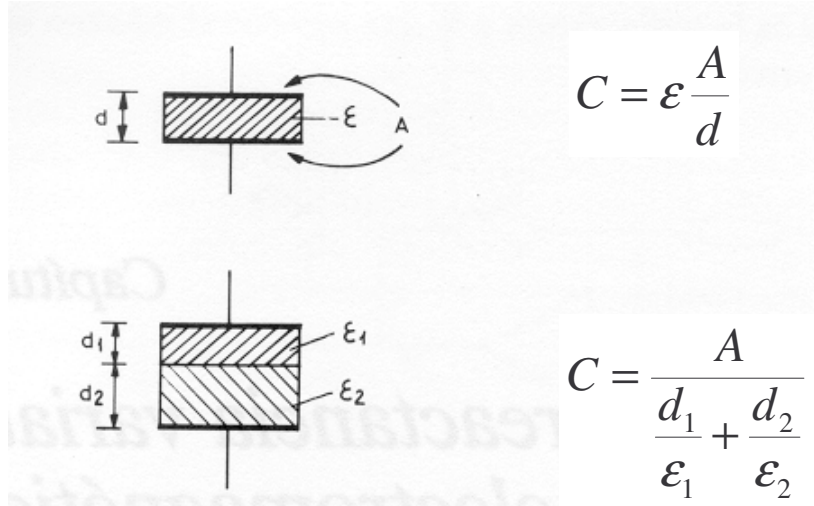
Contingut

- **Sensors capacitius**
 - Limitacions dels sensors capacitius
 - Avantatges dels sensors capacitius
 - Aplicacions dels sensors capacitius
 - Condensador diferencial
- **Sensors basats en unions semiconductores**
 - Termòmetres basats en unions semiconductores
- **Sensors piezoelèctrics**
 - Ultrasons

Sensors Capacitius

- Condensador

- Dos conductors separats per un dielèctric
- $Q=CV$ on C depèn del dielèctric i de la geometria
- Exemples



Sensors Capacitius

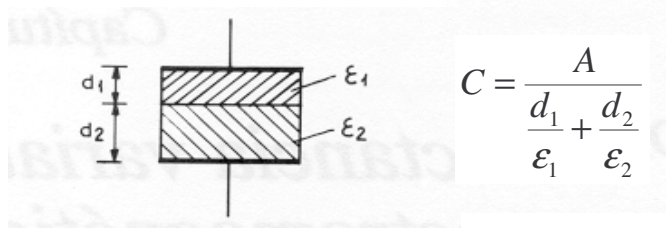
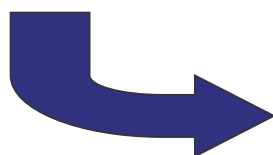
- Condensador format per 2 plaques iguals, àrea A i distància d entre elles ($A \gg d^2$):

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} \quad \text{on} \quad \epsilon_0 = 8.85 \frac{pF}{m}$$

- Canvis a A , d o ϵ_r provoquen un canvi a C ➡ sensor capacitiu

$\epsilon_{r,aire}=1$, $\epsilon_{r,H_2O}=88$ a $0^\circ C$, $\epsilon_{r,H_2O}=55.33$ a $100^\circ C$

- Si es substitueix aire per aigua,
 - possibilitat de mesurar nivell d'un depòsit,
 - possibilitat de mesurar humitat

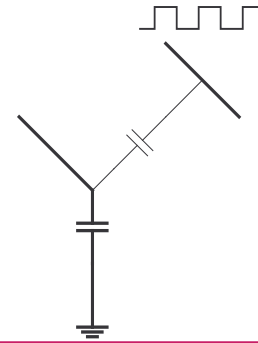


Sensors Capacitius: Limitacions

- Efecte d'àrea finita
 - Plaques planes de costat a , àrea A i distància d tenim:

$$C = \varepsilon \frac{A}{d} + \frac{2a}{\pi} \varepsilon \ln\left(\frac{\pi a}{d}\right)$$

- Problemes de renou
 - Només un terminal es pot connectar a massa
 - Interferències capacitives poden ser importants (crosstalk o diafonia)
 - Altres línies de senyal de la placa
 - Línies de la xarxa de distribució
 - Paràmetres importants
 - Freqüència
 - Amplitud dels senyals
 - Necessitat d'apantallar cables o línies



Sensors Capacitius: Limitacions

- Cables de connexió
 - Apantallats per evitar renou
 - Capacitat important
 - Perdua de sensibilitat, car C del sensor és l'única que varia

Sensors Capacitius: Limitacions

- Linealitat ?

$$C = \varepsilon \frac{A}{d+x} = \frac{\varepsilon A}{d(1+\alpha)}$$

- Linealitat d'un capacitor depèn del paràmetre que varia

- Variacions al dielèctric o a l'àrea impliquen **linealitat**
- Variació distància entre plaques **no linealitat**

- Linealitat d'un sensor capacitiu depèn del paràmetre que es mesura

- Mesura d'impedància $|Z_C| = \frac{1}{\omega C} = \frac{d(1+\alpha)}{\omega \varepsilon A}$

- Mesura d'admitància $|Y_C| = \omega C = \frac{\omega \varepsilon A}{d(1+\alpha)}$

Sensors Capacitius: Limitacions

- Linealitat

- Sensibilitat respecte de la distància entre plaques

$$C = \varepsilon \frac{A}{d(1+\alpha)} \quad \text{amb} \quad \alpha = x/d$$

$$\frac{dC}{dx} = \frac{-\varepsilon A}{d^2(1+\alpha)^2} = \frac{-C_0}{d(1+\alpha)^2} \approx \frac{-C_0}{d} (1 - 2\alpha + 3\alpha^2 - 4\alpha^3 + \dots)$$

- Com es un transductor no lineal, llavors la sensibilitat depèn de $\alpha = x/d$

Sensors Capacitius: Limitacions

- Alta impedància de sortida dels sensors
 - Solució 1: augmentar la freqüència de treball (alerta: també renou $\uparrow$)
 - Solució 2: Sol 1 + condicionament a prop (minimitzar renou)
 - Solució 3: Amplificadors amb impedància d'entrada molt alta (FET)
 - Solució 4: Transformadors d'impedància
 - Solució 5: mesurar el corrent que travessa el sensor en lloc de la seva diferència de potencial

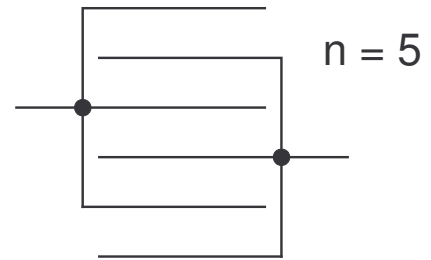
Sensors Capacitius: Avantatges

- Com no hi ha contacte mecànic directe, no hi ha errors de fricció, i no s'ha de fer molta força per desplaçar l'element mòbil (transductors de desplaçament)
- Insensibilitat respecte de temperatura
- Baixes derives temporals. Menor problema d'envelliment
- Repetibilitat i estabilitat elevada
- Alta resolució en la mesura de capacitats

Sensors Capacitius: Característiques

- Per mesures de desplaçaments
 - Grans : d variable
 - Petits : d variable (10^{-9}cm a 1cm)
 - Intermijos ($1\text{-}10\text{cm}$) : A variable
- Típicament s'empren configuracions amb moltes plaques

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} (n-1) = \varepsilon \frac{A}{d} (n-1)$$

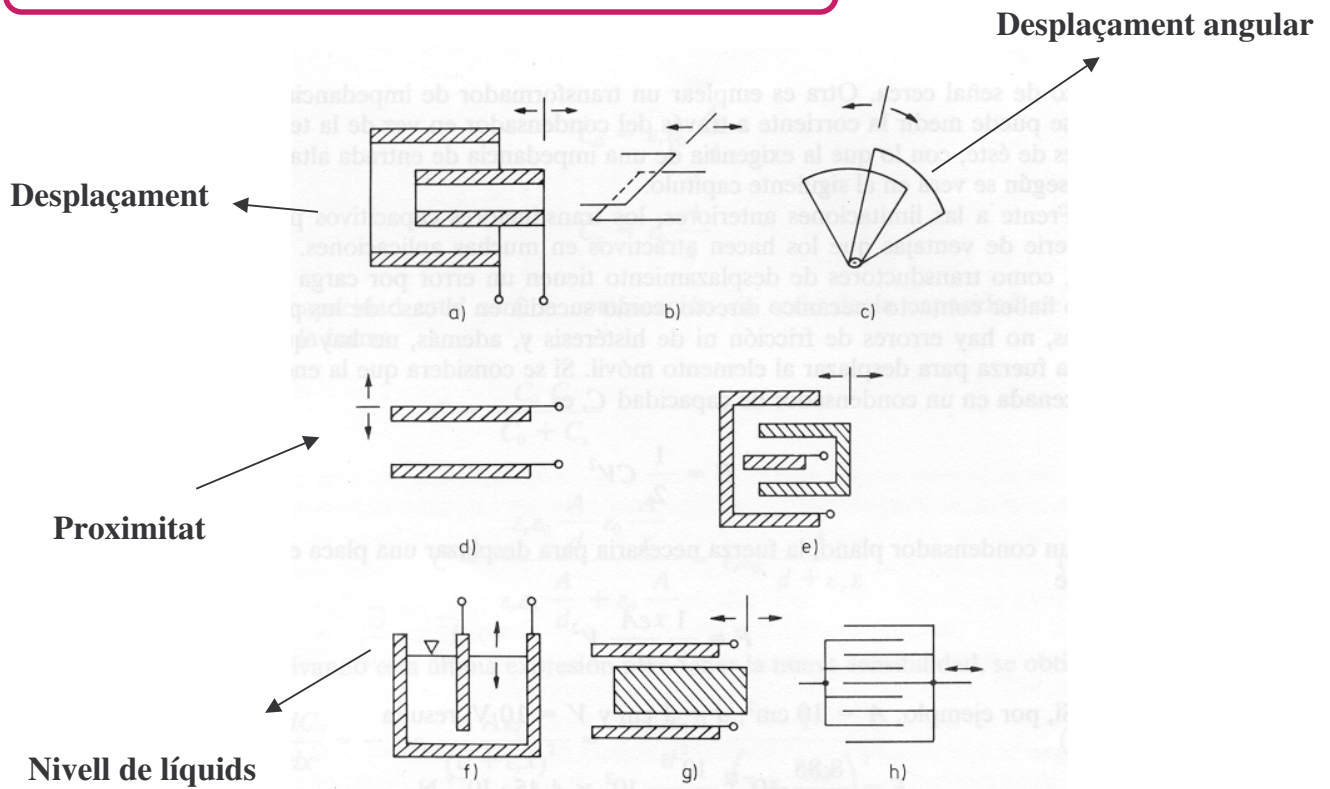


- Valors habituals : $1\text{-}500\text{pF}$, $f > 10\text{kHz}$

Sensors Capacitius: Aplicacions

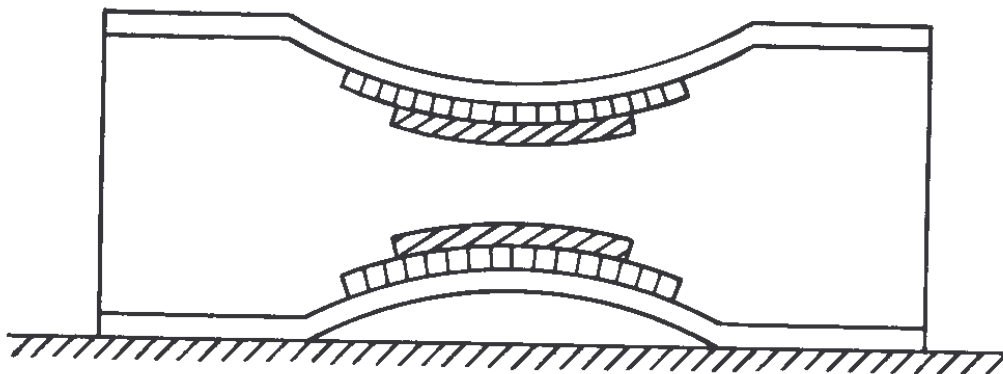
- Mesura de desplaçaments grans
- Mesura de desplaçaments petits
- Mesura de desplaçaments intermijos
- Desplaçaments angulars
- Detectors de proximitat
- Presions
- Humitats (variacions de dielèctric)
- Nivells de deposits

Sensors Capacitius: aplicacions



Sensors Capacitius: aplicacions

- Galga Capacitiva: Mesura de presions

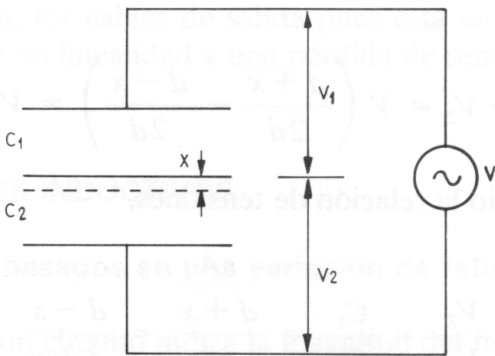


Condensador Diferencial

- Condensadors variables que experimenten el mateix canvi però en sentits oposats

$$C_1 = \frac{\epsilon A}{d+x} \quad i \quad C_2 = \frac{\epsilon A}{d-x}$$

- Amb un condicionament adequat
 - Linealitat
 - Major sensibilitat que al condensador simple



$$V_1 = \frac{V}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}} \cdot \frac{1}{j\omega C_1} = V \frac{C_2}{C_1 + C_2}$$

$$V_2 = \frac{V}{\frac{1}{j\omega C_1} + \frac{1}{j\omega C_2}} \cdot \frac{1}{j\omega C_2} = V \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$

Condensador Diferencial

$$V_1 = V \frac{C_2}{C_1 + C_2} = V \frac{\frac{\epsilon A}{d-x}}{\frac{\epsilon A}{d-x} + \frac{\epsilon A}{d+x}} = V \frac{d+x}{2d}$$

$$V_2 = V \frac{C_1}{C_1 + C_2} = V \frac{\frac{\epsilon A}{d+x}}{\frac{\epsilon A}{d-x} + \frac{\epsilon A}{d+x}} = V \frac{d-x}{2d}$$

- Per tant si restam o dividim tendrem :

$$V_1 - V_2 = V \frac{x}{d} \quad \text{o} \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{C_1}{C_2} = \frac{d-x}{d+x} = \frac{1 - x/d}{1 + x/d} \approx 1 - \frac{x}{d}$$

Si $x/d \ll 1$

Sensor basat unió semiconductora

- Processos de fabricació de circuits integrats
 - Preus molt competitius
 - Possibilitat d'incorporar el condicionament de senyal dins el mateix integrat
- Sensor de temperatura
 - La característica I/V d'un diode depèn de la temperatura
 - Possibilitat de fer un sensor de temperatura
 - Problema : dependència no lineal
 - Tensió base-emisor d'un BJT amb corrent de col·lector constant depèn de la temperatura
 - Millor opció. Exemple per estudi

Termomètre basat en V_{BE} de BJT

- Dependència V_{BE} d'un BJT amb la temperatura (Ebers-Moll)

$$i_C = \alpha_F I_{ES} \left(e^{\frac{qV_{BE}}{KT}} - 1 \right) - I_{CS} \left(e^{\frac{-qV_{CB}}{KT}} - 1 \right)$$

- α_F relació de transferència directa de corrent
- I_{ES} corrent de saturació d'emisor
- q càrrega de l'electró : $1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- V_{BE} tensió base-emisor
- K constant de Boltzmann: $1.3807 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$
- T temperatura absoluta
- I_{CS} corrent de saturació de col·lector
- V_{CB} tensió col·lector-base

Termomètre basat en V_{BE} de BJT

- En activa

$$V_{BE} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{i_C}{I_S}\right) \quad \text{amb} \quad I_S = \alpha_F I_{ES}$$

- Però $I_S = BT^3 e^{\frac{-qV_{g0}}{KT}}$ i per tant

$$V_{BE} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{i_C}{BT^3}\right) + V_{g0}$$

V_{g0} : ample de banda prohibida
B: constant de fabricació

– Relació no lineal i que depèn de i_C

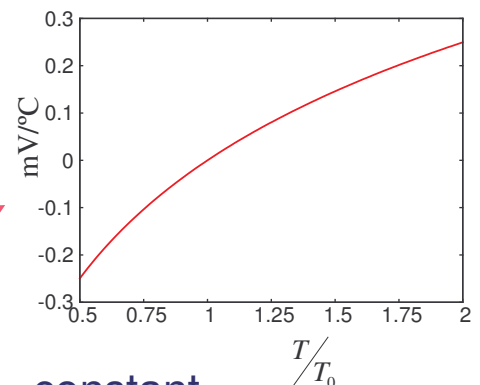
Termomètre basat en V_{BE} de BJT

- Si V_{BE0} és V_{BE} a $T=T_0$ i I_{C0} és i_C a $T=T_0$

$$V_{BE} = V_{g0} + \frac{T}{T_0} (V_{BE0} - V_{g0}) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{i_C}{I_{C0}} \frac{T_0^3}{T^3}\right)$$

- Si cercam la sensibilitat

$$\left. \frac{dV_{BE}}{dT} \right|_{i_C=I_{C0}} = \underbrace{-\frac{V_{g0} - V_{BE0}}{T_0} - \frac{3K}{q}}_{\text{Sensibilitat } -1.8 \text{ mV}^\circ\text{C}} - \underbrace{\frac{3K}{q} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right)}_{\text{No linealitat}}$$

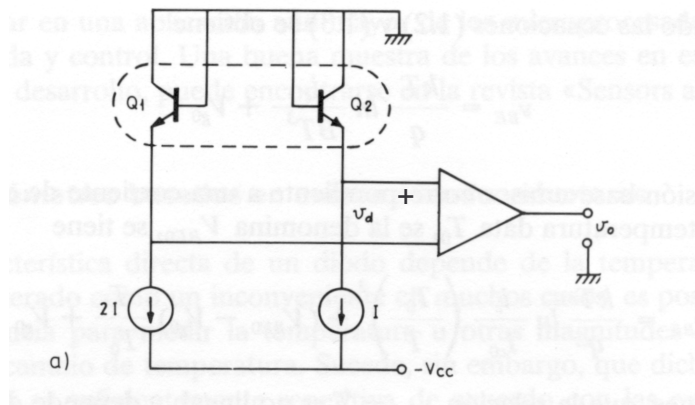


- Problemes : No linealitat, necessitat de i_C constant

Termomètre basat en V_{BE} de BJT

- Solució 1: Dos transistors amb corrents de col·lector diferents

$$V_d = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{S1}}\right) - \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{C2}}{I_{S2}}\right) = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}}\right) = \frac{KT}{q} \ln 2$$



$$\frac{V_d}{T} = 59.7 \frac{\mu V}{^\circ K}$$

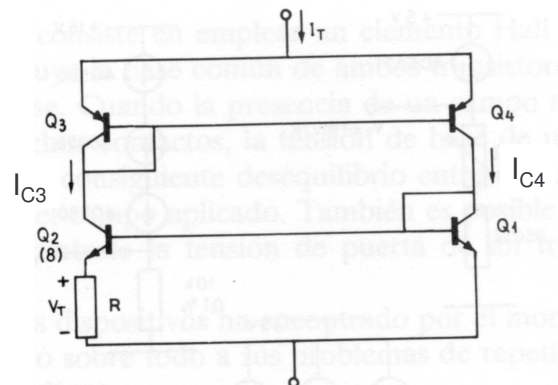
Termomètre basat en V_{BE} de BJT

- Solució 2: Dos transistors amb àrees d'emisor diferents
 - Q_3 i Q_4 idèntics (mirall de corrent, $I_{C3} = I_{C4}$)
 - Q_2 format per 8 en paral·lel iguals a Q_1
 - $I_{C3} = 8 I_{C2}$ (I_{C2} : corrent per cada sub-transistor) $I_{C4} = I_{C1}$

$$V_T = V_{BE1} - V_{BE2} = \frac{KT}{q} \ln\left(\frac{I_{C1}}{I_{C2}}\right) = \frac{KT}{q} \ln 8 = 179T \mu V$$

$$I_T = I_{C3} + I_{C4} = 2I_{C3} = 2 \frac{V_T}{R} = \frac{2}{R} 179T \mu V$$

així si $R = 358 \Omega$ llavors $I_T = T \times 1 \mu A / ^\circ K$



- Tenim una sortida en mode corrent (ex. AD590, AD592)

Termomètre basat en V_{BE} de BJT

- Emprats a sondes de temperatura per multímetres digitals
- Poca massa, per tant són ràpids (canvis de 50° detectats en 1.5-10s)
- Si sonda aïllada elèctricament, possible mesura de components actius en funcionament
- Condicionament de senyal relativament senzill
- Exemples

<i>Modelo</i>	<i>Sensibilidad</i>	<i>Margen</i>	<i>Exactitud</i>
AD 592CN	1 μ A/K	– 25 °C a + 105 °C	0,3 °C
LM35	$\pm$ 10 mV/K	– 55 °C a + 150 °C	$\pm$ 0,25 °C
MMBTS 102	– 2,25 mV/K	– 40 °C a + 150 °C	$\pm$ 2 °C
REF-02A	2,1 mV/K	– 55 °C a + 125 °C	$\pm$ 0,5%