

# INF5490 RF MEMS

## **L7: RF MEMS svitsjer, I**

V2008, Oddvar Søråsen  
Institutt for informatikk, UiO

# Dagens forelesning

- Svitsjer for RF og mikrobølge
  - Eksempler
  - Krav til ytelse
  - Teknologi
  - Typiske trekk for RF MEMS svitsjer
- Grunnleggende svitsje-strukturer
  - Prinsipper og virkemåte
- Viktige svitsje-parametre
- Design av RF MEMS svitsjer
  - Elektromekanisk design I

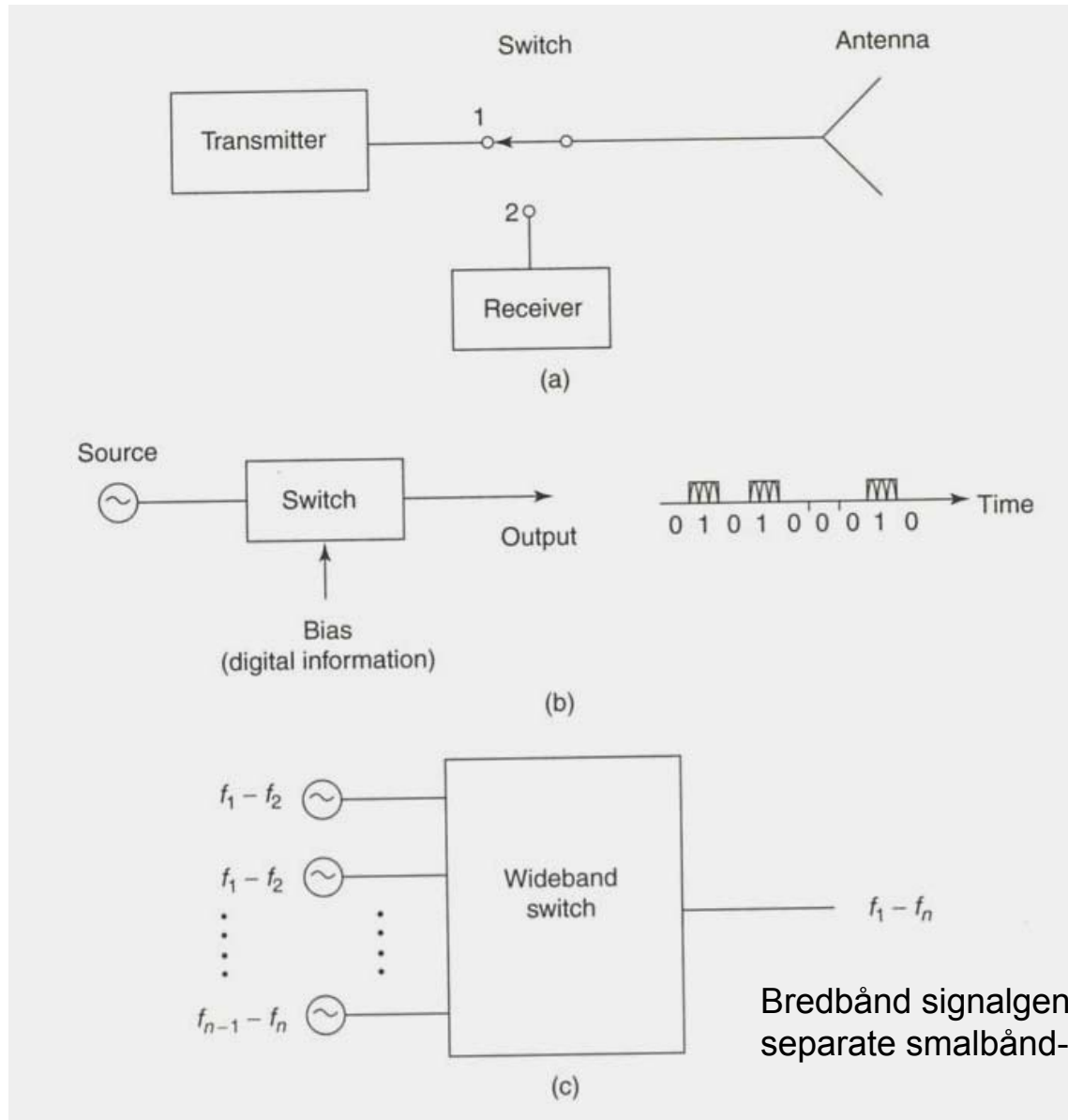
# Neste forelesning, L8

- Design av RF MEMS svitsjer, forts.
  - Elektromekanisk design, II
  - RF design
- Eks. på implementasjoner
  - Struktur
  - Fremstilling
  - Ytelse
- Spesielle strukturer og aktiveringsmekanismer
- Noen utfordringer

# Bakgrunn

- **Svitsj - bryter - relé**
- Sentral og viktig komponent i RF system-sammenheng
  - Signal-ruting
    - Re-dirigering av signaler: antenner, transmitter/receiver
  - Innkobling av ulike deler av systemet
    - Valg av filter i filter-bank
    - Valg av nettverk for impedans-matching
    - Valg av justeringskretser for forsterkning i forsterkere
- Telecom er en dominerende bruker

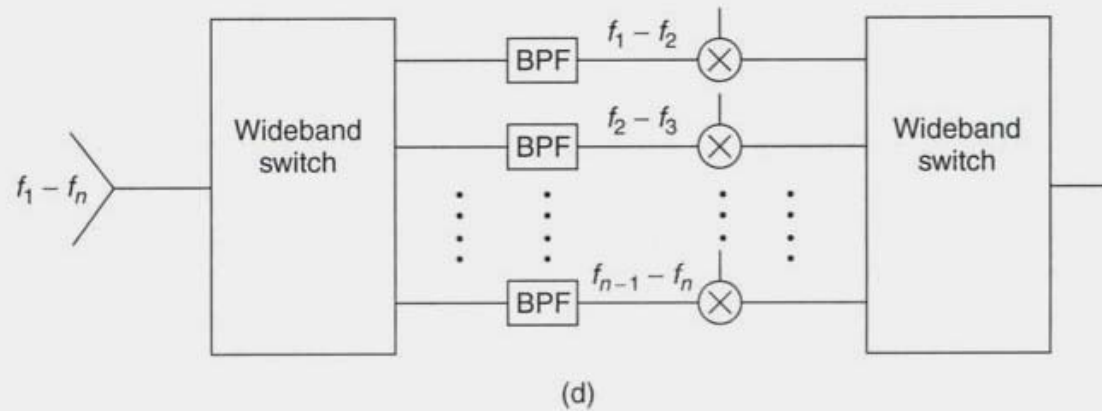
# Eks. på anvendelser av svitsjer



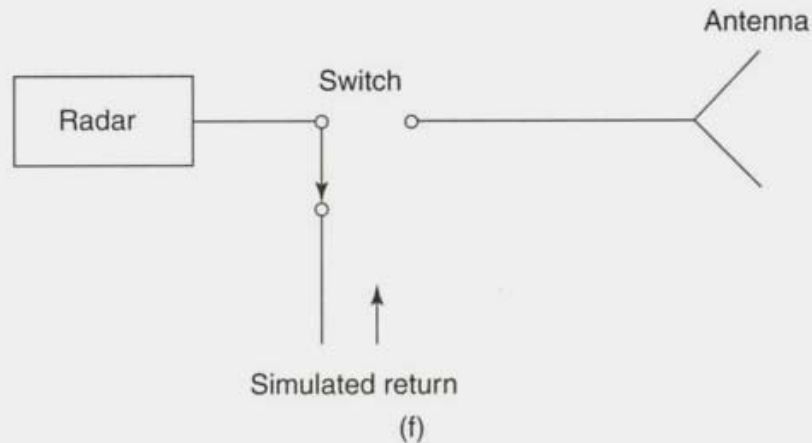
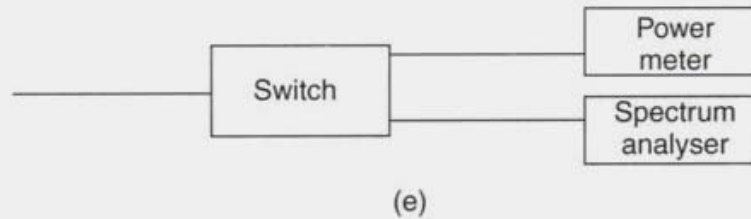
Varadan, fig. 3.1

# Anvendelser, forts.

Velg kanal



Velg måleinstrument



Varadan fig. 3.1

# Krav til ytelse

- Gode **ytelses-parametre** er ønskelig
  - Lavt tap
  - God isolasjon
  - Lite "cross-talk", overhøring
  - Kort svitsje-tid
  - Lang levetid
- Valg av **svitsje-teknologi** er avhengig av
  - RF-signalets frekvens
  - Signalnivå
  - Evne til effekt-håndtering
  - Hastighetskrav

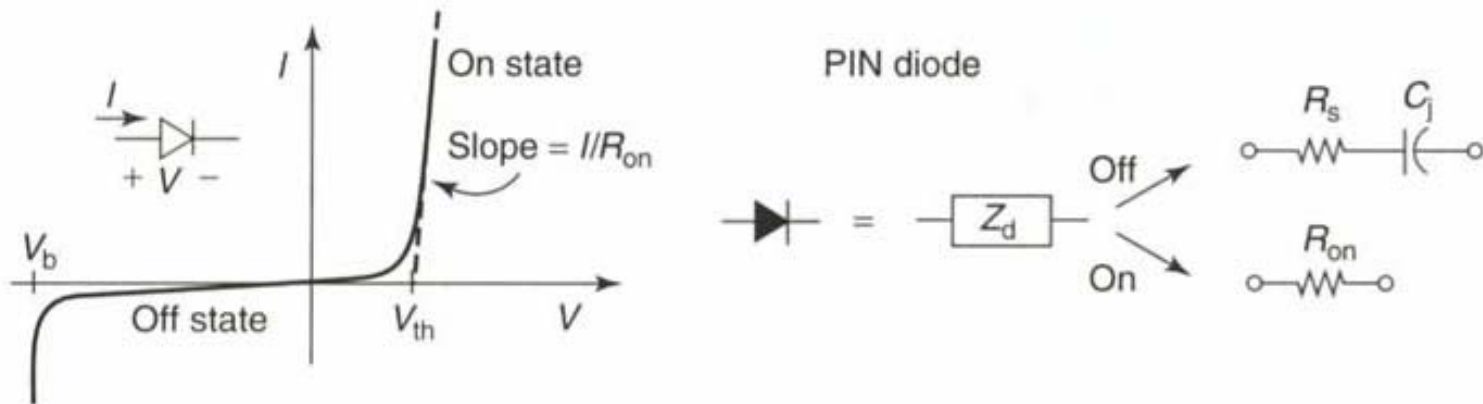
# Valg av teknologi

- Tradisjonelle mekaniske svitsjer (**reléer**)
  - ala "lysbyter"
    - Lavt tap, god isolasjon (+)
    - Kan håndtere høye effekter (+)
    - Langsomme (-)
    - Mekanisk slitasje (-)
    - Degradering av kontakter, redusert levetid (-)
- **Halvleder-svitsjer** (solid-state)
  - Mest brukt i dag
  - FET (Field Effect Transistors), CMOS, PIN-dioder etc.
    - Velprøvd pålitelighet (+)
    - Kan integreres i Si (+)
    - FET degraderes ved høye frekvenser (-)
    - Stort "insertion loss", høye resistive tap (-)
    - Begrenset isolasjon (-)
    - Begrenset evne til å håndtere høye effekter (-)



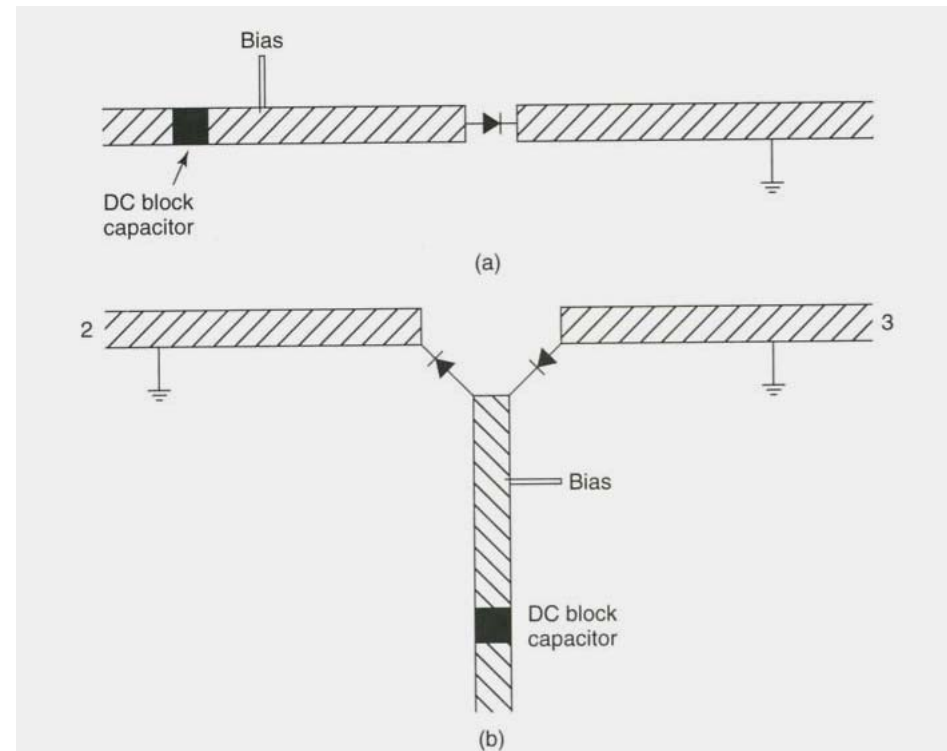
# Velprøvd teknologi: PIN-dioden

- Varadan fig. 3.6
  - PIN: **p – insulator – n**
  - **Forover** forspent: lav R
  - **Revers** forspent: liten C pga. isolator-laget → høy impedans Z



# PIN-dioden brukt i system

- Bias på PIN-dioden bestemmer svitsjingen
  - Forover forspenning: lav R
  - Revers forspenning: høy Z
- Aktuelle betegnelser
  - Single-pole single-throw, **SPST**
  - Single-pole double-throw, **SPDT**
    - Varadan fig. 3.8



# RF MEMS svitsjer

- **Stort behov for svitsjer med forbedret ytelse!**
  - MEMS svitsjer:
    - De tidligste eks. på RF MEMS-komponent (78→)
    - En rekke implementasjoner finnes
      - *F.eks. i Gabriel M. Rebeiz: "RF MEMS – Theory, Design and Technology" (Wiley 2003)*
      - Publikasjoner
    - Mest modent RF MEMS-felt

# Fordeler og typiske trekk ved RF MEMS svitsjer

FSRM



## RF MEMS switch: key advantages and issues

- + • **Ultra low power** consumption: 10-100nW
- + • **Ultra-high isolation** → airgap: low state C ~fF, 0.1-40GHz
- + • **Low insertion loss** → ~ -0.1dB, 0.1-40GHz
- + • **Practically no intermodulation**: very linear
- + • **Low cost** ~ simple technology, integrable with RF ICs  
(problem → cost & performance of the full packaged structure)
  
- • **Speed limited** by mechanical nature: 1-100μs
- • **Power handling limited**: <100mW
- • **Reliability**: limited (today) ~10<sup>9</sup>-10<sup>10</sup> cycles  
no reliable switch to handle ~few Watts
- • **Packaging**: needs inert ambient & low humidity & **low cost**

49

# Sammenligning av ytelse

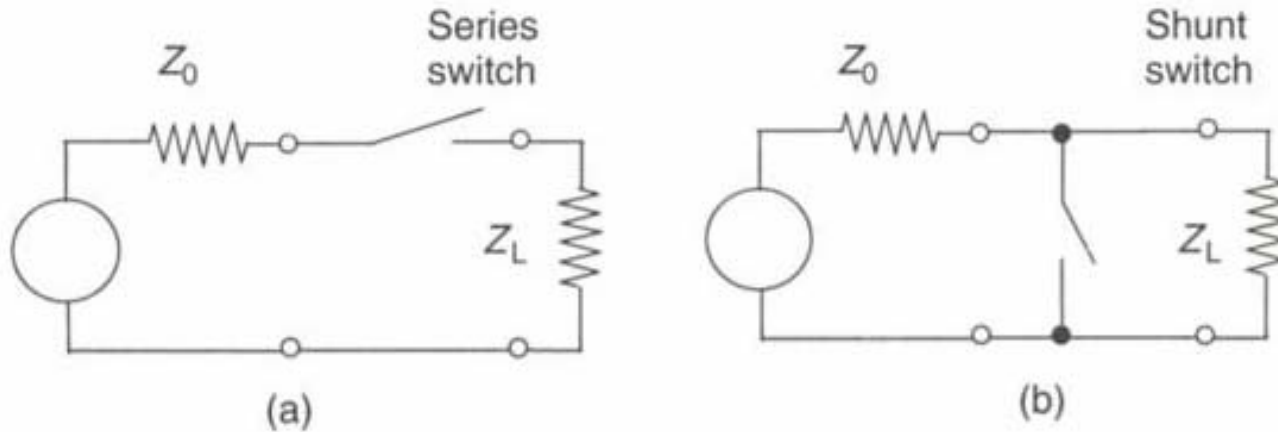
**TABLE 1.2. Performance Comparison of FETs, PIN Diode, and RF MEMS Electrostatic Switches**

Parameter	RF MEMS	PIN	FET
Voltage (V)	20–80	$\pm 3$ –5	3–5
Current (mA)	0	3–20	0
Power consumption <sup>a</sup> (mW)	0.05–0.1	5–100	0.05–0.1
Switching time	1–300 $\mu$ s	1–100 ns	1–100 ns
$C_{up}$ (series) (fF)	1–6	40–80	70–140
$R_s$ (series) ( $\Omega$ )	0.5–2	2–4	4–6
Capacitance ratio <sup>b</sup>	40–500 <sup>b</sup>	10	n/a
Cutoff frequency (THz)	20–80	1–4	0.5–2
Isolation (1–10 GHz)	Very high	High	Medium
Isolation (10–40 GHz)	Very high	Medium	Low
Isolation (60–100 GHz)	High	Medium	None
Loss (1–100 GHz) (dB)	0.05–0.2	0.3–1.2	0.4–2.5
Power handling (W)	<1	<10	<10
Third-order intercept point (dBm)	+66–80	+27–45	+27–45

<sup>a</sup>Includes voltage upconverter or drive circuitry.

<sup>b</sup>Capacitive switch only. A ratio of 500 is achieved with high- $\epsilon_r$  dielectrics.

# To grunnleggende svitsjekonfigurasjoner



# Grunnleggende svitsjestrukturer

- **Serie-svitsj**

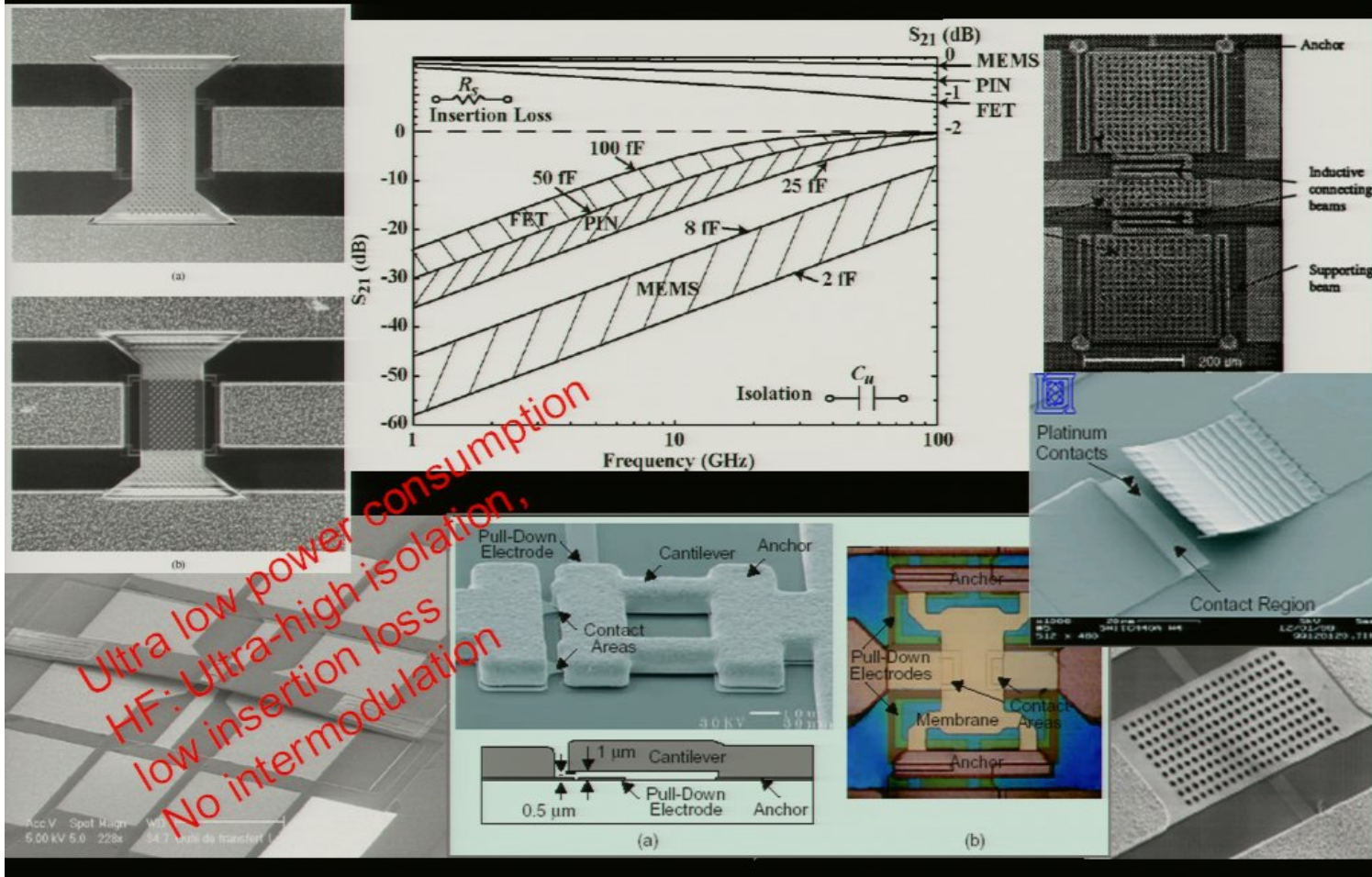
- Kontakt-svitsj, "ohmic" (relé) \*
- Cantilever beam
- Kapasitiv (kontaktløs) svitsj
- RF-signaler forplantes gjennom C (  $Z=1/j\omega C$  )
  - Impedans er avhengig av verdien av C

- **Shunt-svitsj**

- Shunt kapasitiv svitsj \*
- clamped-clamped beam (c-c beam)
- Shunt kontakt-svitsj

\* mest vanlig

# RF MEM switches: capacitive & contact

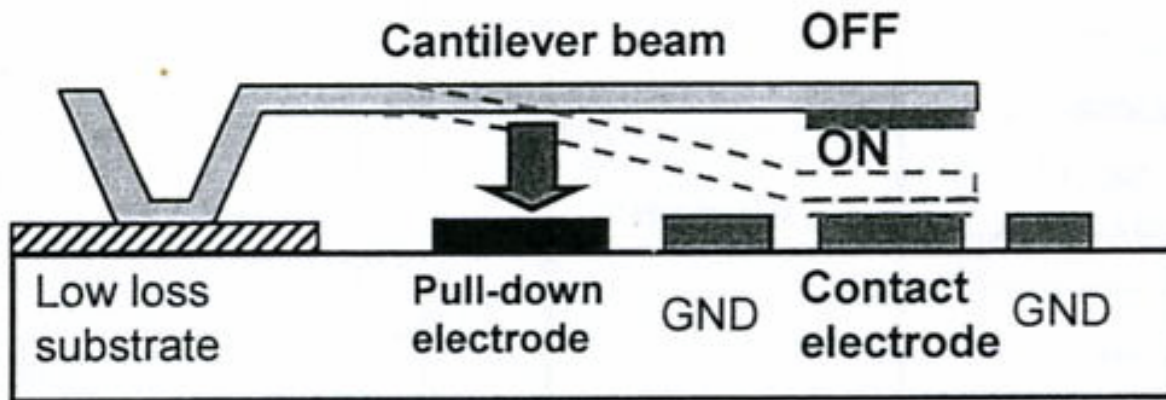


Adrian Ionescu, EPFL. Europractice – STIMESI, Nov 2007



# Serie kontaktsvitsj

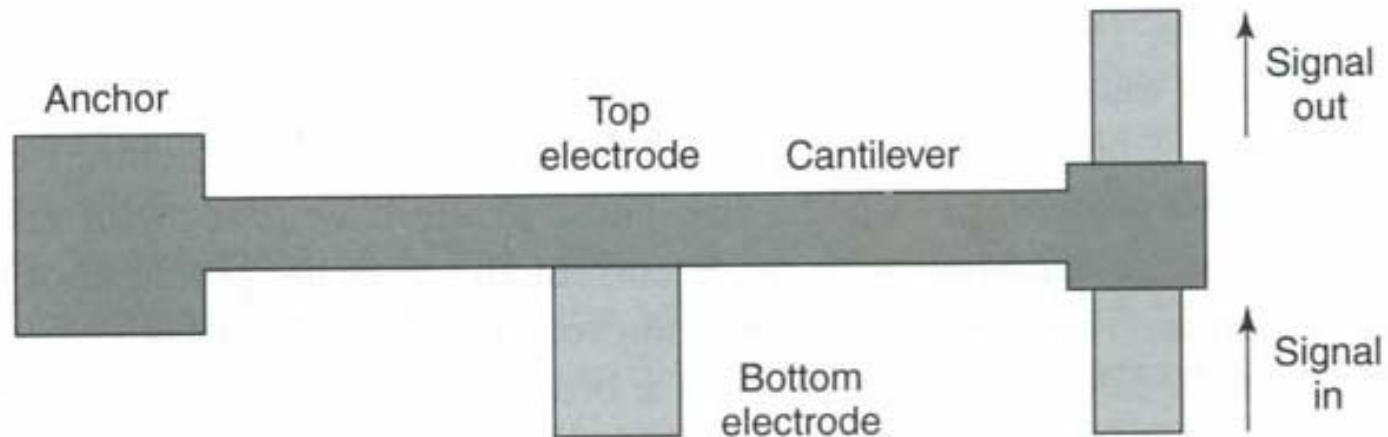
- Cantilever beam svitsj



coplanar waveguide

Signalforplantning **inn** i figuren

# Signalforplantning på "tvers" av bjelken

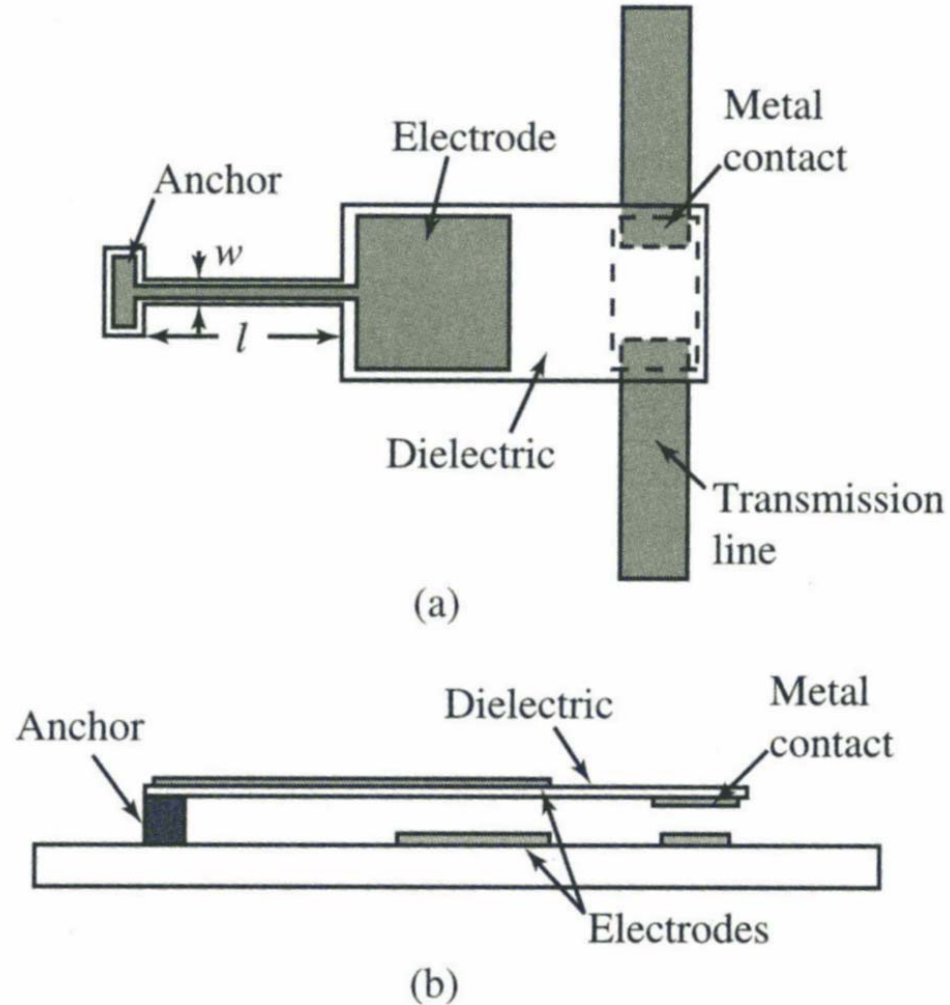


Separat pull-down elektrode

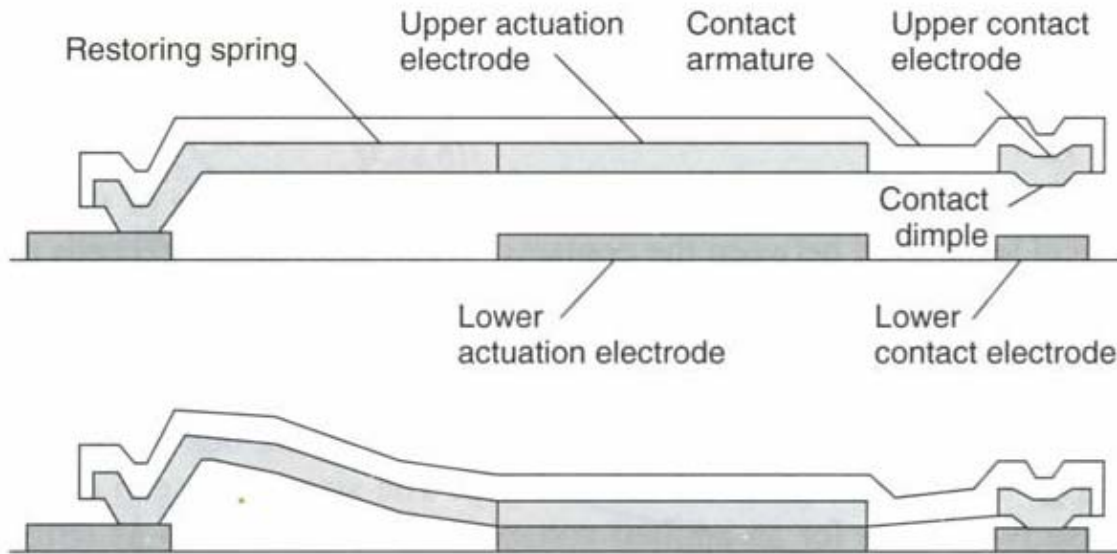
Styrespenning mellom bjelke og elektrode

Eget kontakt-metall i enden av bjelken

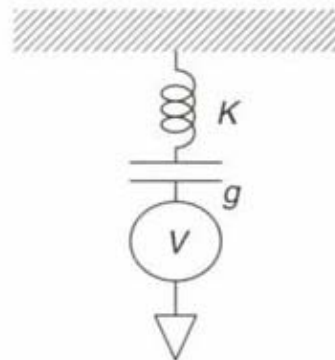
# Principiell virkemåte



# Mer realistisk struktur



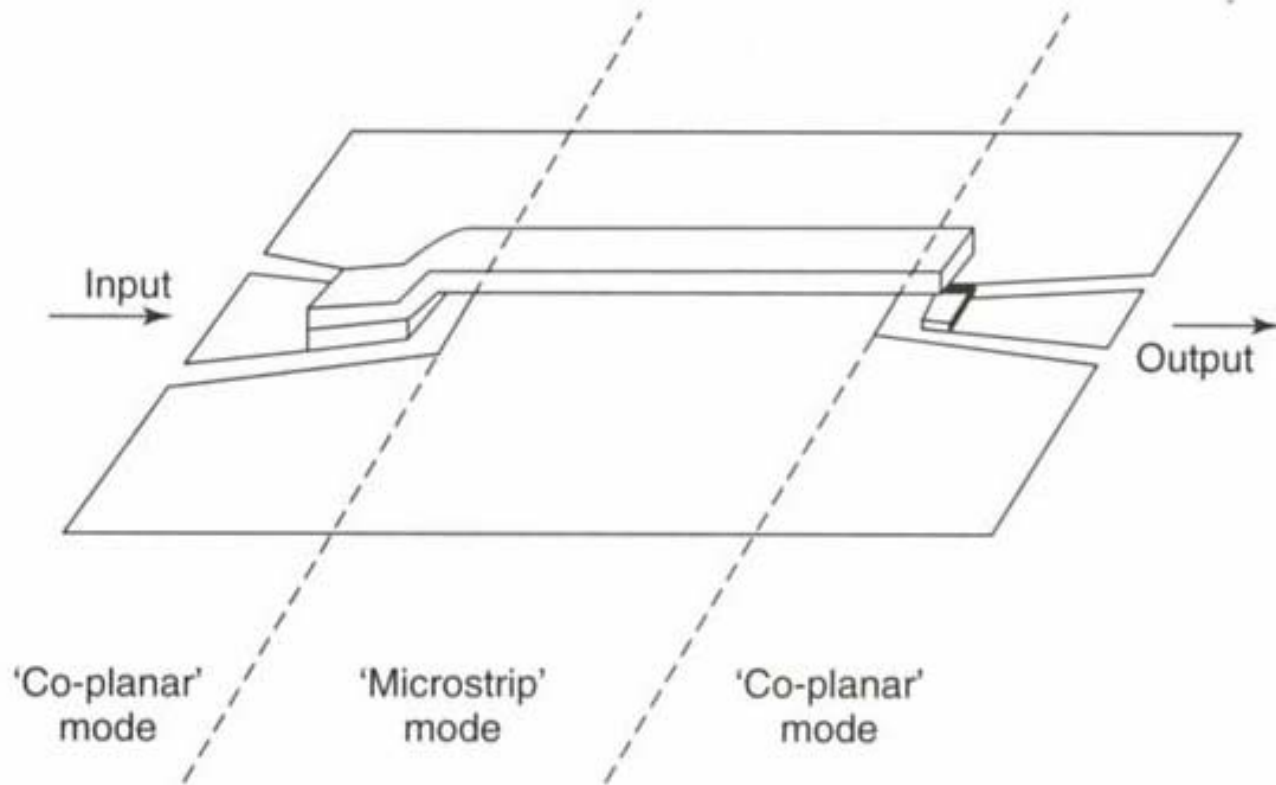
(a)



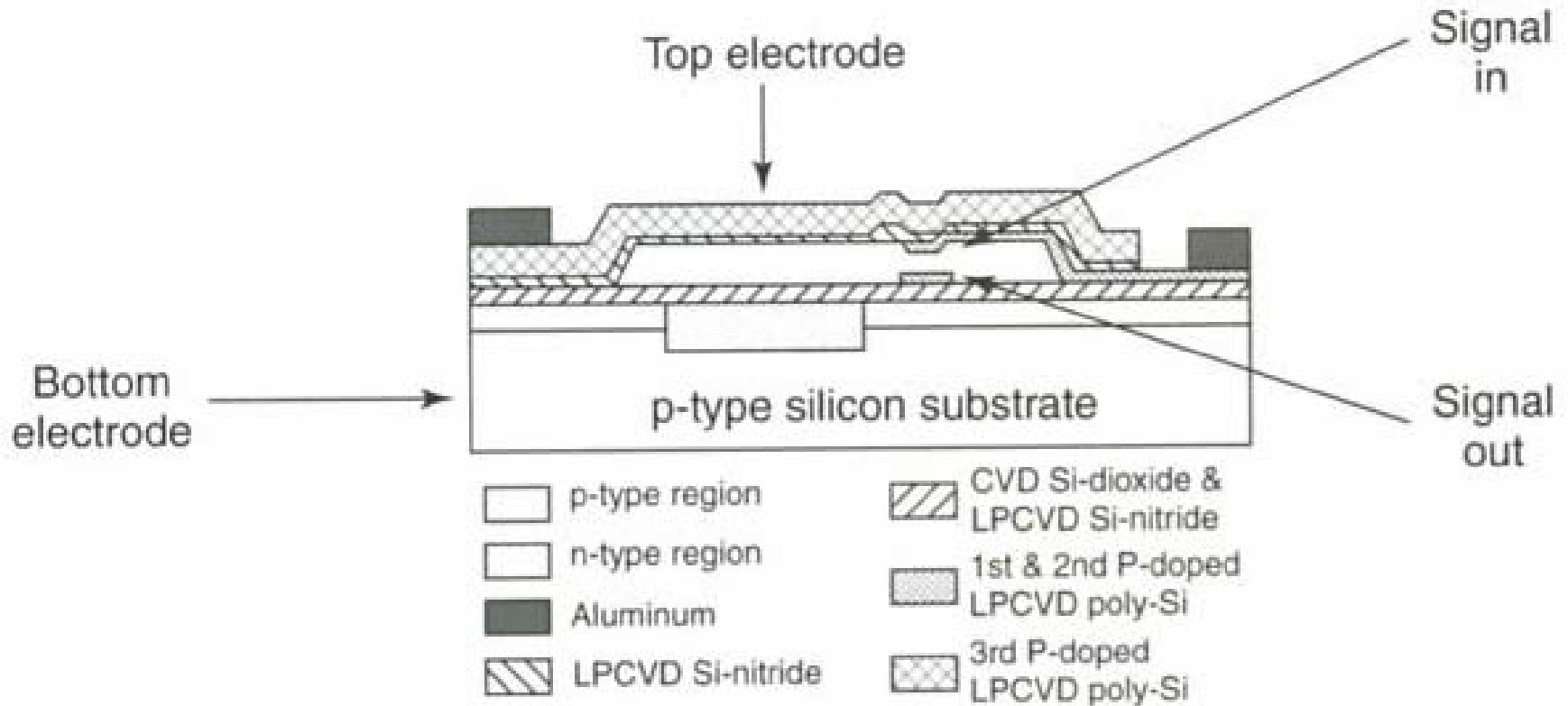
(b)

Varadan fig 3.16

# Signalforplantning på langs



# Doubly supported cantilever beam



# Cantilever beam svitsj: kritiske parametre

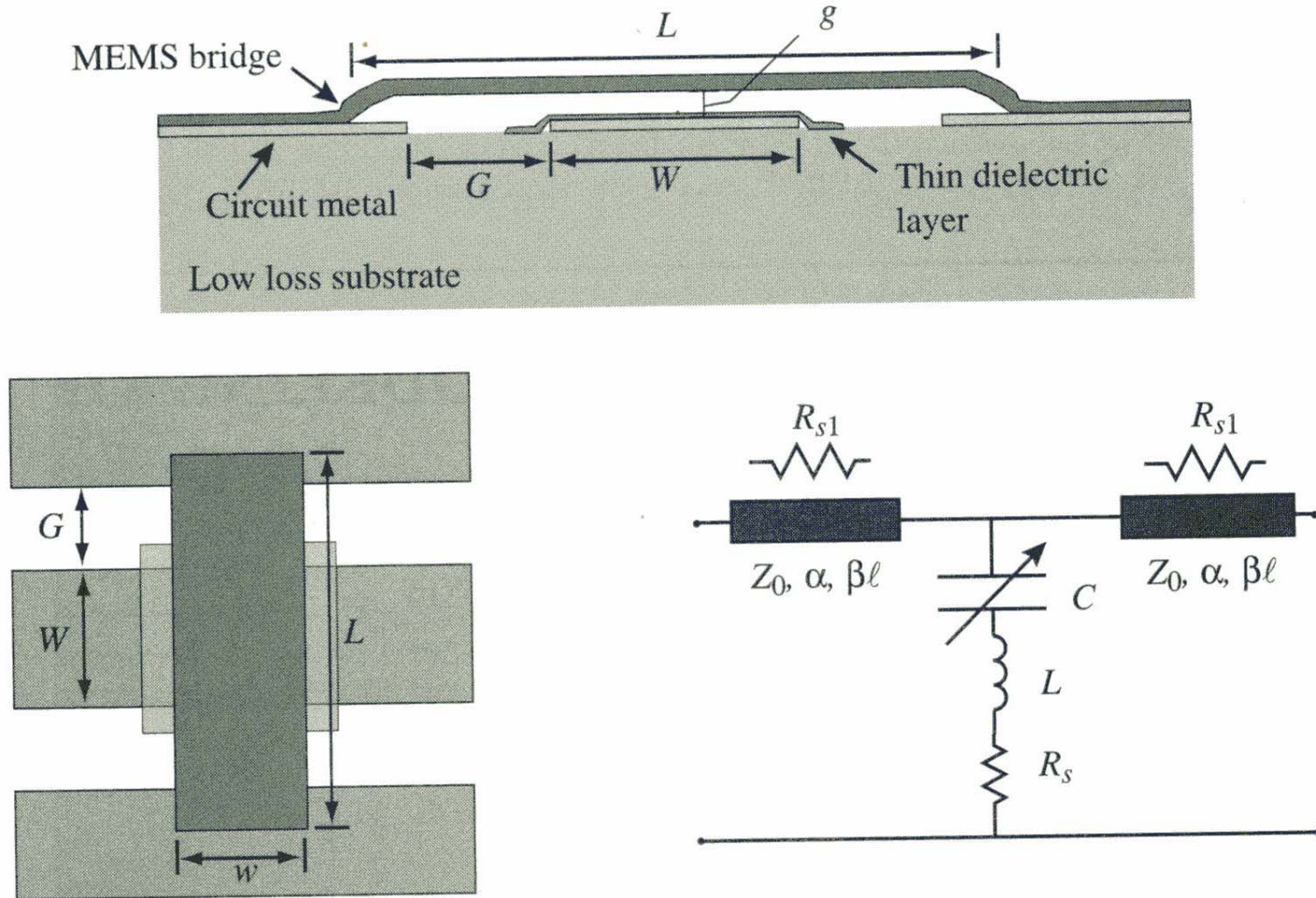
- **Kontakt-resistans** for metall – metall
  - Kontakt-trykk
  - Overflate karakteristika (ruhet)
  - Degradering (økning) av motstand
    - Bløte vs. harde metaller (gull vs legeringer)
- Aktiveringsspennning vs fjærstivhet
- Muligheter for **"stiction"** ("stuck-at")
  - Fjærdraget tilbake vs sammenklebingskrefter ("adhesion forces")
- **Pålitelighet**
  - Degradering/aldring
  - Max. antall kontakt-cycles
  - Høye strømmer er kritisk ("hot switching")
    - smelting, ledende metall-damp → "microwelding"
- **Selvaktivering**
  - $V_{RF} \text{ (RMS)} > V_{\text{aktivering}}$

# Serie svitsj

- Ideelle krav – **typiske parametre**
  - ”Open/short” transmisjonslinje (t-linje)
    - **0.1 til 40 GHz**
  - ”Uendelig” isolasjon (up)
    - **-50 dB til -60 dB ved 1 GHz**
  - ”Null” insertion loss (down)
    - **-0.1 dB til -0.2 dB**



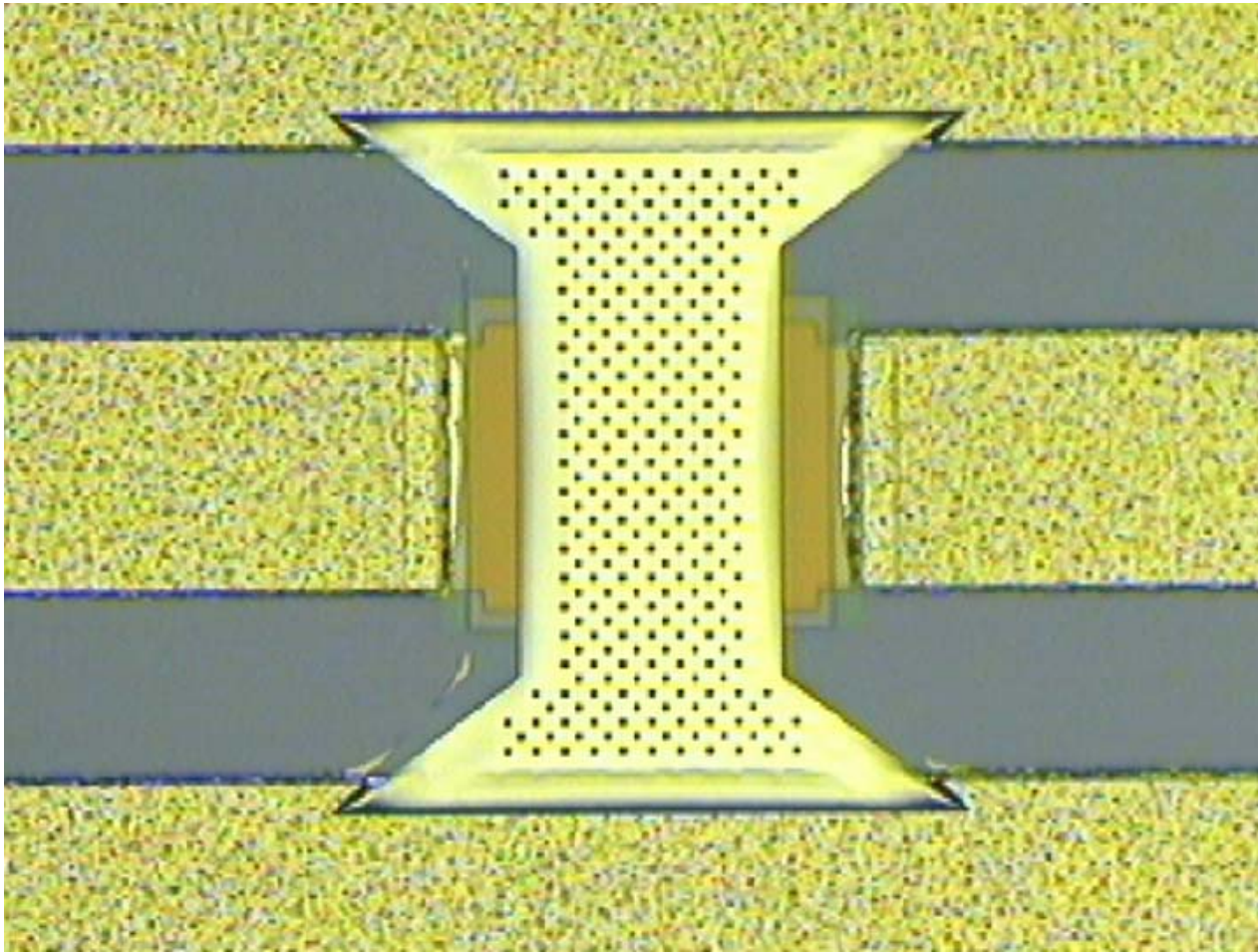
# Typisk shunt svitsj



**Figure 4.1.** Illustration of a typical MEMS shunt switch shown in cross section and plan view. The equivalent circuit is also shown [6] (Copyright IEEE).

# RF MEMS svitsj

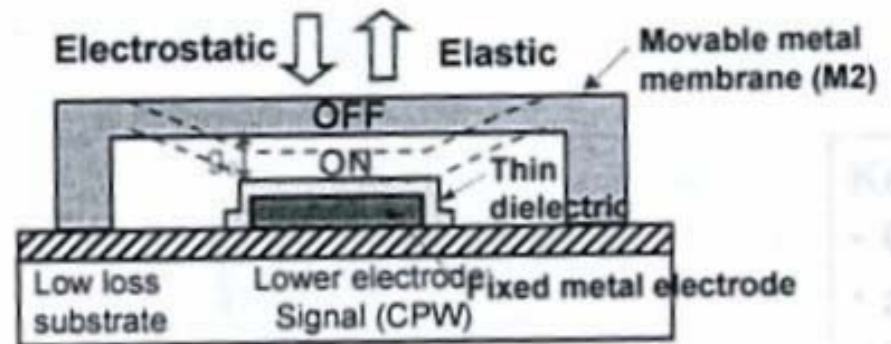
Signal →



Coplanar waveguide

# Shunt kapasitiv svitsj, forts.

- Clamped-clamped beam (c-c beam)
  - **Elektrostatisk aktivering**  
↔ bjelke-elasticitet
- RF signal **overlagret** aktiverings-spenningen
- Ingen direkte kontakt mellom metall
  - Dielektrikum (isolator) mellom
  - $C_{up}$  /  $C_{down}$  viktig!



# Shunt kapasitiv svitsj, forts.

- $C_{\text{down}} / C_{\text{up}}$  bør være  $> 100$ 
  - $C = \epsilon A/d$
  - $C_{\text{down}} = C_{\text{stor}}$
  - $C_{\text{up}} = C_{\text{liten}}$
- Impedans  $Z \sim 1/j \omega C$ 
  - For gitt  $\omega$ :
    - $C_{\text{liten}} \rightarrow Z_{\text{stor}} = \mathbf{Z_{\text{off}}}$ 
      - $\rightarrow$  **isolasjon**
    - $C_{\text{stor}} \rightarrow Z_{\text{liten}} = \mathbf{Z_{\text{on}}}$ 
      - $\rightarrow$  **kortslutning av RF-signalet til GND**

# Kapasitiv svitsj: design parametre

- Ledere og svitsjer må designes med hensyn på RF
  - Egnert utforming
    - "CPW – coplanar waveguide" (sidedstilte signallinjer)
    - "microstrip waveguide" (vertikalstilte signallinjer)
- Svitsjen bør være kompatibel med IC-teknologi
  - Begrenset verdi på aktiveringsspenningen
  - Egnert fjærstivhet
- Alternativ til elektrostatisk aktivering:
  - **Piezoelektrisk aktivering**
- Pålitelighet  $> 10E9$  svitsjinger før feil
  - $10E9$  er demonstrert

# Kapasitiv svitsj: kritiske parametre

- Tykkelse og kvalitet på dielektrikum
- Materialvalg
  - Høy dielektrisitetstetthet
  - Gir økt verdi på  $C_{down} / C_{up}$
- Ladnings-akkumulering i overflaten av dielektrisk lag
  - C-degradering
  - Fare for "stiction"
- "Breakdown" av dielektrisk lag
  - Blir ledende → ødeleggende!

# Shunt svitsj

- Ideelle krav – **typiske parametre**
  - Shunt mellom t-linje og GND
    - **5 til 100 GHz**
  - ”Null” insertion loss (up)
    - **-0.04 dB til -0.1 dB ved 5-50 GHz**
  - ”Uendelig” isolasjon
    - **-20 dB til -30 dB ved 10-50 GHz**

# Viktige svitsje-parametre (Var p.111)

- **Aktiverings-spenning**
  - Viktig parameter ved elektromekanisk design
    - Ønskelig: kompatibilitet med VLSI
    - Ikke noe problem for halvleder- komponenter
- **Svitsje-hastighet**
  - 50% kontroll-spenning → 90% (10%) av RF-utgangens omhylningskurve (envelope)
- **Svitsje-transienter**
  - Spennings-transienter på inngang/utgang pga forandring av kontroll-spenningen
- **Transition time**
  - Utgangens RF signal 10 – 90% eller 90 – 10%



# Viktige svitsje-parametre, forts.

- **Impedans-matching**

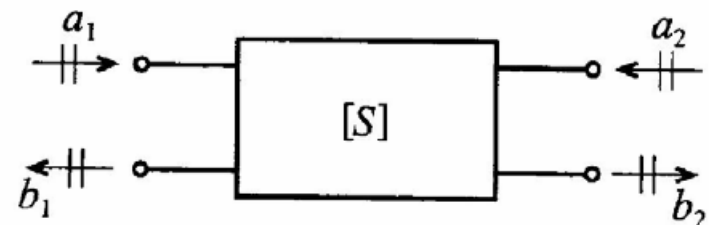
- Unngå refleksjoner ved impedanstilpasning både for inngang og utgang (ved on-off)

- **Inngangs-tap (IL = "insertion loss")**

- Defineres i "on-state"
- Forholdet mellom signal ut ( $b_2$ ) versus signal inn ( $a_1$ )
- **IL** = invers transmisjons-koeffisient =  $1/S_{21}$  i dB
  - $S_{21} = b_2/a_1$  når  $a_2 = 0$
- Designmål: minimalisering!
  - RF MEMS har lav IL ved flere GHz
  - Mye bedre enn for halvleder-svitsjer
  - "Skin-depth" -effekten gir tap og øker IL ved høye frekvenser

- **Serie-resistans**

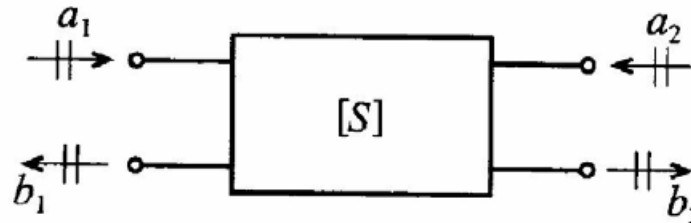
- Aktuell ved serie-kobling av svitsj
- Gir tap i signalnivå



# Viktige svitsje-parametre, forts.

- **Isolasjon**

- Defineres i ”**off-state**”
- Det **inverse** forholdet mellom signal ut ( $b_2$ ) versus signal inn ( $a_1$ )
  - Defineres ved  $1/S_{21}$  i dB
- Alternativt: Det inverse forholdet mellom signal tilbake til inngangen ( $b_1$ ) versus signal inn på utgangen ( $a_2$ )
  - Defineres ved  $1/S_{12}$  i dB
- Stor verdi  $\rightarrow$  liten kobling mellom terminalene



# Viktige svitsje-parametre, forts.

- **Båndbredde**
  - Vanligvis angis øvre grense
    - Resistans og parasittiske reaktanser influerer
- **Resonans-frekvens**
  - Angir frekvensen der svitsjen begynner å "svinge"
  - Resonans oppstår hvor potensiell og kinetisk energi "resonerer"
    - $j\omega L = -1/j\omega C$
    - Reaktansene er motsatt like store
    - Avhengig av k og m  $\rightarrow 1/C$  og L
  - Operasjonsområdet bør ligge **utenfor** frekvensen for naturlig svingemodus
  - $\rightarrow$  Begrenser minimal- eller maksimal-hastigheten svitsjen kan operere ved

# Viktige svitsje-parametre, forts.

- **RF effekt-håndtering**
  - Angivelse av hvor **lineariteten** mellom effekt ut og inn ikke lenger er tilfredsstillt
  - Mulig degradering av svitsj
- **Fase og amplitude "tracking" og "matching"**
  - Mål for hvor godt signalet beholder "formen"
  - Viktig for "multi-throw" svitsjer
  - Hver gren kan ha ulik lengde og tap, noe som gir forskjell i fase og amplitude
- **"Intercept" punkt**
  - Et mål for når forvrengning ("distortion") av effekt ut versus effekt inn opptrer

# Viktige svitsje-parametre, forts.

- **Livs-cyklus** og degradering
  - Påvirkning fra omgivelsene
  - Utmattelse
  - Viktig for alle enheter som inneholder **bevegelige deler!**

# Design av RF MEMS svitsjer

- **Elektromekanisk** design I
- Videre innhold i forelesningen
  - Designparametre som bestemmer ”pull-in”
  - Effekt av dielektrikum
  - Ruhet
  - Forenklet analyse av cantilever beam
    - Elastisitet
    - Utbøyning av bjelke
  - Mekanisk oppheng
    - Foldede oppheng
    - Materialvalg

# Elektromekanisk operasjon

- Virkemåten baserer seg på **pull-in** -effekten
  - Karakteristika ved pull-in
    - Membran/bjelke slår ned ved 1/3 av gapet
    - Pull-in spenning:

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8K}{27\epsilon_0 W w}} g_0^3$$

- Def av parametre:
  - K fjærens elastiske konstant
  - $g_0$  initielt gap
  - $A=W*w$  = overlappings-arealet

# Drøfting av designparametre

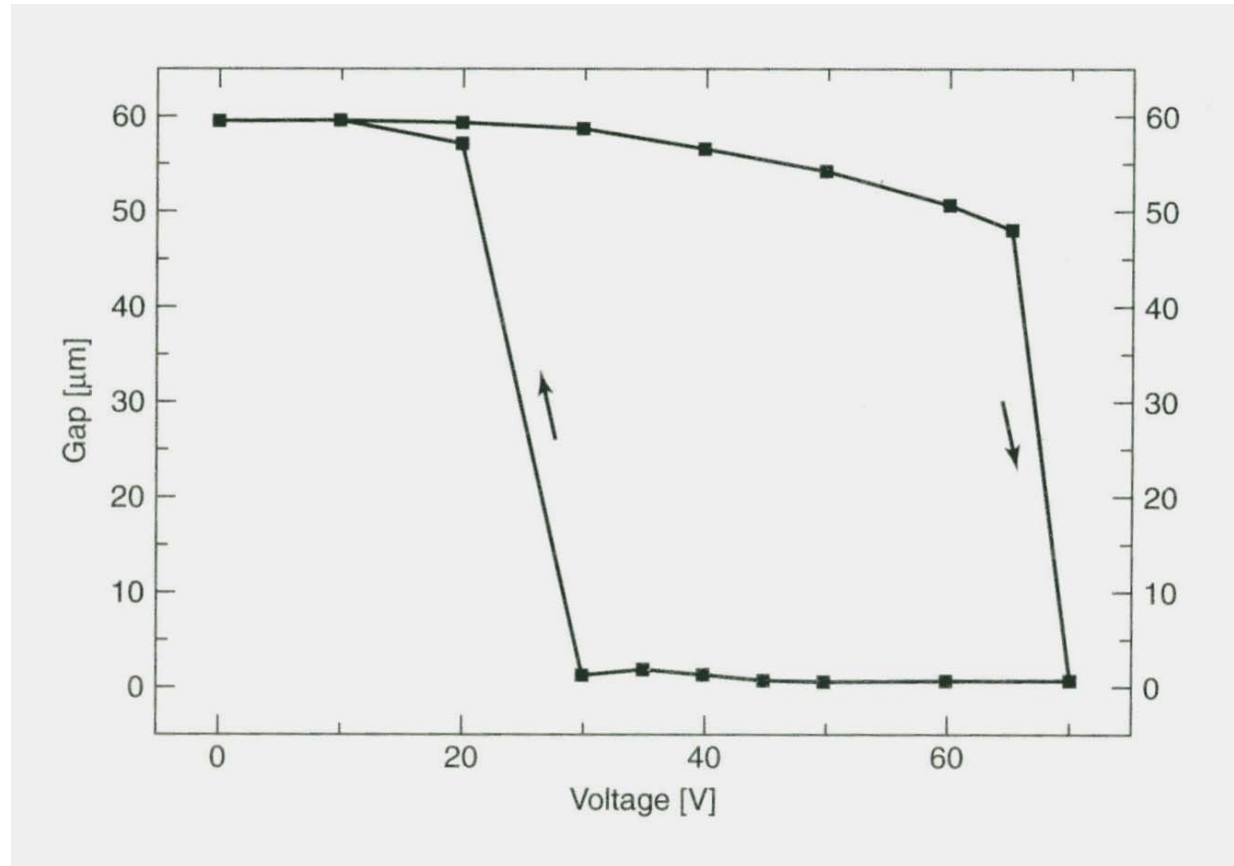
- $V_{PI}$ 
  - Bør være lav for CMOS spenningskompatibilitet
- $A=W*w$ 
  - Bør være stor. Begrenser seg pga krav om kompakthet
- $g_0$ 
  - Bør være lav. Avhengig av ytelse (yield) ved fremstilling. Verdi må vurderes opp mot RF-ytelse (return loss (=tap ved refleksjon) og isolasjon)
- $K$ 
  - Lav spenning ved myk fjær.  $K$  kan tilpasses ved utforming av opphengs-armene (mekanisk design). Må sørge for "release"

$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8K}{27\epsilon_0 W w} g_0^3}$$

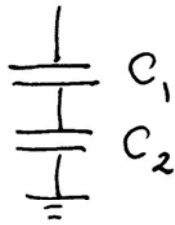
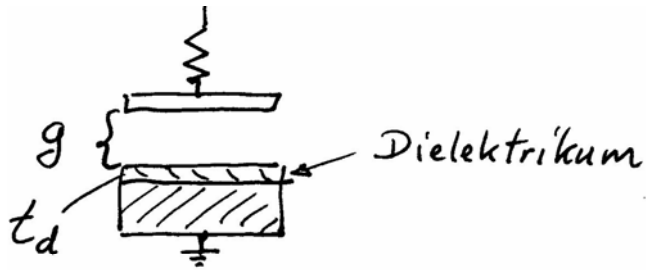


# Hysteresese

- En kapasitiv svitsj har hysteresese-egenskaper ved på/av



# Parallell plate kapasitans for shunt svitsj



$$C_1 = \epsilon_0 \frac{A}{g}, C_2 = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{t_d}$$

$$Z = \frac{1}{sC_{up}} = \frac{1}{sC_1} + \frac{1}{sC_2}$$

$$C_{up} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}}$$

$$C_{up} = \frac{1}{\frac{g}{\epsilon_0 A} + \frac{t_d}{\epsilon_0 \epsilon_r A}} = \frac{\epsilon_0 A}{g + \frac{t_d}{\epsilon_r}} \approx \frac{\epsilon_0 A}{g_{eff}}$$

Down-state

$$C_d = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{t_d} \quad \text{Fringe field neglisjerbart}$$

Down-state / up-state

$$\frac{C_d}{C_{up}} = \frac{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r A}{t_d}}{\frac{\epsilon_0 A}{g_{eff}} + C_f} \approx \frac{\epsilon_r g_{eff}}{t_d} \approx \frac{\epsilon_r g}{t_d}$$

Fringe field effekt

Typisk verdi 60 - 120

# Electromechanical design of RF MEMS switch (2)

Hysteresis of capacitive switch (source: H. Tilmans)

$g_0 = \text{zero-voltage gap spacing}$

$$g = g_0 - x$$

$$g_{\text{eff}} = g_0 + \frac{g_{\epsilon}}{\epsilon_r} \approx g_0$$

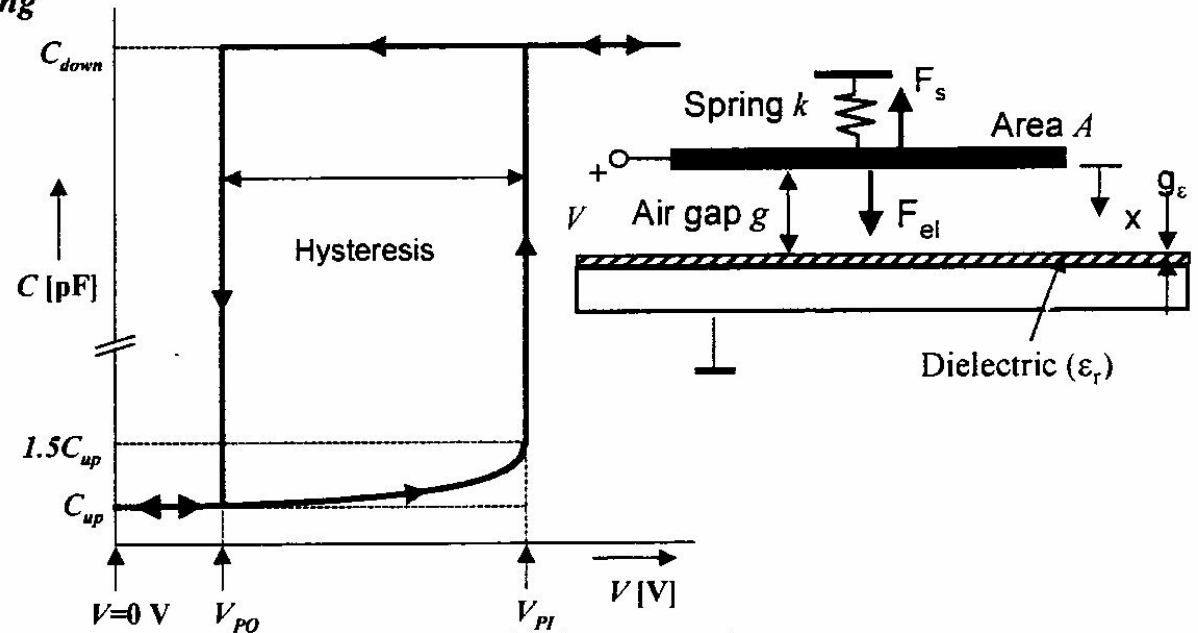
$$F_{\text{el}} = \frac{\epsilon_0 A V^2}{2g^2}$$

$$F_s = k(g_0 - g)$$

$$C_{\text{up}} = C(V=0) = \epsilon_0 \frac{A}{g_{\text{eff}}}$$

$$C_{\text{down}} = C(V > V_{\text{PI}}) = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{g_{\epsilon}}$$

$$\frac{C_{\text{down}}}{C_{\text{up}}} = \frac{\epsilon_r g_{\text{eff}}}{g_{\epsilon}} \approx \frac{\epsilon_r g_0}{g_{\epsilon}}$$



$$V_{\text{PO}} = \sqrt{\frac{2kg_0g_{\epsilon}^2}{\epsilon_r^2\epsilon_0A}}$$

$$V_{\text{PI}} = \sqrt{\frac{8}{27} \frac{kg_{\text{eff}}^3}{\epsilon_0A}}$$

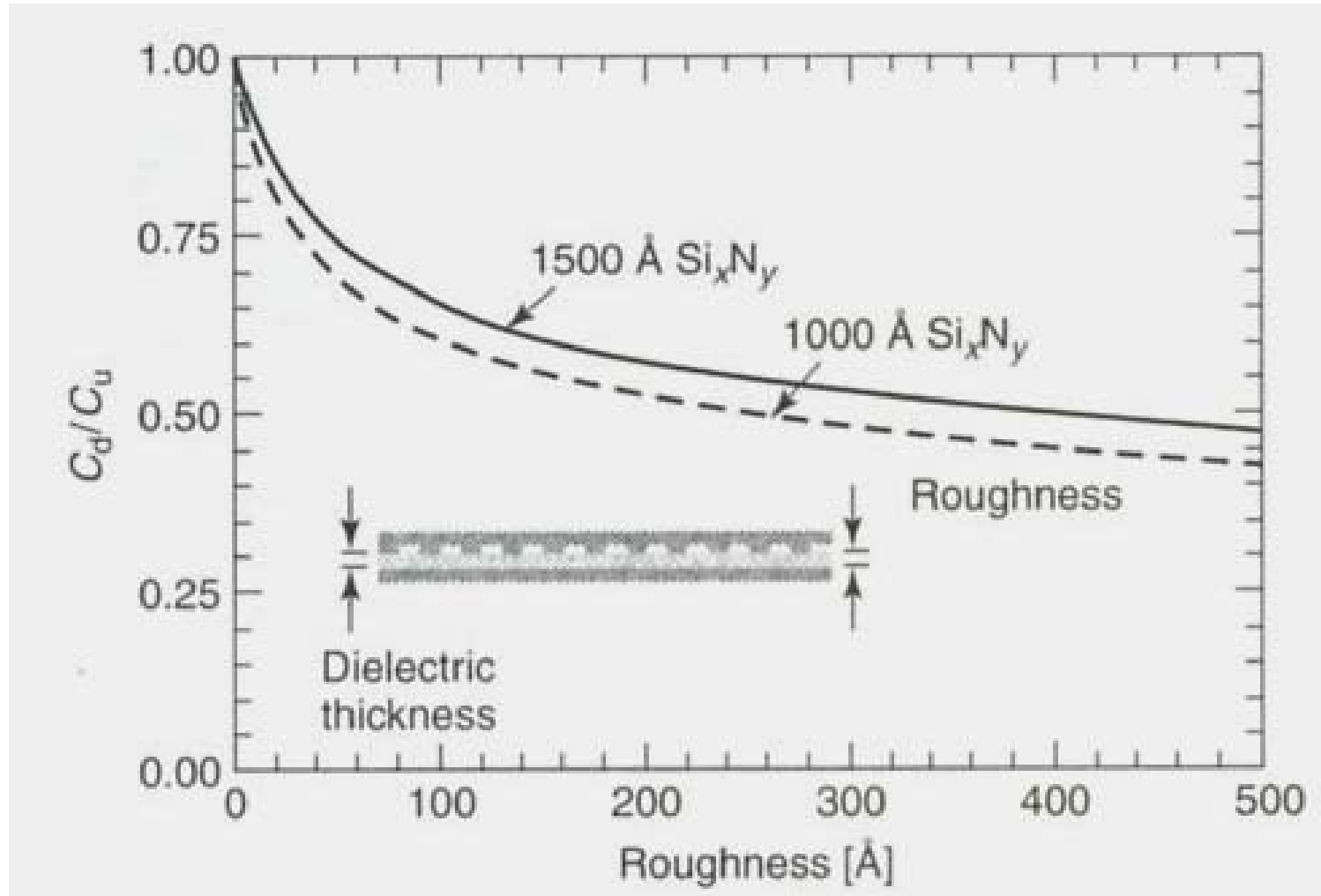
# Tykkelse av dielektrikum

- Tykkelsen av dielektrikum kontrollerer kapasitansforholdet  $C_{down}/C_{up}$ 
  - Tynt lag kan gi høyt  $C_d / C_u$  –forhold
    - Fordelaktig når det gjelder virkemåten
  - Problem med for tynt lag
    - Krevende deponeringsteknikk: "pinhole" problem
    - I praksis: min 1000Å,
    - Må stå imot spenning uten å bryte sammen, 20 – 50V
  - Dielektriske materialer med høyere  $\epsilon_r$  kan gi høyere  $C_d/C_u$ -forhold
    - $\epsilon_r$  fra 7.6 for SixNy  $\rightarrow$  40-200 for strontium-titanate-oxide
    - **PZT:  $\epsilon_r >1000!$**

# Ruhet

- Cd/Cu kan degraderes av ruheten
  - Når ruhet øker, minker forholdet
- Metal-to-metal: ruhet ("roughness") degraderer også kontakten
  - Større motstand i kontaktflaten
- Var fig 3.26 viser effekten av ruhet →

# Effekt av ruhet



# Forenklet analyse av cantilever beam

- Se på samspill mellom **elastiske** og **elektrostatiske** egenskaper
- Først litt om **elastisitet** →
  - Slides fra Arlington



# Axial Stress And Strain

**Stress:** force applied to surface

$$\sigma = F/A$$

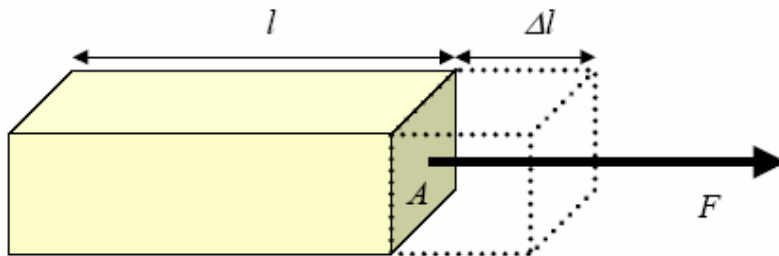
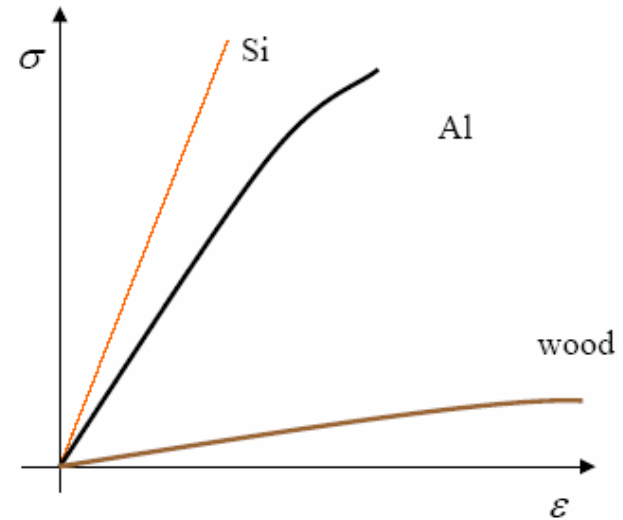
measured in N/m<sup>2</sup> or Pa

compressive or tensile

**Strain:** ratio of deformation to length

$$\varepsilon = \Delta l / l$$

measured in %, ppm, or microstrain



Texas Christian University

Department of Engineering

Ed Kolesar

**Young's Modulus:**

$$E = \sigma / \varepsilon$$

**Hooke's Law:**

$$K = F / \Delta l = E A / l$$

stress = spenning, strain = tøyning

# Shear Stress And Strain

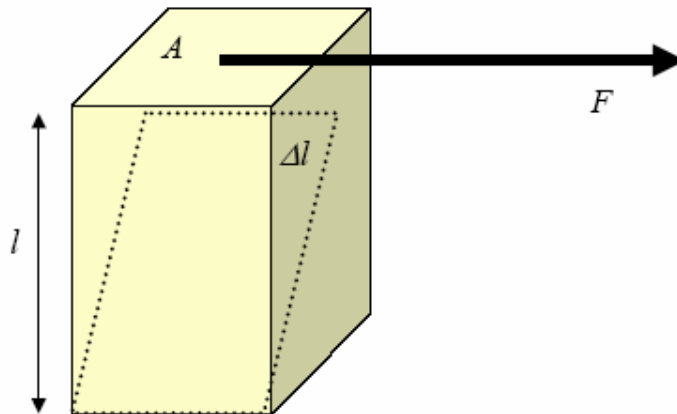
**Shear Stress:** force applied parallel to surface

$$\tau = F/A$$

measured in N/m<sup>2</sup> or Pa

**Shear Strain:** ratio of deformation to length

$$\gamma = \Delta l / l$$



**Shear Modulus:**

$$G = \tau / \gamma$$

# Poisson's Ratio

Tensile stress in x direction results in compressive stress in y and z direction (object becomes longer and thinner)

## Poisson's Ratio:

$$\nu = - \varepsilon_y / \varepsilon_x$$

= - transverse strain / longitudinal strain

Metals:  $\nu \approx 0.3$

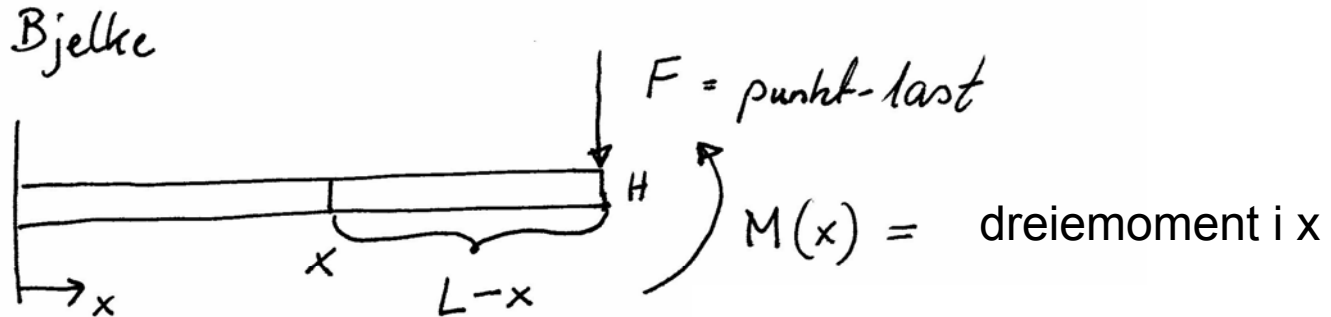
Rubbers:  $\nu \approx 0.5$

Cork:  $\nu \approx 0$



# Utbøyning av bjelke (beam)

- Anta at systemet kan approksimeres ved at:
  - aktiveringselektroden ikke bøyer seg
  - det elektrostatiske draget  $F$  betraktes som en konsentrert kraft i enden av den fleksible bjelken med lengde  $L$



$w(x) = \text{vertikalt displacement}$

$W = \text{bredde}$

**Bjelkeligning**

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = - \frac{M}{E \cdot I}$$

$I = \text{treghetsmomentet}$   
"area moment of inertia"

$$I = \frac{1}{12} W \cdot H^3$$

Bjelkeligning

$$\frac{d^2 w}{dx^2} = - \frac{M}{E \cdot I}$$

Treghetsmoment

$$I = \frac{1}{12} W \cdot H^3$$

Dreiemoment  
(kraft \* arm)

$$M(x) = -F(L-x)$$

$$\frac{d^2 w(x)}{dx^2} = \frac{F}{E \cdot I} (L-x)$$

$$w(0) = 0$$

Grensebetingelser

$$\frac{dw(0)}{dx} = 0$$

Anta løsning

$$w(x) = A + Bx + Cx^2 + Dx^3$$

$$\frac{dw(x)}{dx} = B + 2Cx + 3Dx^2$$

$$\frac{d^2w(x)}{dx^2} = 2C + 6Dx$$

Grensebetingelser

$$w(0) = 0 \quad \Rightarrow \quad A = 0$$

$$\frac{dw(0)}{dx} = 0 \quad \Rightarrow \quad B = 0$$

$$w(x) = \frac{FL}{2EI} x^2 \left( 1 - \frac{x}{3L} \right)$$

$$w(x) = \frac{FL}{2EI} x^2 \left(1 - \frac{x}{3L}\right)$$

Max. utbøyning ved  $x = L$

$$w(L) = \frac{L^3}{3EI} \cdot F$$

Stivheten i bjelken representerer en fjær med fjærkonstant  $k_{\text{cantilever}}$

Sammenlign med

$$F = k_{\text{cantilever}} \cdot \underbrace{\Delta W}_{w_{\text{max}}}$$

$$k_{\text{cantilever}} = \frac{F}{w(L)} = \frac{3EI}{L^3} = \frac{1}{4} E \cdot W \left(\frac{H}{L}\right)^3$$

# Fjærstivhet

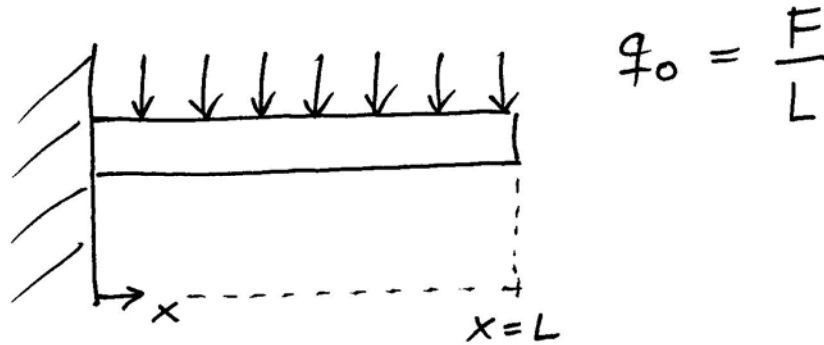
$$k_{\text{cantilever}} = \frac{F}{w(L)} = \frac{3EI}{L^3} = \frac{1}{4} E \cdot W \left(\frac{H}{L}\right)^3$$

For en **dobbeltinnspent** bjelke gjelder (Varadan p. 132)

$$k_{cc} = 16 E \cdot W \left(\frac{H}{L}\right)^3$$



# Beam equation for distributed force



$$EI \cdot \frac{d^4 w(x)}{dx^4} = q_0$$

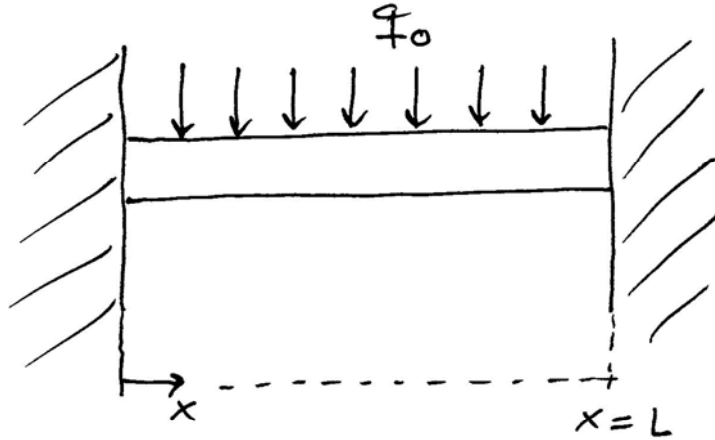
$$\begin{aligned} w(0) &= w'(0) = 0 \\ w''(L) &= w'''(L) = 0 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow w(x) = \frac{q_0}{24EI} x^2 (x^2 + 6L^2 - 4Lx)$$

$$w(L) = \frac{q_0}{8EI} L^4 = \frac{F}{8EI} L^3$$

$$k_{\text{cantilever}} \approx \frac{F}{w(L)} = \frac{8EI}{L^3} = \frac{2}{3} EW \left( \frac{H}{L} \right)^3$$

c-c-beam



$$EI \cdot \frac{d^4 w(x)}{dx^4} = q_0$$

$$\begin{aligned} w(0) &= w'(0) = 0 \\ w(L) &= w'(L) = 0 \end{aligned}$$

$$\Rightarrow w(x) = \frac{q_0}{24EI} x^2 (x^2 - 2Lx + L^2)$$

$$w\left(\frac{L}{2}\right) = \frac{q_0}{24EI} \cdot \frac{L^4}{8} = \frac{F}{24EI} \cdot \frac{L^3}{8}$$

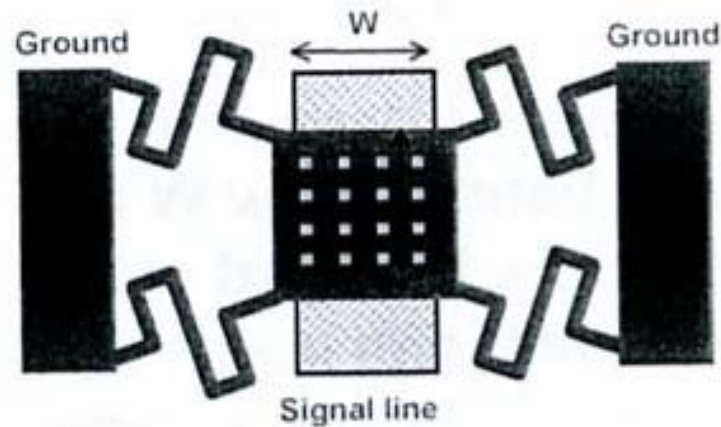
$$k_{c-c} \approx \frac{F}{w\left(\frac{L}{2}\right)} = \frac{24 \cdot 8 \cdot EI}{L^3} = 16 EI \left(\frac{H}{L}\right)^3$$

# Mekanisk oppheng

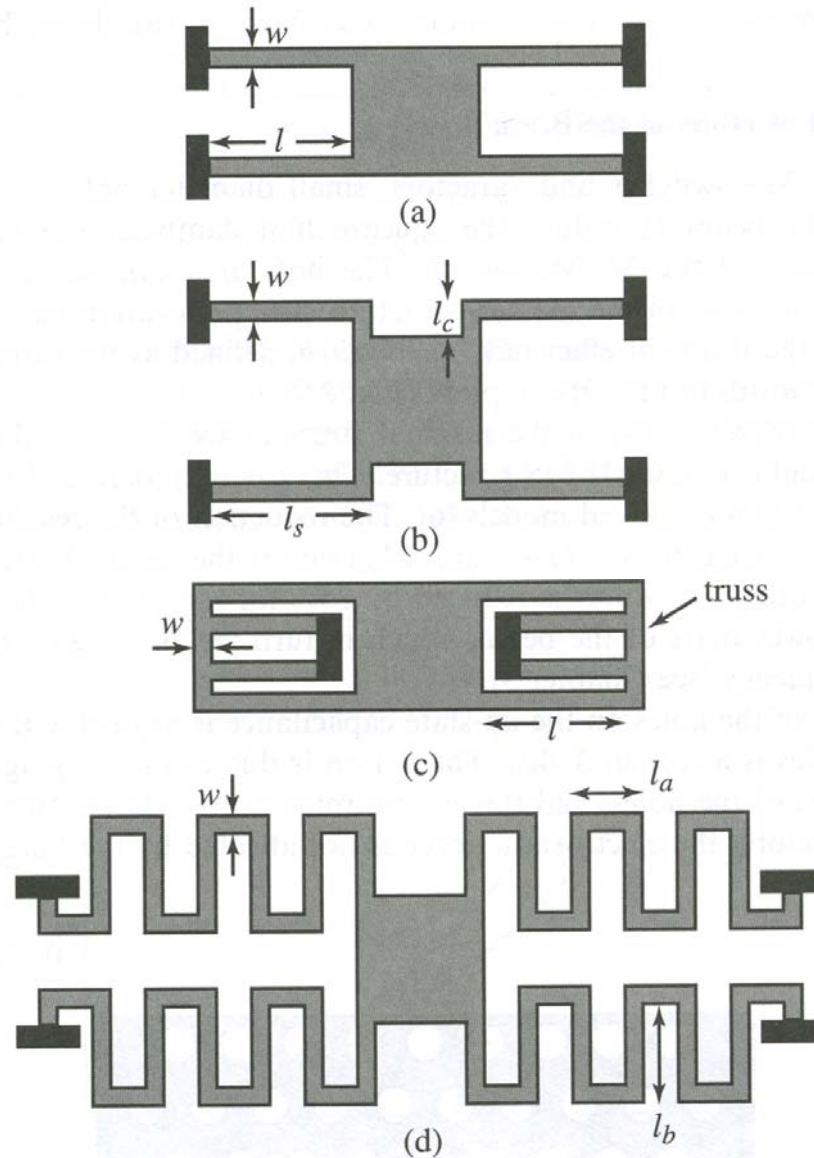
- Foldet oppheng benyttes ofte
- Hvorfor?
  - For å kunne bruke lav spenning ( $<5V$ ) for mobil kommunikasjons-systemer
- **→ Foldet oppheng gir lav K ved bruk av et lite areal**

# Reduksjon av aktiveringsspennning

- Aktiveringsspennning
  - Skal gi "pull-down"
  - Bør være  $<$  titalls  $V$
- Membran bør ikke være for stiv
  - **Bruk av meandere**
  - Foldede fjærer har lavere  $k$
  - **Arealeffektiv!**



# Ulike foldede oppheng



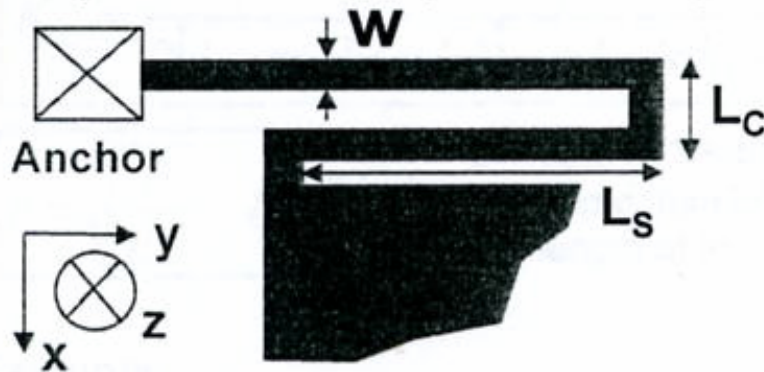
Rebeiz fig. 2.10



# Electromechanical design of RF MEMS switch (3)

## • Suspension (arm) folded design

Low voltage operation (<5V) for mobile communication applications requires folded suspension design: low-k in small area



- $L_s$ : span beam length
- $L_c$ : connector beam length
- $w$ : width
- $t$ : metal thickness
- $E$ : Young's modulus
- $\nu$ : Poisson's ratio

$$k_z = \frac{\left(\frac{Ew}{2}\right)\left(\frac{t}{L_c}\right)^3}{1 + \frac{L_s}{L_c} \left[ \left(\frac{L_s}{L_c}\right)^2 + 12 \frac{1+\nu}{1+(w/t)^2} \right]} \Bigg|_{L_s \gg L_c} \rightarrow 2Ew \left(\frac{t}{L_s}\right)^3$$

Independent of  $\nu$

$$k_x = 2Et \left(\frac{w}{L_c}\right)^3$$

$$k_y = 2Et \left(\frac{w}{L_s}\right)^3$$

# Materialvalg i oppheng?

- **Metal or polysilicon: case study (one) serpentine spring**

$L_s=220\mu\text{m}$ ,  $L_c=18\mu\text{m}$ ,  $t=2\mu\text{m}$ ,  $w=6\mu\text{m}$

<b>Au</b>	<b>Al</b>	<b>Polysilicon</b>
$E_{\text{Au}} \sim 80\text{GPa}$	$E_{\text{Al}} \sim 70\text{GPa}$	$E_{\text{Si-poly}} \sim 170\text{GPa}$
$\nu_{\text{Au}} \sim 0.22$	$\nu_{\text{Al}} \sim 0.3$	$\nu_{\text{Si-poly}} \sim 0.3$

**Elastic constant  $K_z (= 4k_z)$**

$$K_{z\text{Au}} = 0.721\text{N/m} \quad K_{z\text{Al}} = 0.631\text{N/m} \quad K_{z\text{poly}} = 1.533\text{N/m}$$

**Elastic constant  $K_x$**

$$K_{x\text{Au}} = 1.19 \times 10^4\text{N/m} \quad K_{x\text{Al}} = 1.04 \times 10^4\text{N/m} \quad K_{x\text{poly}} = 2.52 \times 10^4\text{N/m}$$

**Elastic constant  $K_y$**

$$K_{y\text{Au}} = 6.49\text{N/m} \quad K_{y\text{Al}} = 5.68\text{N/m} \quad K_{y\text{poly}} = 13.79\text{N/m}$$

**Estimated  $V_{\text{PI}}$  (area =  $100 \times 100 / 20 \times 20 \mu\text{m}^2$ , 2 $\mu\text{m}$ -gap):**

$$V_{\text{PIAu}} = 4.4\text{V}/21.9\text{V} \quad V_{\text{PIAl}} = 4.1\text{V}/20.6\text{V} \quad V_{\text{PIpoly}} = 6.4\text{V}/32\text{V}$$

# Materialvalg i oppheng, forts.

- Oppsummering
  - Metall synes å være et bedre valg for RF MEMS enn polySi for oppheng/nedtrekks struktur
    - Lav aktiveringsspenning (+)
    - Metall har i tillegg redusert resistivitet (+)
  - MEN: PolySi er stivere
    - Høyere aktiveringsspenning (÷)
    - Den elastiske kraften for å drive strukturen tilbake er større (+)
      - Hindrer ”stiction”