

INF5490 RF MEMS

L5: RF MEMS svitsjer, I

Dagens forelesning

- Svitsjer for RF og mikrobølge
 - Ulik teknologi
 - Typiske trekk
- Grunnleggende svitsje-strukturer
 - Prinsipper og virkemåte
- Definisjon av viktige parametre
- Design av RF MEMS svitsjer
 - Elektromekanisk design I

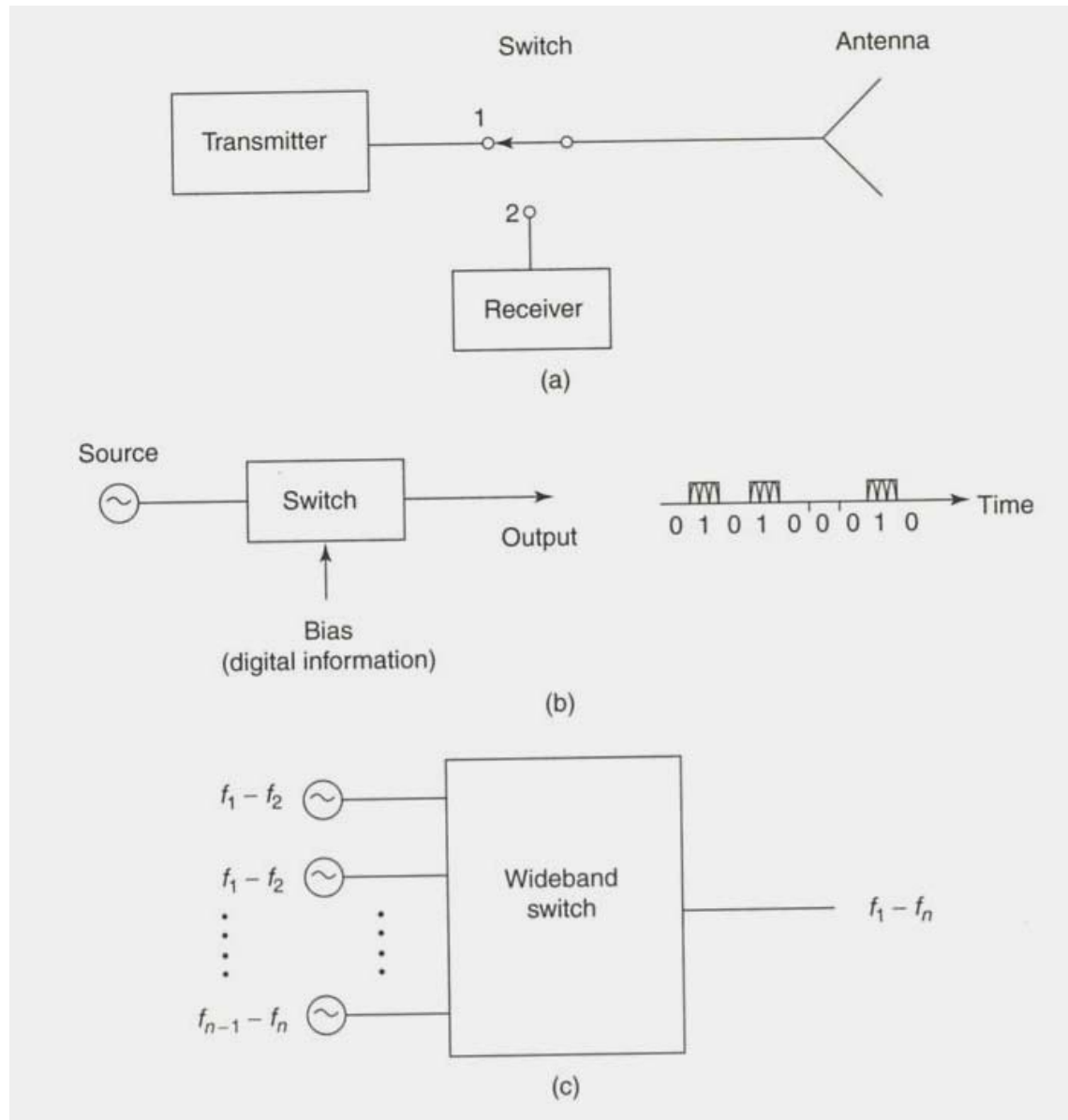
Neste forelesning, L6

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

Bakgrunn

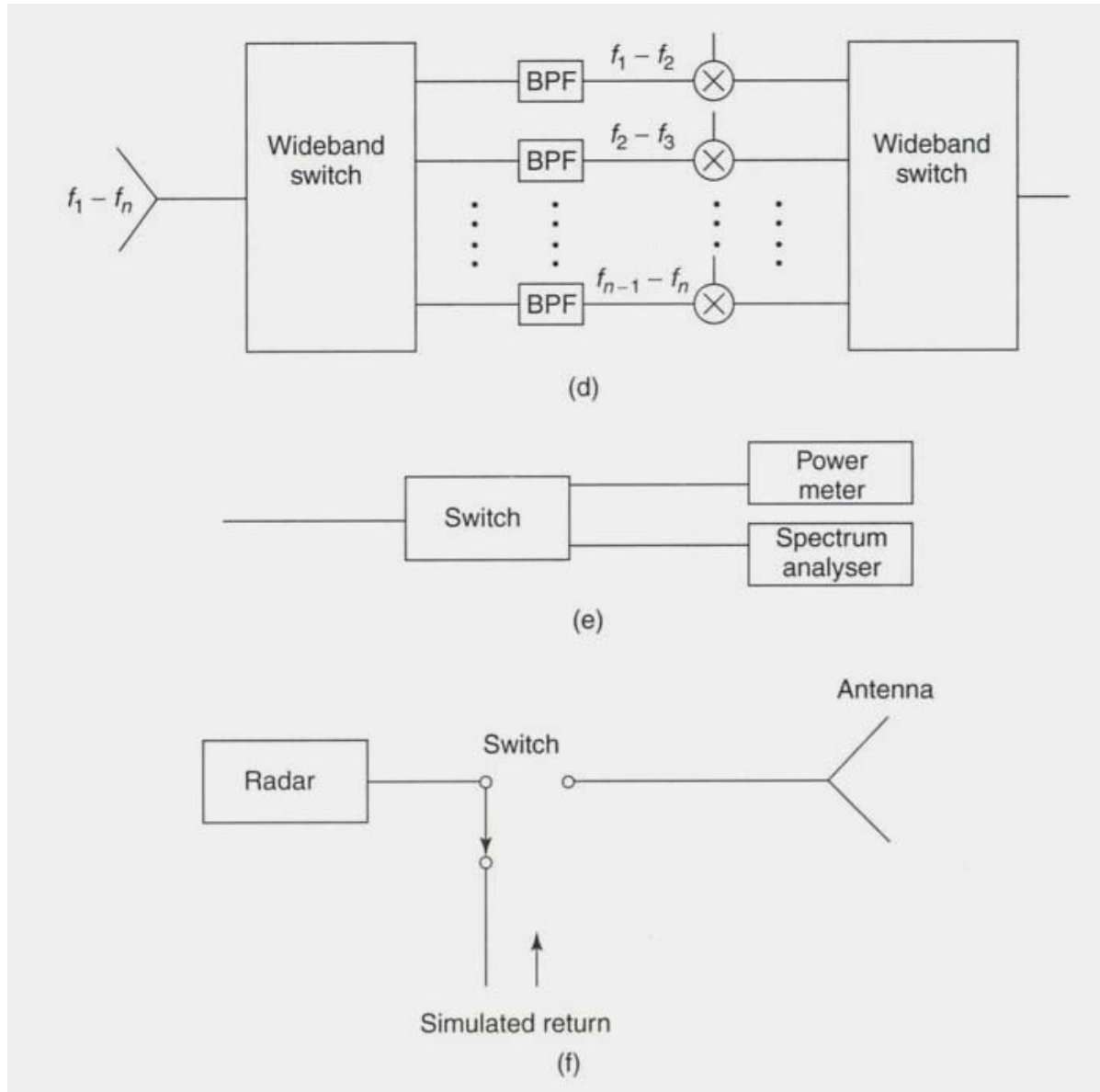
- **Svitsj - bryter - relé**
- Tidligste eks. på RF MEMS (78→)
 - En rekke implementasjoner finnes
 - Mest moden
- Sentral og viktig komponent i system-sammenheng
 - Signal-ruting
 - Re-dirigering av signaler: antenner, transmitter/receiver
 - Valg av filter i filter-bank
 - Nettverk for impedans-matching
 - Justering av forsterkning i forsterkere
- Telecom er dominerende bruker

Eks. på anvendelser av svitsjer



Varadan, fig. 3.1

Anvendelser, forts.



Varadan fig. 3.1

Krav og ønskemål

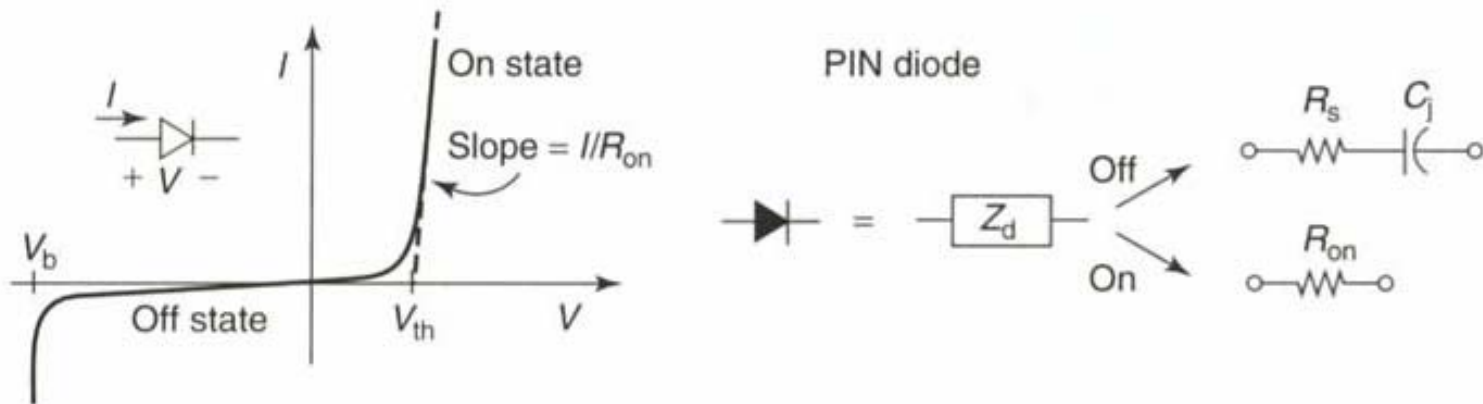
- Gode **ytelses-parametre** er viktig
 - Lavt tap
 - God isolasjon
 - Lite "cross-talk"
 - Kort svitsje-tid
 - Lang levetid
- Valg av **svitsje-teknologi** er avhengig av
 - RF frekvens
 - Evne til effekt-håndtering
 - Signalnivå
 - Hastighetskrav

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.
 - Kan integreres i Si (+)
 - FET degraderes ved høye frekvenser (-)
 - Stort "insertion loss", høye resistive tap (-)
 - Begrenset isolasjon (-)
 - Begrenset evne til å håndtere høye effekter (-)
- **Stort behov for MEMS svitsjer med forbedret ytelse!**

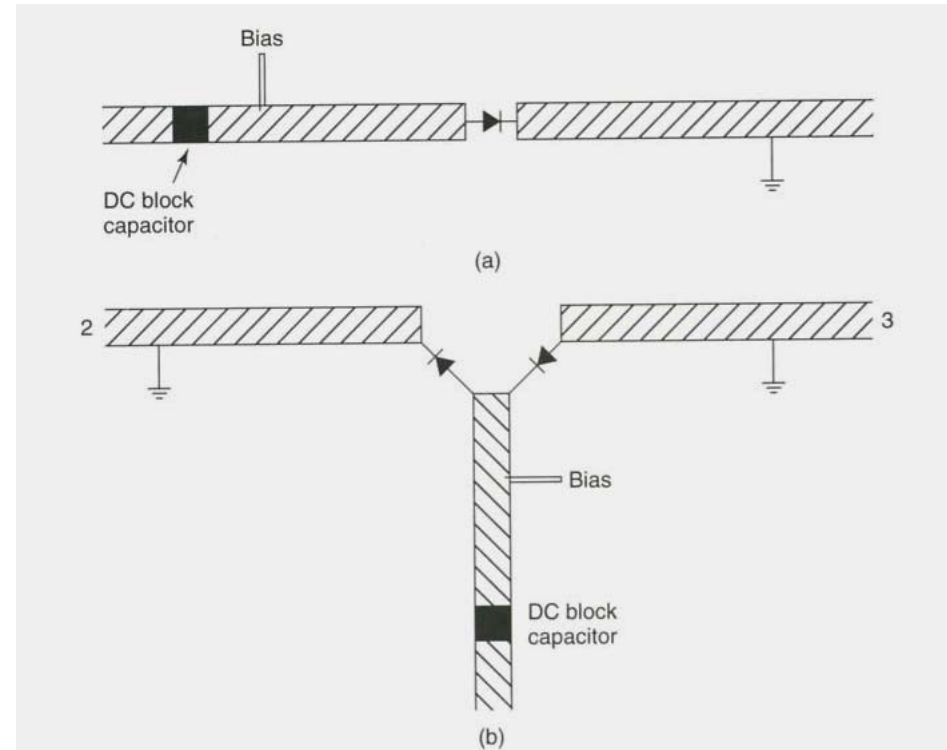
Velpøvet teknologi: PIN-dioden

- 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

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



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	± 3 –5	3–5
Current (mA)	0	3–20	0
Power consumption ^a (mW)	0.05–0.1	5–100	0.05–0.1
Switching time	1–300 μ s	1–100 ns	1–100 ns
C_{up} (series) (fF)	1–6	40–80	70–140
R_s (series) (Ω)	0.5–2	2–4	4–6
Capacitance ratio ^b	40–500 ^b	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

^aIncludes voltage upconverter or drive circuitry.

^bCapacitive switch only. A ratio of 500 is achieved with high- ϵ_r dielectrics.

Fordeler og typiske trekk ved RF MEMS svitsjer

FSRM



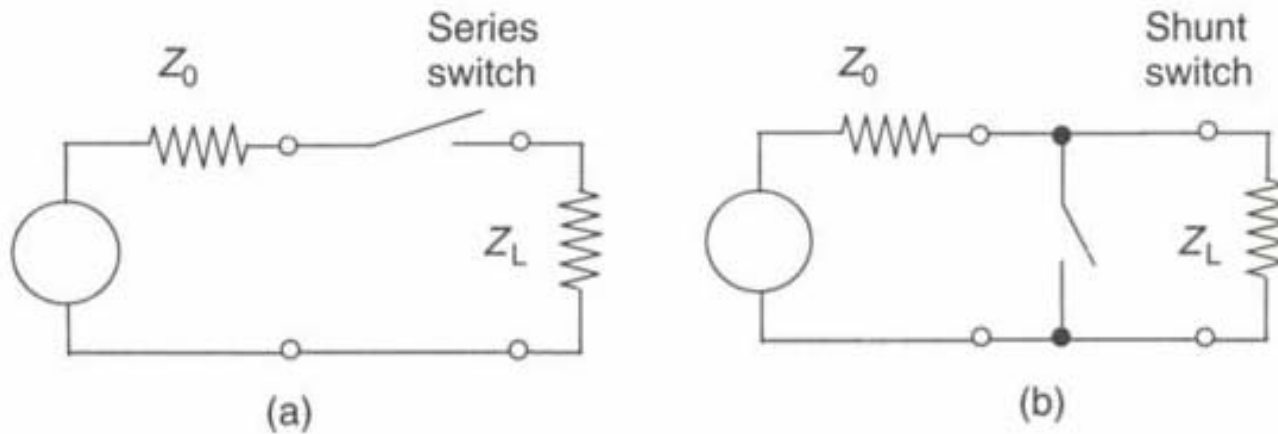
RF MEMS switch: key advantages and issues

- + • **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) ~10⁹-10¹⁰ cycles
no reliable switch to handle ~few Watts
- • **Packaging**: needs inert ambient & low humidity & **low cost**

49

To grunnleggende svitsjekonfigurasjoner



Grunnleggende svitsjestrukturer

- **Serie-svitsj**

- Kontakt-svitsj (relé) *

- Cantilever beam

- Kapasitiv (kontaktløs) svitsj

- RF-signaler forplantes gjennom C ($Z=1/j\omega C$)
 - Avhengig av verdien av C

- **Shunt-svitsj**

- Shunt kapasitiv svitsj *

- clamped-clamped beam (c-c beam)

- Shunt kontakt-svitsj

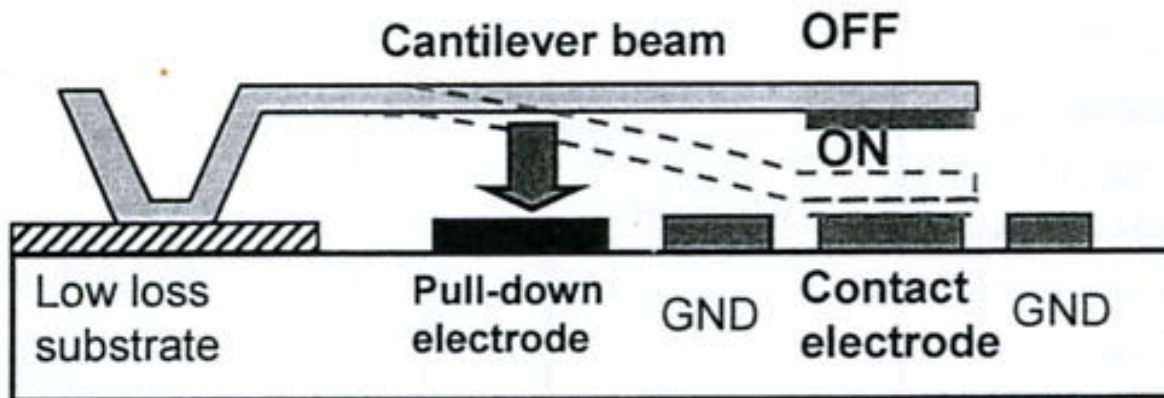
* mest vanlig

Ideelle krav – typiske parametre

- Serie svitsj
 - ”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

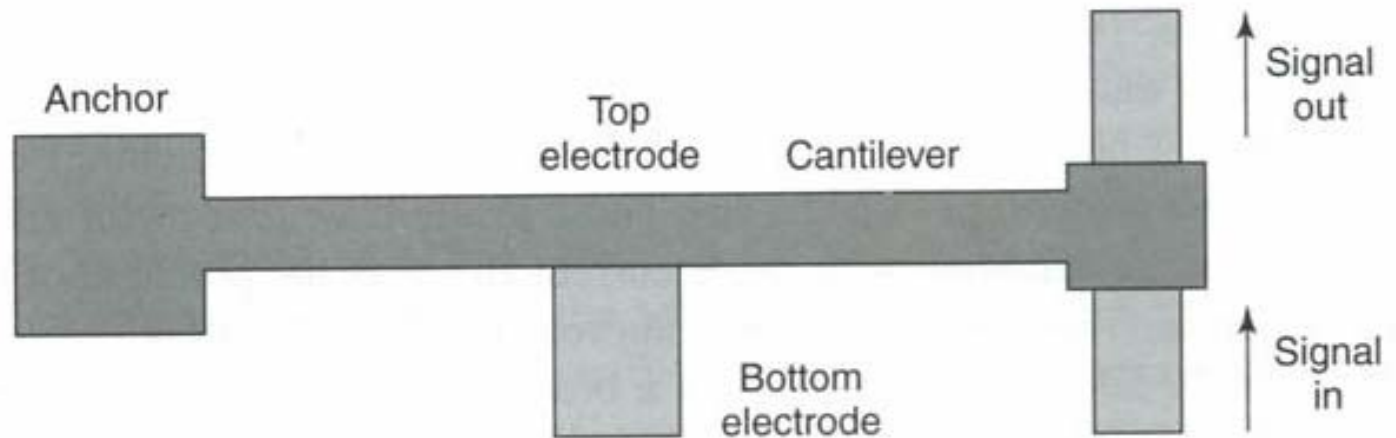
Serie kontaktsvitsj

- Cantilever beam svitsj

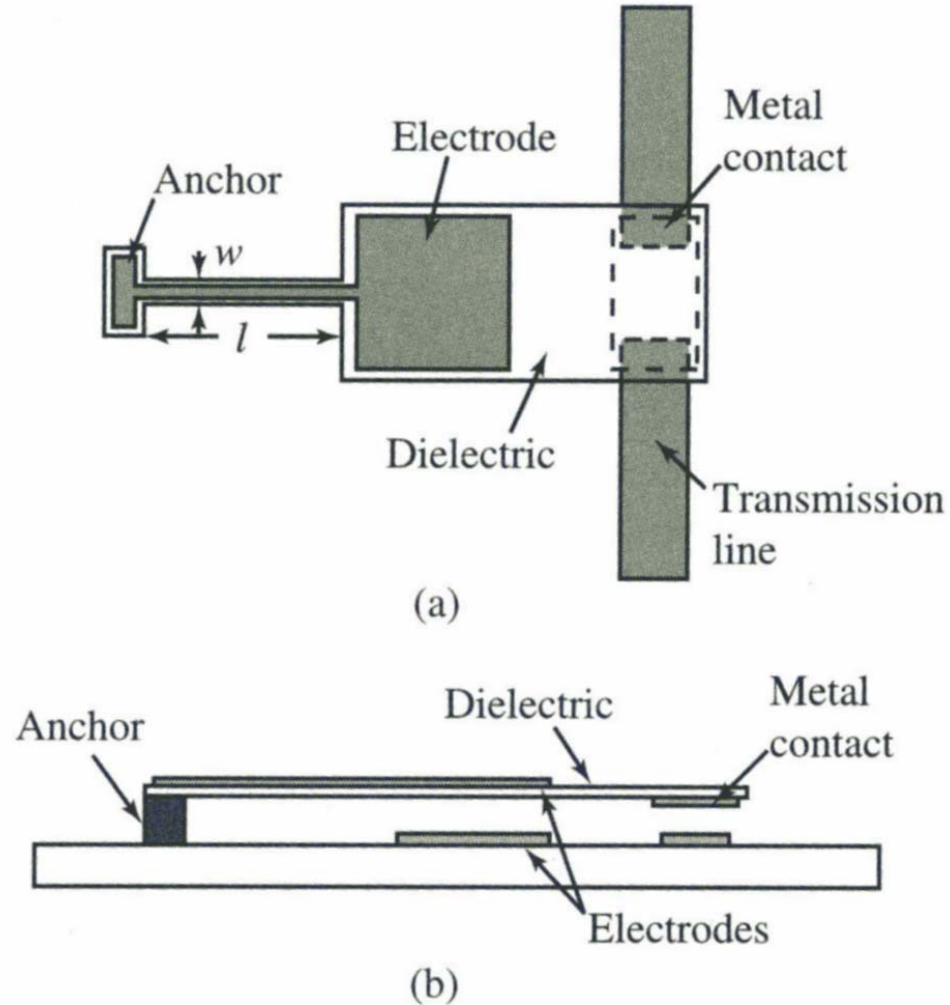


Signalforplantning inn i figuren

Signalforplantning på "tvers" av bjelken



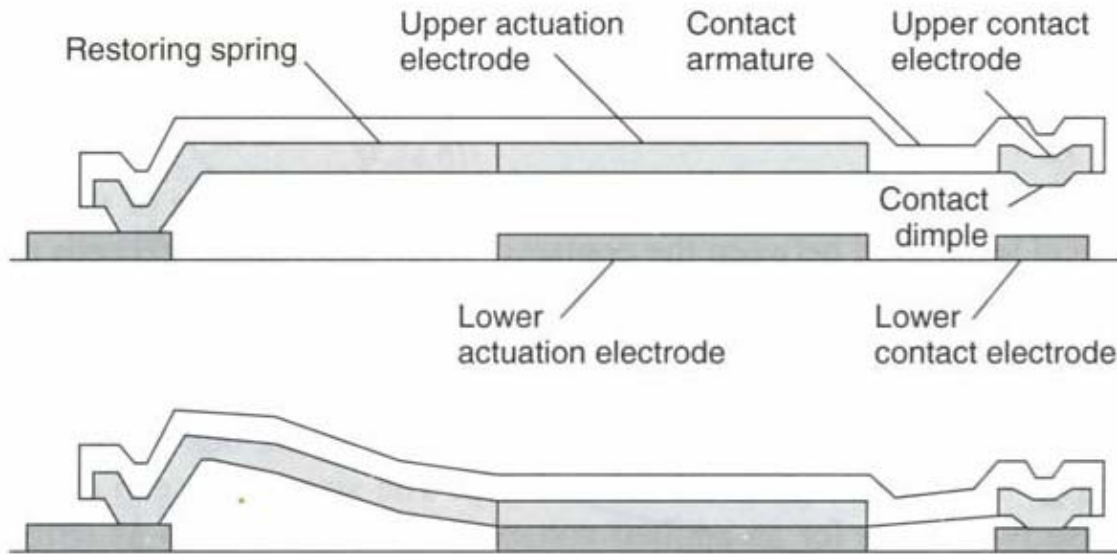
Prinsipiell virkemåte



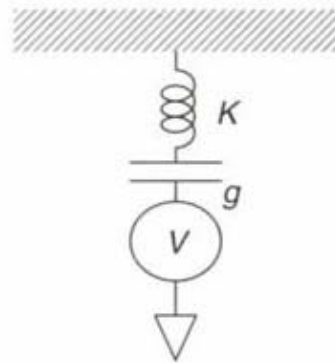
Catlever beam svitsj

- Separat pull-down elektrode
 - Styrespenning mellom bjelke og elektrode
 - Eget kontakt-metall i enden av bjelken
- Kritiske parametre
 - Kontakt-resistans for metall - metall
 - Overflate karakteristika (ruhet)
 - Antall kontakt-cycles
 - Pålitelighet
 - Spesielt viktig ved høye strømmer
 - Degradering/aldring

Mer realistisk struktur



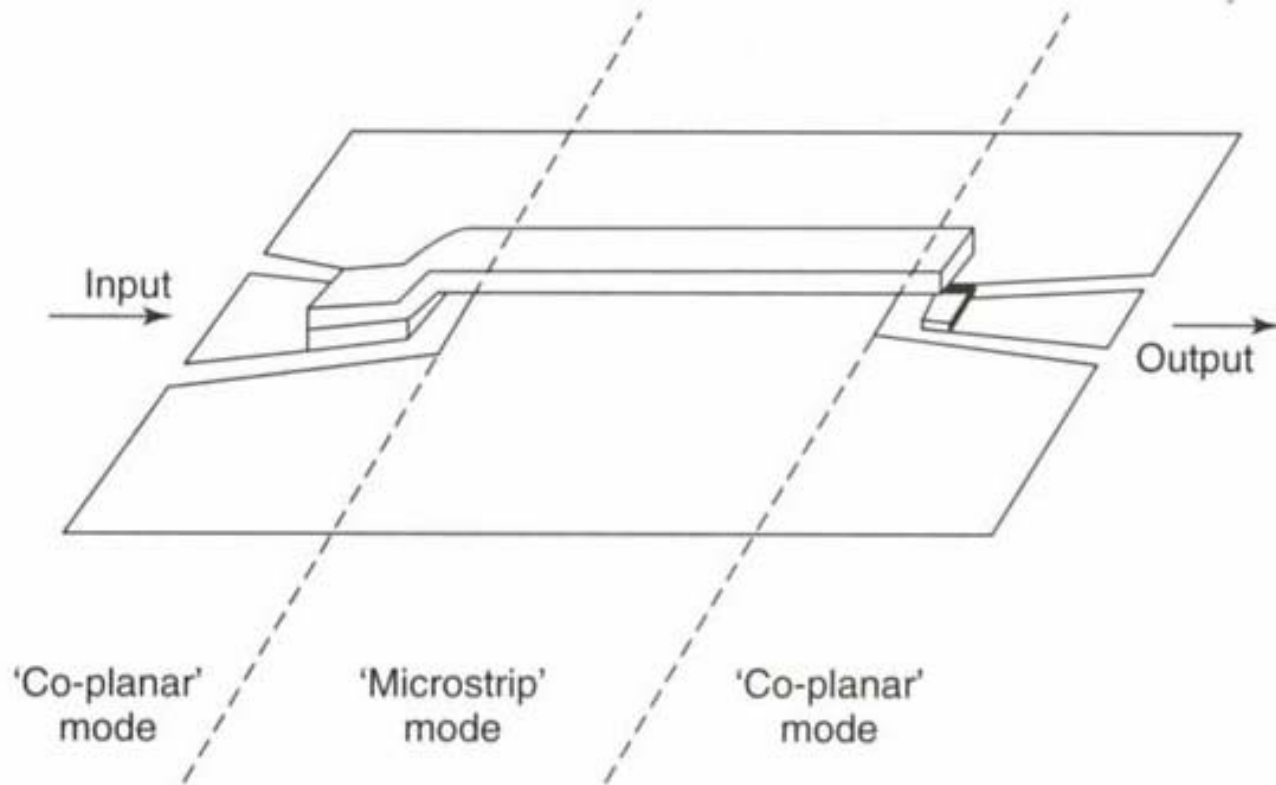
(a)



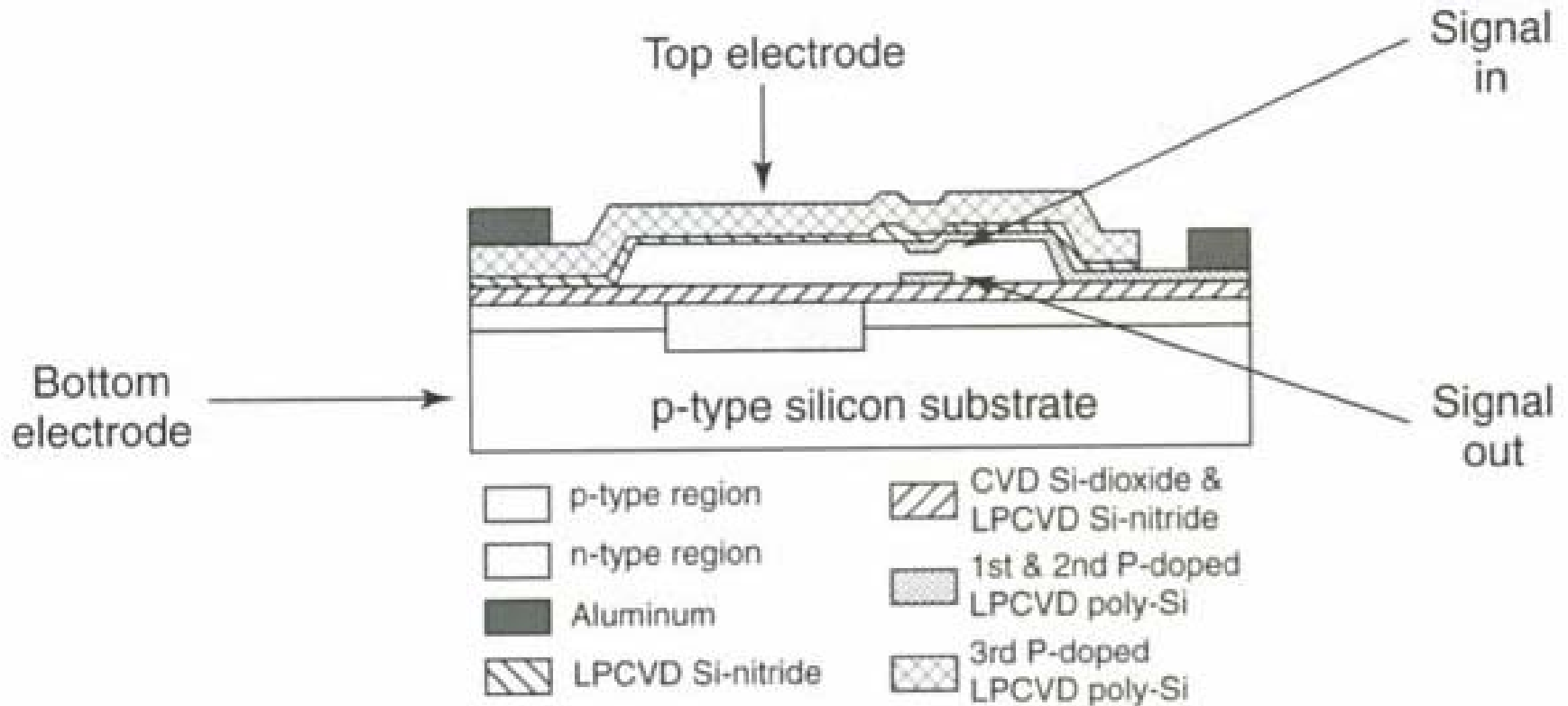
(b)

Varadan fig 3.16

Signalforplantning på langs



Doubly supported cantilever beam



Ideelle krav – typiske parametre

- Shunt svitsj
 - 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

Typisk shunt svitsj

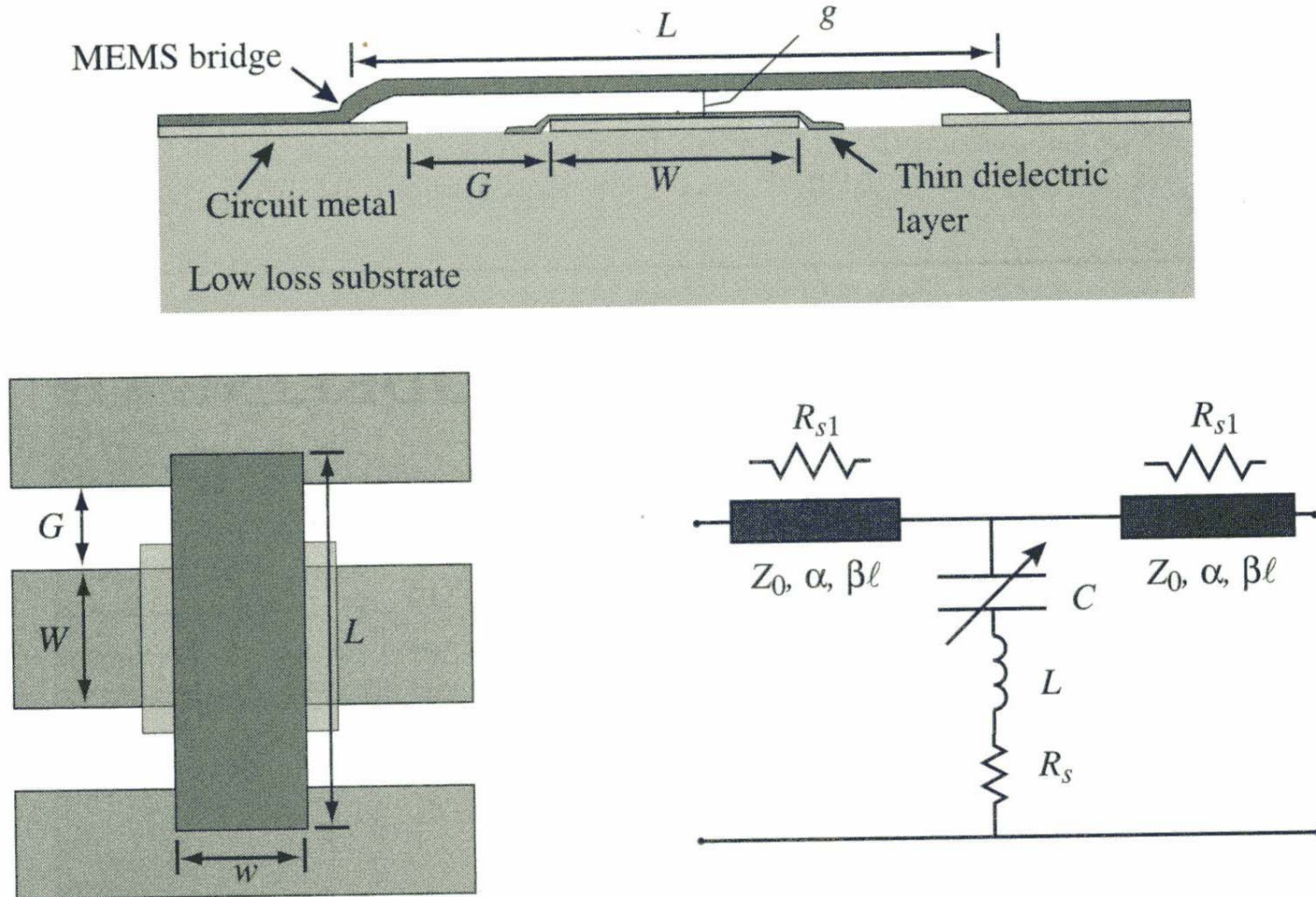
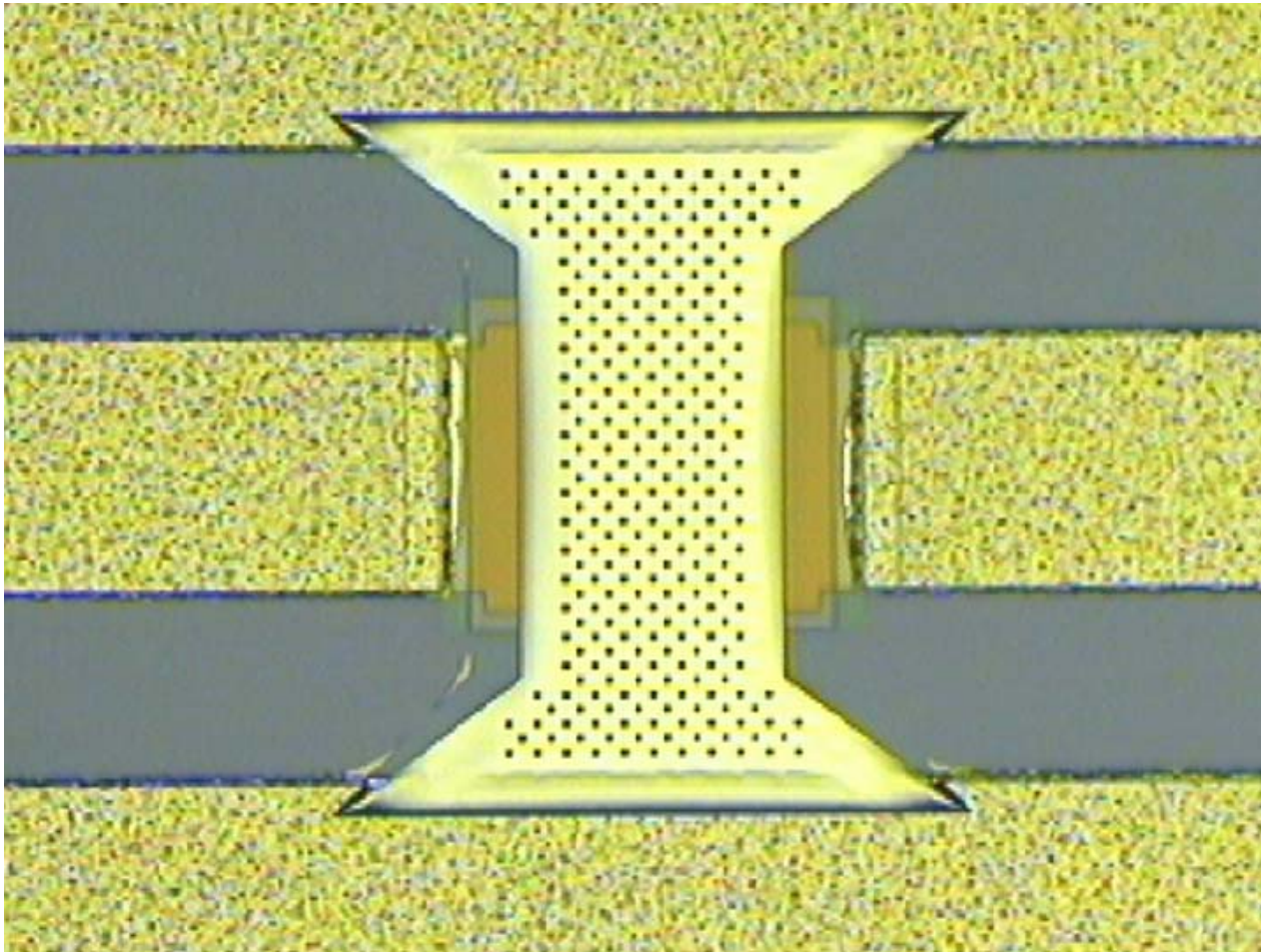


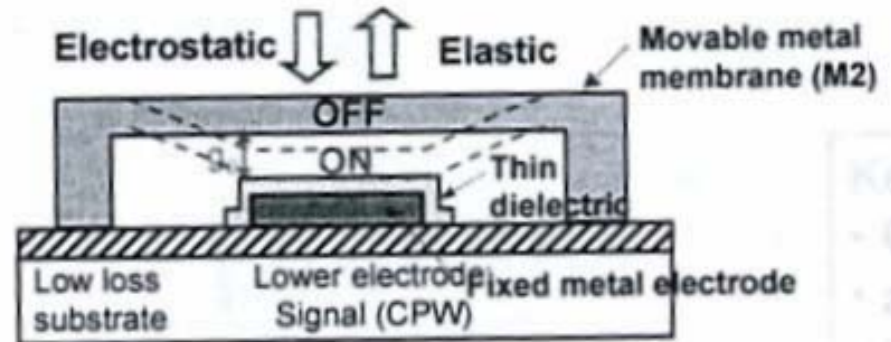
Figure 4.1. Illustration of a typical MEMS shunt switch shown in cross section and plan view. The equivalent circuit is also shown [6] (Copyright IEEE).

RF MEMS svitsj



Shunt kapasitiv svitsj, forts.

- Clamped-clamped beam (c-c beam)
 - Elektrostatisk aktivering
↔ elastisitet
- Signal overlagret aktiverings-spenningen
- Ingen direkte kontakt mellom metall
 - Dielektrikum mellom
 - C_{up} / C_{down} viktig
- CPW – coplanar waveguide signal



Shunt kapasitiv svitsj, forts.

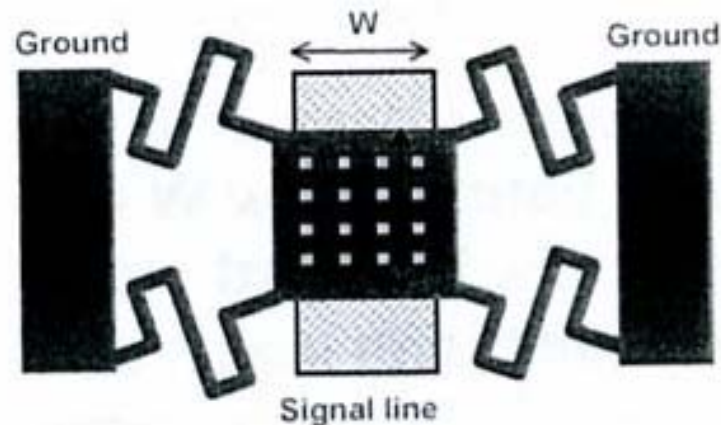
- $C_{\text{down}} / C_{\text{up}}$ bør være > 100
 - $C_{\text{down}} = C_{\text{stor}} = \mathbf{Z_{on}}$
 - $C_{\text{up}} = C_{\text{liten}} = \mathbf{Z_{off}}$
- Impedans $Z \sim 1/j \omega C$
 - For gitt ω :
 - Når C er liten, blir Z stor
 - \rightarrow **isolasjon**
 - Når C er stor, blir Z liten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

Kapasitiv svitsj, forts.

- Ledere og svitsjer må designes med hensyn på RF
- Svitsjen bør være kompatibel med IC-teknologi
- Pålitelighet $> 10E9$ svitsjinger før feil
 - $10E9$ er demonstrert

Reduksjon av aktiveringsspennning

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



Viktige svitsje-parametre (Var p.111)

- **Transition time**
 - Utgangens RF signal 10 – 90% eller 90 – 10%
- **Svitsje-hastighet**
 - 50% kontroll-spenning → 90% (10%) av RF-utgangens omhylningskurve (envelope)
- **Svitsje-transienter**
 - Spennings-transienter på inngang/utgang pga forandring av kontroll-spenningen

Viktige svitsje-parametre, forts.

- **RF effekt-håndtering**
 - Angivelse av hvor **lineariteten** mellom effekt ut og inn ikke lenger er tilfredsstillt
- **Impedans-matching**
 - Unngå refleksjoner ved impedanstilpasning både for inngang og utgang (ved on-off)
- **Båndbredde**
 - Vanligvis angis øvre grense
 - Resistans og parasittiske reaktanser influerer

Viktige svitsje-parametre, forts.

- **Inngangs-tap (IL = "insertion loss")**
 - Defineres i "on-state"
 - Forholdet mellom signal ut versus signal inn
 - IL = transmisjons-koeffisienten S_{21} i dB
 - Designmål: minimalisering!
 - RF MEMS har lav IL ved flere GHz
 - Mye bedre enn for halvleder-svitsjer
 - "Skin-depth" effekten øker IL ved høye frekvenser

Viktige svitsje-parametre, forts.

- **Isolasjon**

- Defineres i "off-state"
- Det **inverse** forholdet mellom signal ut versus signal inn
 - Stor verdi → liten kobling mellom terminalene
- Defineres ved S_{21} i dB

- **Serie-resistans**

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

Viktige svitsje-parametre, forts.

- **Aktiverings-spenning**

- Viktig parameter ved elektromekanisk design
 - Bør ikke være for høy
 - Ønskelig: kompatibilitet med VLSI
- Verdien er ikke noe problem for halvleder-komponenter

- **Livs-cyklus**

- Utmattelse, effekter fra omgivelsene
- Viktig for alle enheter som inneholder bevegelige deler

Viktige svitsje-parametre, forts.

- **Resonans-frekvens**

- Begrenser maksimal-hastigheten svitsjen kan operere ved ("toggles")
- 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
- LC-grener gir min eller max impedans avhengig av serie- eller shunt-kobling

Viktige svitsje-parametre, forts.

- **”Intercept” punkt**
 - Et mål for når forvrengning (”distortion”) av effekt ut versus inn opptrer
- **Fase og amplitude ”tracking” og ”matching”**
 - Viktig for ”multi-throw” svitsjer
 - Hver gren kan ha ulik lengde og tap, noe som gir forskjell i fase og amplitude

Design av RF MEMS svitsjer

- **Elektromekanisk** design
 - 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

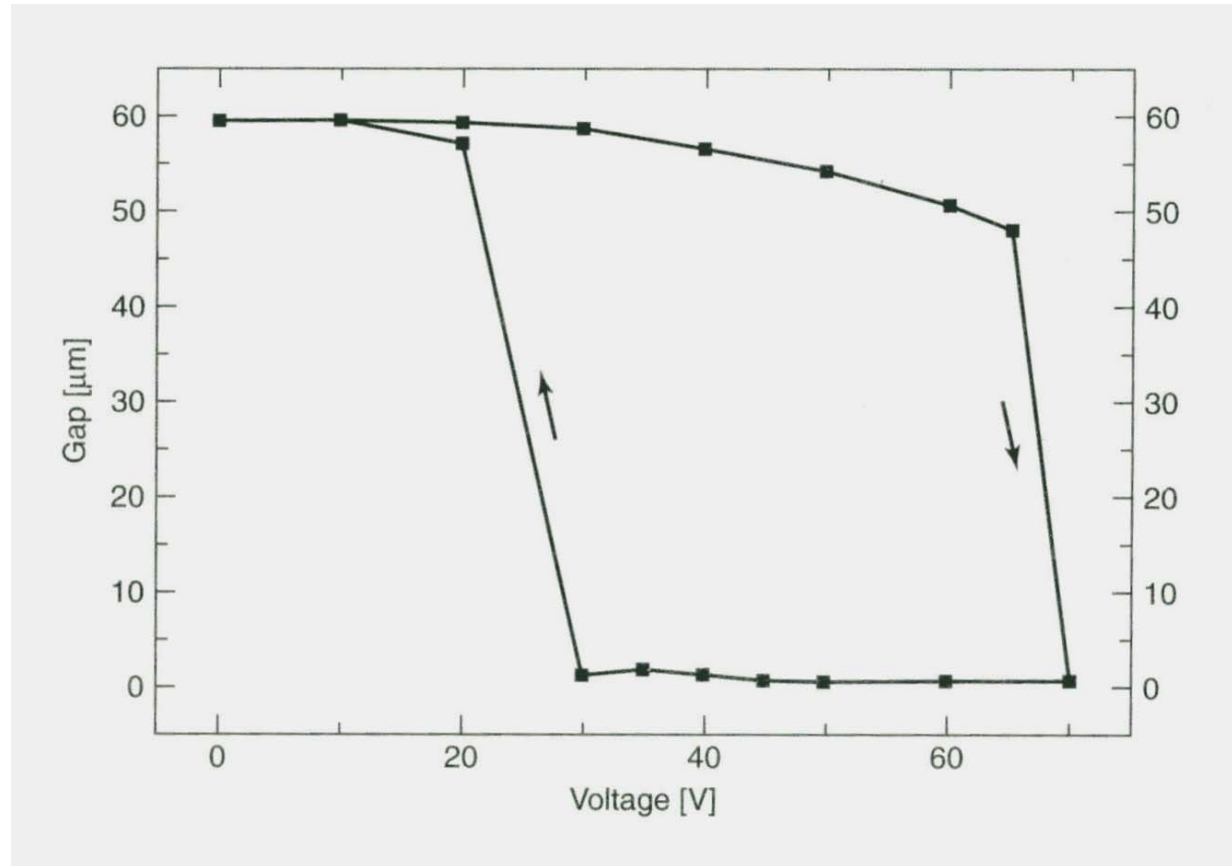
Drøfting av designparametre

- 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
 - Mest effekt når lav (myk). Kan tilpasses ved utforming av opphengsarmene (mekanisk design)

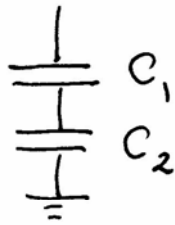
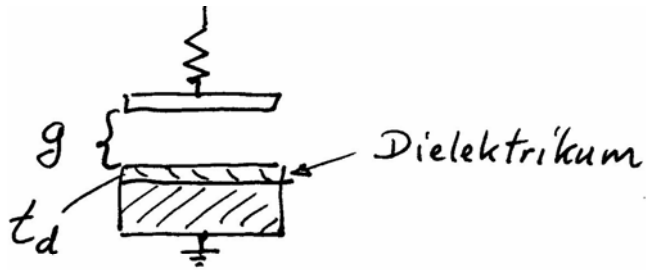
$$V_{PI} = \sqrt{\frac{8K}{27\epsilon_0 W w} g_0^3}$$

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)

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

$$g = g_0 - x$$

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

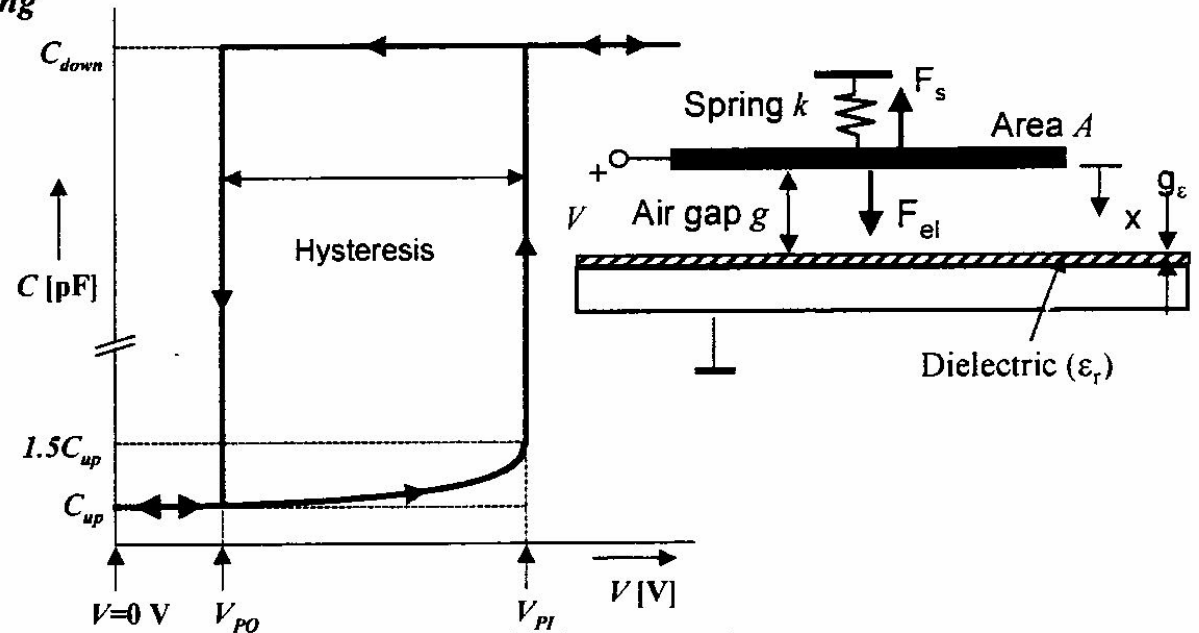
$$F_{\text{el}} = \frac{\epsilon_0 A V^2}{2g^2}$$

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

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

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

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



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

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

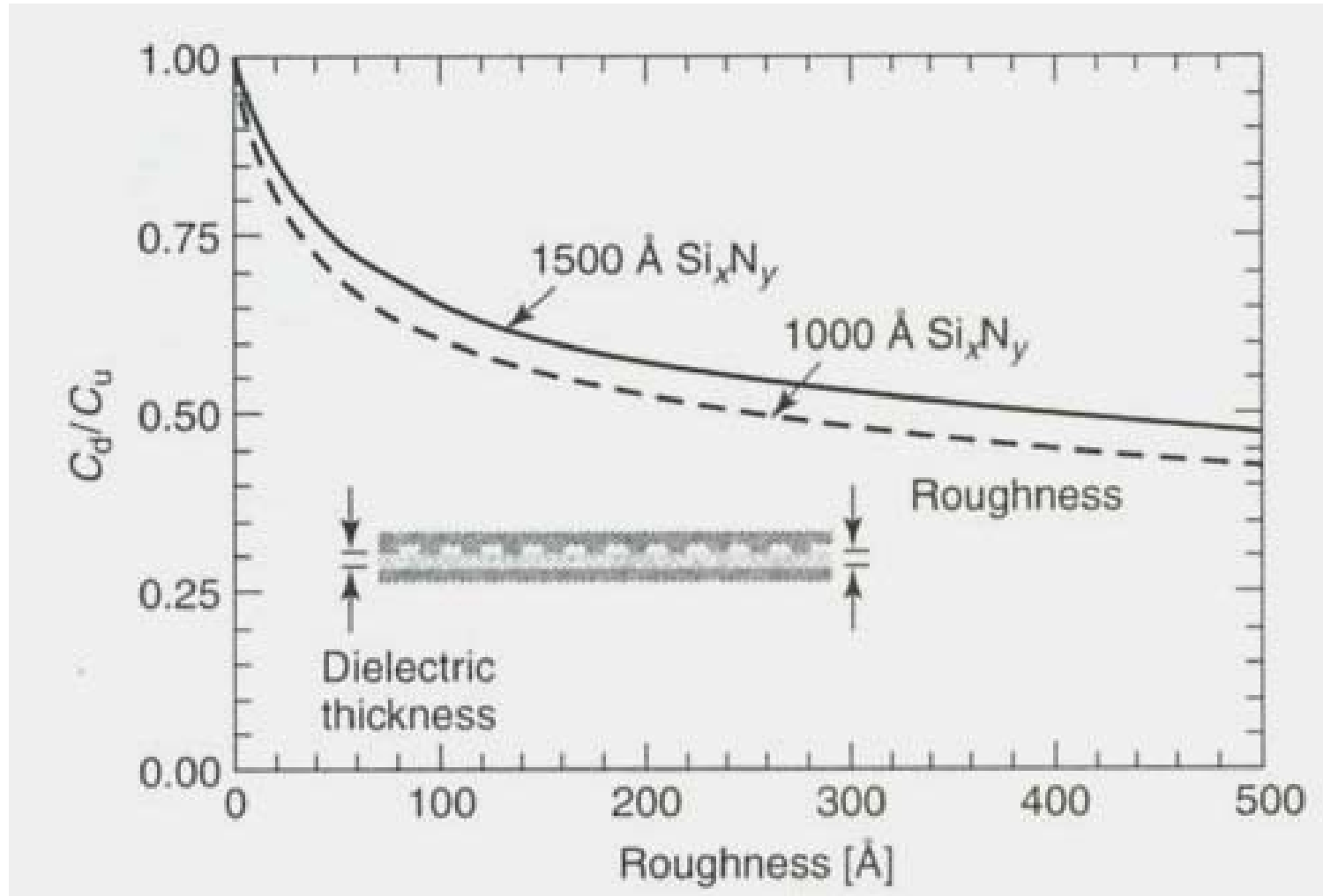
Tykkelse av dielektrikum

- Tykkelsen av dielektrikum kontrollerer kapasitans-forholdet 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
 - Materialer med høyere ϵ_r kan gi høyere C_d/C_u -forhold
 - ϵ_r fra 7.6 for SixNy \rightarrow 40-200 for strontium-titanate-oxide

Ruhet

- Cd/Cu kan degraderes av ruheten
 - Når ruhet øker, minker forholdet
- Metal-to-metal: ruhet ("roughness") degraderer også kontakten
 - Større motstand
- 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

$$\sigma = F/A$$

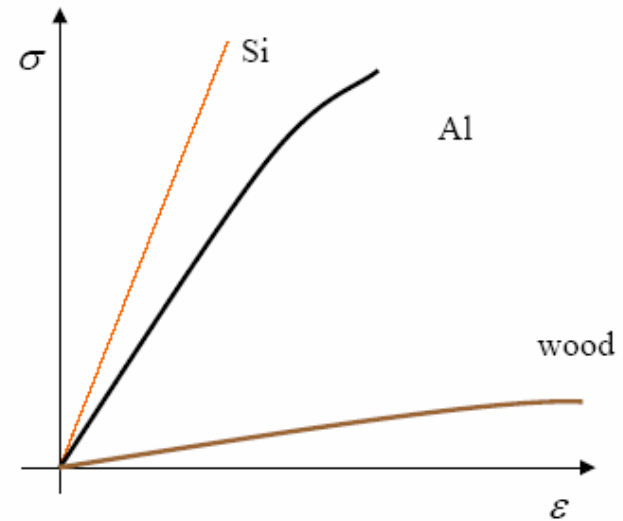
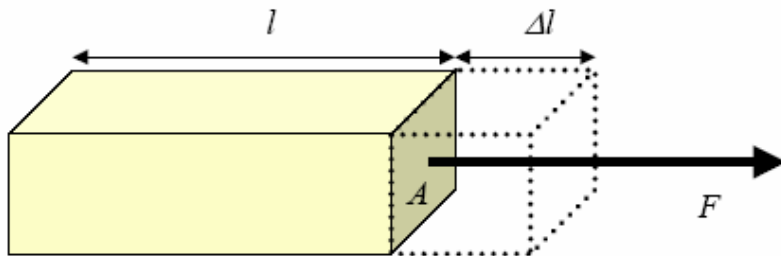
measured in N/m^2 or Pa

compressive or tensile

Strain: ratio of deformation to length

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

measured in %, ppm, or microstrain



Young's Modulus:

$$E = \sigma / \varepsilon$$

Hooke's Law:

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

Shear Stress And Strain

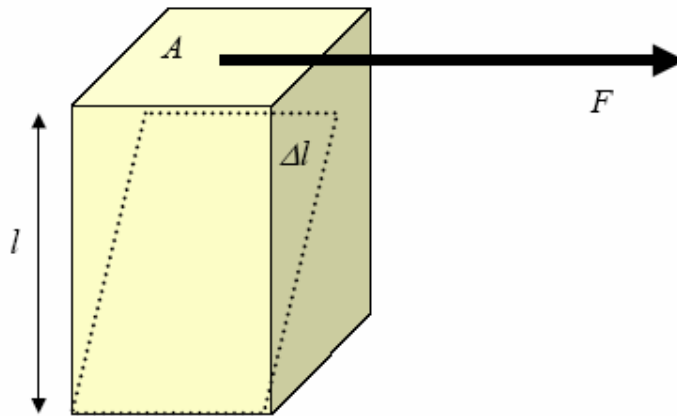
Shear Stress: force applied parallel to surface

$$\tau = F/A$$

measured in N/m² 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: $\nu \approx 0.3$

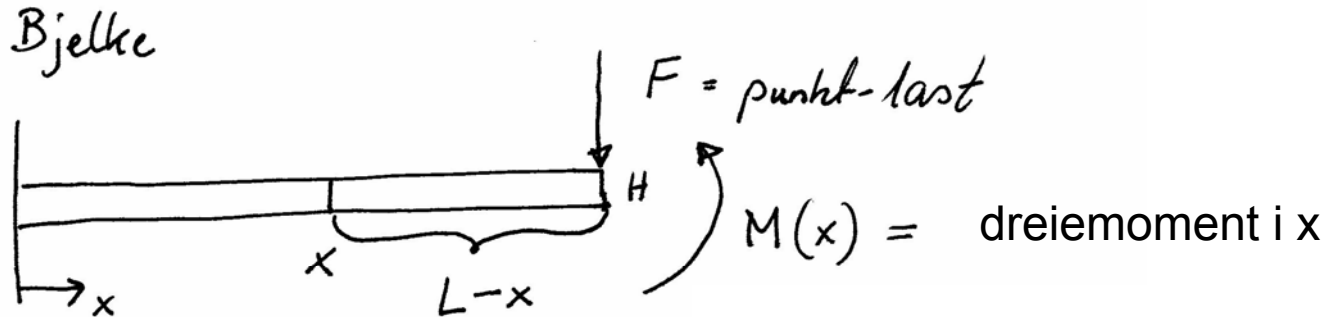
Rubbers: $\nu \approx 0.5$

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



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

$W = \text{bredde}$

Bjelkeligning

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

$I = \text{treghetsmomentet}$
"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

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

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

$$w(0) = 0$$

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 $x = L$

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

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

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

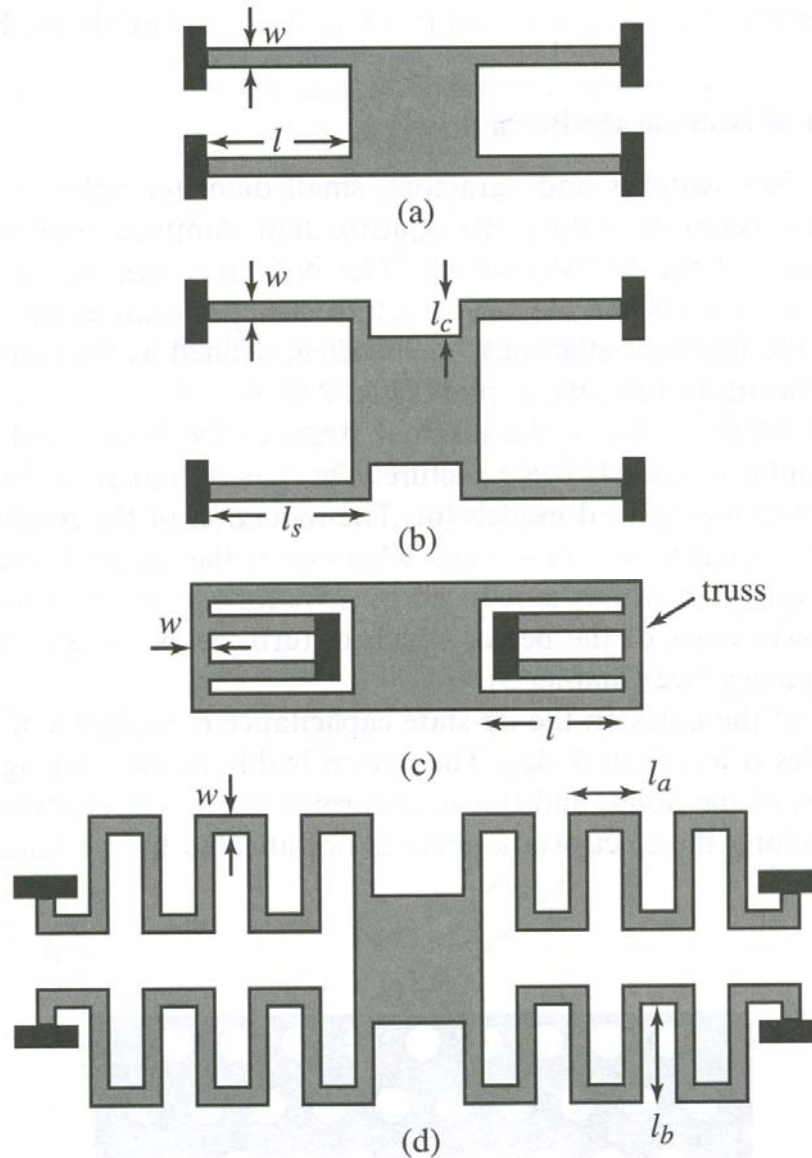
For en **dobbeltinnspent** bjelke gjelder (Varadan p. 132)

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

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**

Ulike foldede oppheng

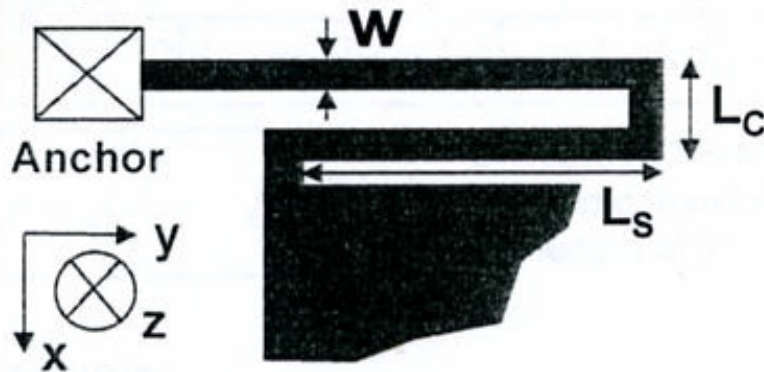




Electromechanical design of RF MEMS switch (3)

• 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
- ν : 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 ν

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

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

Materialvalg i oppheng?

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

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

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

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_{PI} (area = $100 \times 100 / 20 \times 20 \mu\text{m}^2$, 2 μm -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 (+)
 - PolySi er stivere
 - Høyere aktiveringsspenning (÷)
 - Den elastiske kraften for å drive strukturen tilbake er større (+)