

# INF5490 RF MEMS

L2: MEMS – Fremstilling og  
virkemåte

# Dagens forelesning

- Mikromaskinering
  - "Bulk" mikromaskinering
  - "Surface" mikromaskinering
- Sentrale prosesstrinn
  - **Definere** mønstre: **Fotolitografi**
  - **Endre** materiale: **Diffusjon**
  - **Fjerne** materiale: **Etsing**
  - **Legge til** materiale: **Deponering**
- Eksempler på prosesser
- Transduksjon i MEMS og RF MEMS
  - Transduser- og sensor-prinsipper

# MEMS for RF?

- Sentrale egenskaper ved MEMS som gjør teknologien **attraktiv for RF**
  - Små dimensjoner
  - Batch prosessering
  - Kan lage mange og billige
  - Gode egenskaper
  - Reduserte parasitter
  - Fleksibilitet
  - Muligheter for integrerte systemer
- Sentralt er: **MIKROMASKINERING!**

# Mikromaskinering

- Mikromaskinering:
  - presis **definere** og **realisere** vilkårlige mikroskopiske mekaniske strukturer **i** (ut av) eller **på** et grunnmateriale
    - Små dimensjoner ( $\sim \mu\text{m}$ )
    - Parallell fremstilling (batch prosessering)
- Si mikromaskinering er mest utviklet
  - Metoder fra IC-industrien er overtatt
  - Nye metoder er også spesielt utviklet for MEMS
    - Mange variasjoner, - lite standardisering

# Materialer og verktøy for å bygge (RF) MEMS

- Et passende substrat
  - Si, SOI, glass (PSG), kvarts
- Fotolitografi for å definere mønstre
- Endre materialegenskaper ved diffusjoner
- Etse-teknikker
- Deponere tynne eller tykke lag ("filmer")
  - Ledere: Al, Cu
  - Halvledere: Si, polySi
  - Isolatorer: SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>
  - Polymerer (organisk)
- Bonde-teknikker

# 2 hovedtyper

- **”Bulk”** mikromaskinering
  - Diffusjoner og selektiv etsing av mønstre i det underliggende substrat
- **”Surface”** mikromaskinering
  - Legge til lag
    - Strukturelle lag
    - Offer-lag (sacrificial layers) = ”avstands-lag”
  - Selektiv etsing av strukturelle lag
  - Fjerning av offer-lag

# Bulk mikromaskinering

- Mest moden teknologi
- Kraftig etsing av substratet → membraner
  - Ofte fra baksiden (våt-etsing, væske)
  - Tørr-etsing fra forsiden
- Typiske eksempler
  - Trykk-sensor, Si-ventiler, aksellerometer
- Wafer-bonding teknikker er nødvendig i tillegg
  - Sette sammen hele skiver (wafere)

# Overflate mikromaskinering

- + Kan lage strukturer med mindre dimensjoner enn bulk mikromaskinering
- + Muliggjør integrasjon med IC-komponenter
- ÷ Små "masser" kan være tilstrekkelig for enkelte anvendelser (aksellerometere)
- Strukturelle lag må ha
  - Ønskede fysiske og kjemiske egenskaper
  - Egnede **mekaniske** egenskaper
    - Stress: problemet er ofte ulikt stress i nabo-filmer
    - Holdbarhet
- Offer-lag ("sacrificial layer")
  - Må kunne fjernes effektivt
    - Unngå "stiction"



# Sentrale prosess-trinn

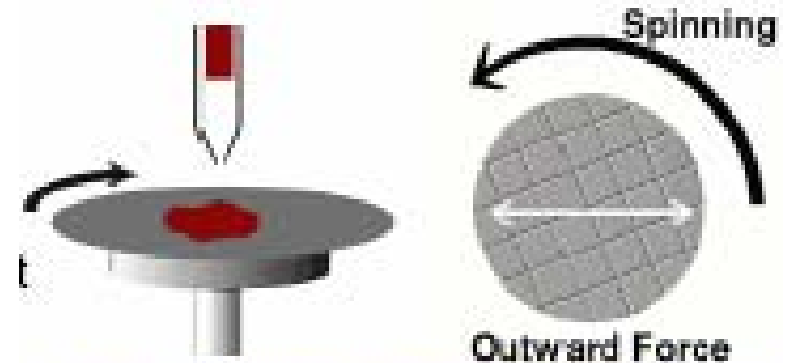
- Definere mønstre
  - *Fotolitografi*
- Endre materialelegenskaper
  - *Diffusjon*
- Fjerning av materiale
  - *Etsing*
- Bygging av strukturer
  - *Deponering*

# Fotolitografi

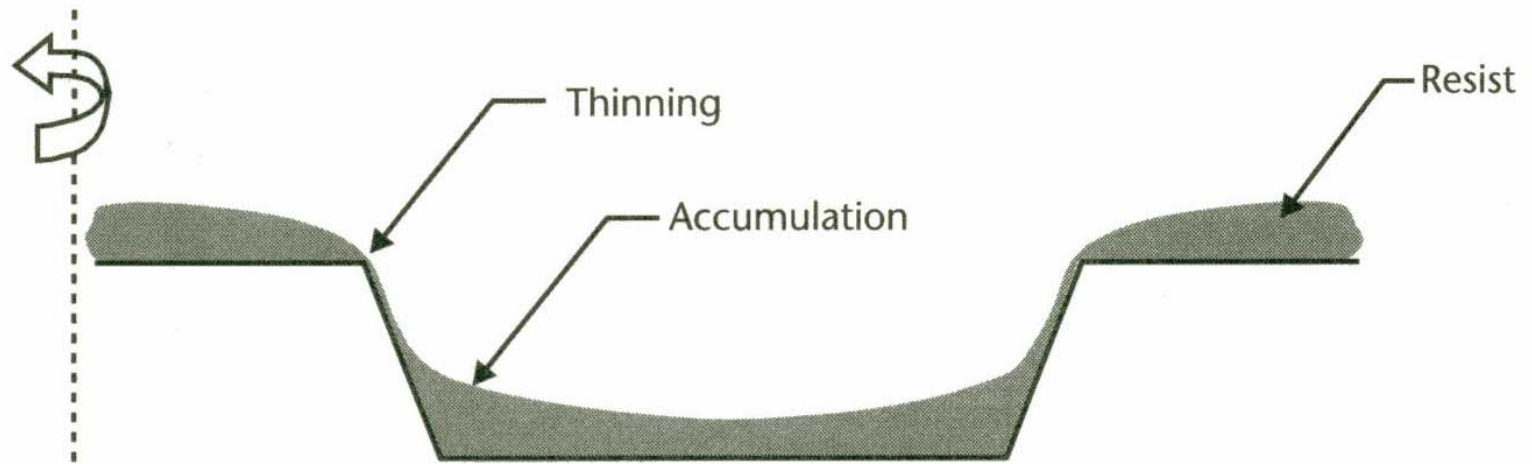
- Overføre design-mønstre -> mønstre i materialet
- Fotoresist benyttes
- Optisk eksponering -> fremkalling -> "post bake"
- Maske-typer
  - Krom maske
  - Emulsjonsmaske
  - Direkte skriving av mønster fra CAD
- Eksponerings-metoder
  - Kontakt: forkorter maskens levetid
  - "Proximity": 25 – 50  $\mu\text{m}$  avstand
  - Projeksjon vha kompleks optikk
  - Elektron-stråle (e-beam)

# Spin-on metoder

- Material-dråpe i sentrum "spinnes" på
  - For dielektriske isolatorer
  - For organiske materialer
    - Fotoresist, polyimider, 0.5 – 20  $\mu\text{m}$
    - SU-8 (epoksy-basert), > 200  $\mu\text{m}$
  - Tykkelse avhenger av
    - Konsentrasjon, viskositet, hastighet, tid



# Topografiske høydevariasjoner gir problemer

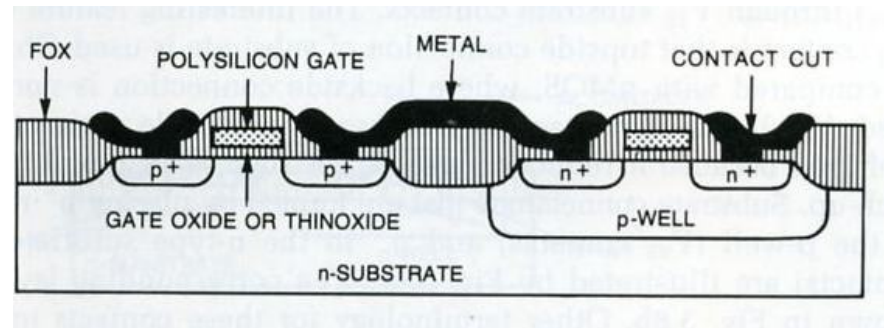


**Figure 3.3** Undesirable effects of spin-coating resist on a surface with severe topographical height variations. The resist is thin on corners and accumulates in the cavity.

Maluf

# Diffusjoner

- Diffusjon av forurensninger
  - dopematerialer
    - fosfor (n+), bor (p+)
  - ”predeposition”, ”drive-in”
    - ”ion implantation”



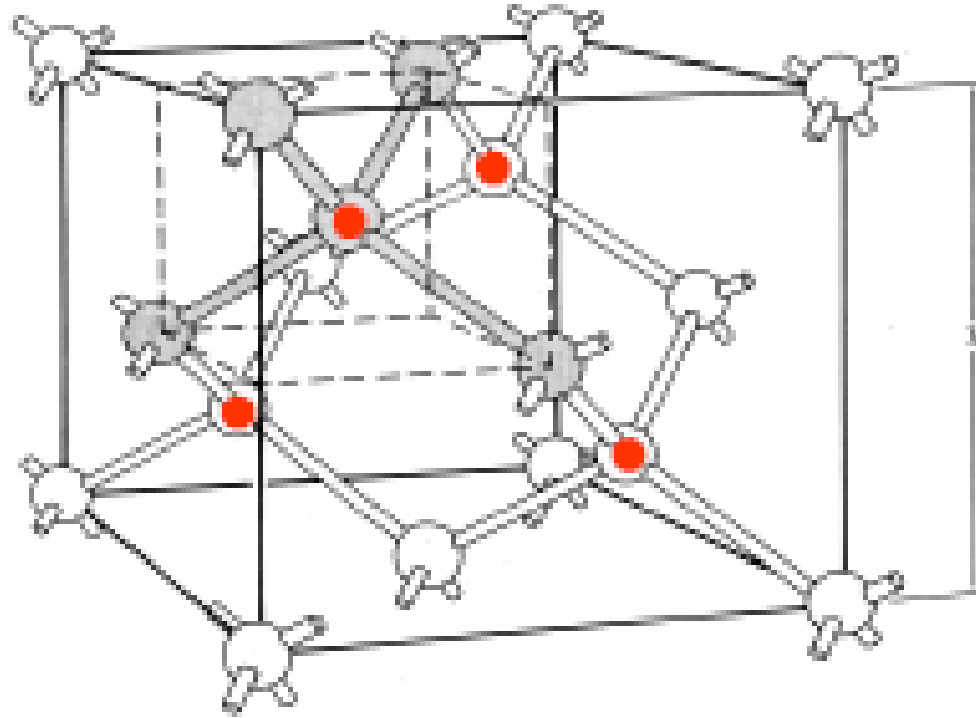
- Type og konsentrasjon av dopemateriale bestemmer elektriske egenskaper
  - **diffusjons-strøm** pga. forskjell i konsentrasjon (n, p)
  - **drift av ladninger** pga. elektrisk felt

# Etsing

- Våt-etsing eller tørr-etsing
- **Våt-etsing**
  - Foregår i væsker
  - Lav-kostnads batch-prosessering
  - Kan være **isotrop** eller **anisotrop**
    - **Isotrop** = uniform etsing i alle retninger
    - HF eller blandinger er vanlig
    - 0.1 – 100  $\mu\text{m}/\text{min}$  etsehastighet
    - **Anisotrop** = etser hurtigere i noen retninger

# Anisotrop våt-etsing

- Etsehastighet avhengig av **krystallorientering**
  - NaOH, KOH benyttes
  - Silisium nitrid som maske ved KOH
- Krystallorientering, figur →



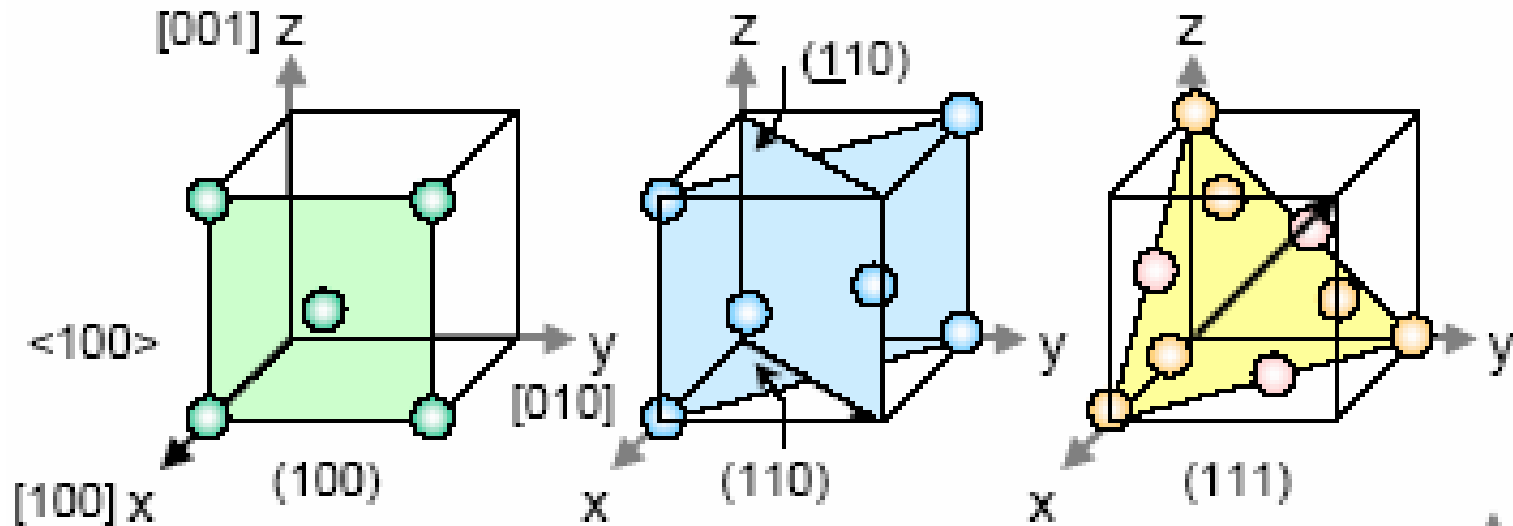
Silicon crystal structure

$$\lambda = 5.43 \text{ \AA}$$

*Wolf and Tauber*



# Krystallretninger

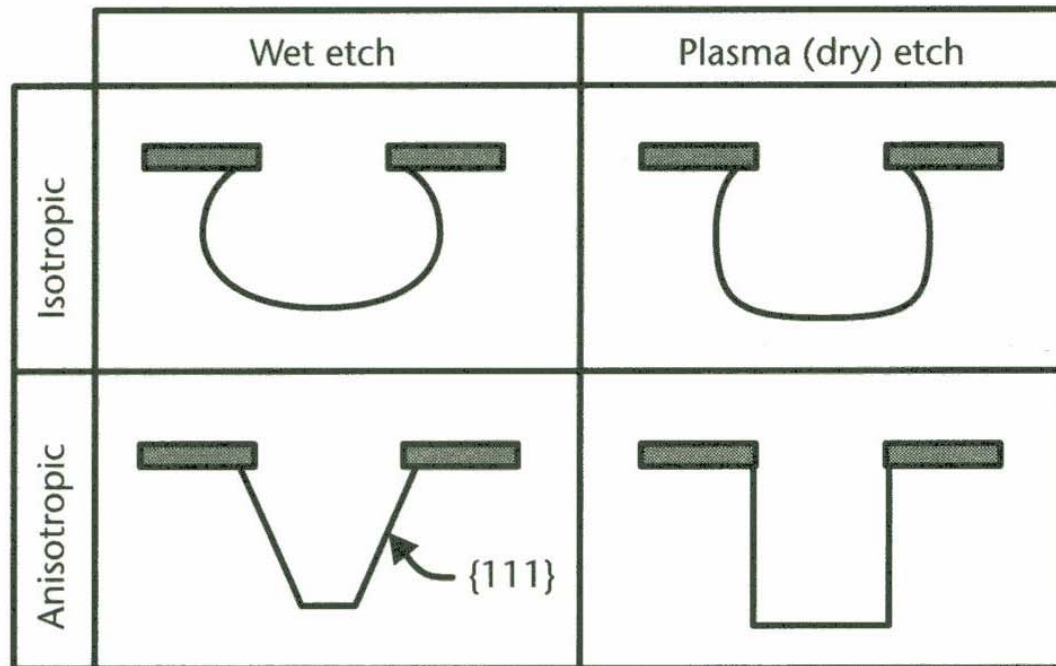


Miller indekser: (plan), {familie av plan}, [retning],  $\langle$ familie av retninger $\rangle$

# Anisotrop våt-etsing, forts.

- KOH-etsing
  - {110} planene etses 2x så hurtig som {100}
  - {111} planene etses 100 x langsommere enn {100}
    - Uenighet om årsak: tettheten av krystallbåndene eller dannelse av tynt oksydlag?
- Kan brukes til å lage V-groper
- **Dyp etsing** av Si er sentralt i mikromaskinering
- Andre anisotrope etsevæsker
  - TMAH, ratio (100)/(111) = 10 – 35
  - Også SiO<sub>2</sub> kan da brukes til maske

# Ulike etse-metoder

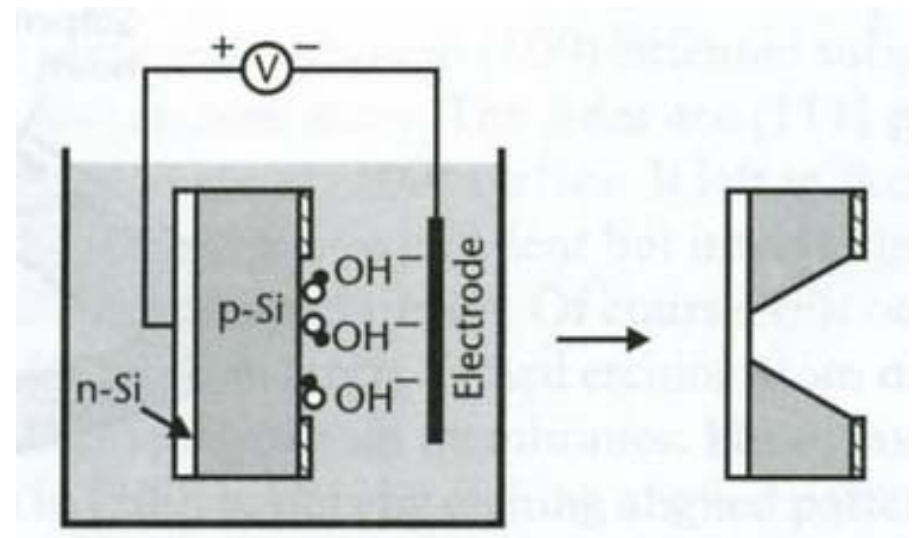


**Figure 3.5** Schematic illustration of cross-sectional trench profiles resulting from four different types of etch methods.

Maluf

# Elektrokjemisk etsing

- Etsedybde kan kontrolleres ved elektrokjemisk etsing
  - Presis groing av epi-lag
    - Eks. n-type på p-skive
  - Elektrisk potensial settes på
    - pn-diode revers forspent
  - p-materialet etses
  - Etsingen stopper i pn-overgangen
  - Brukes f.eks. for å definere membran-tykkelse



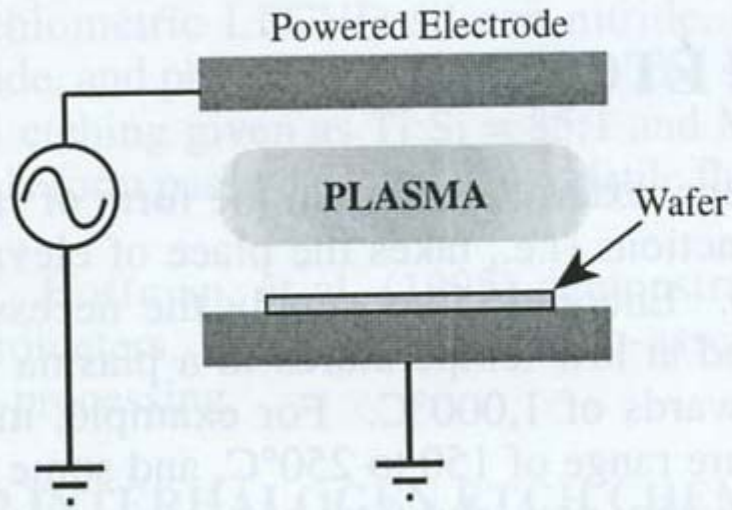
# Tørr-etsing

- **1. Damp-fase etsing**
  - Benytter reaktive gasser
  - Etsingen kan være isotrop eller vertikal
- **2. Plasma-etsing**
  - *Plasma: ”elektrisk nøytral, kraftig ionisert gass av ioner, elektroner og nøytrale partikler”*
  - Etser Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, polysilisium, metaller
  - Kjemisk reaktive partikler og ioner aksellereres i et elektrisk felt mot Si substratet (”target”)
  - Den **kjemiske reaksjonen** ved overflaten er sentral ved **plasma-etsing**
  - RF -energi er drivkraft for å danne reaktive partikler
  - **Krever ikke høye temperaturer!**

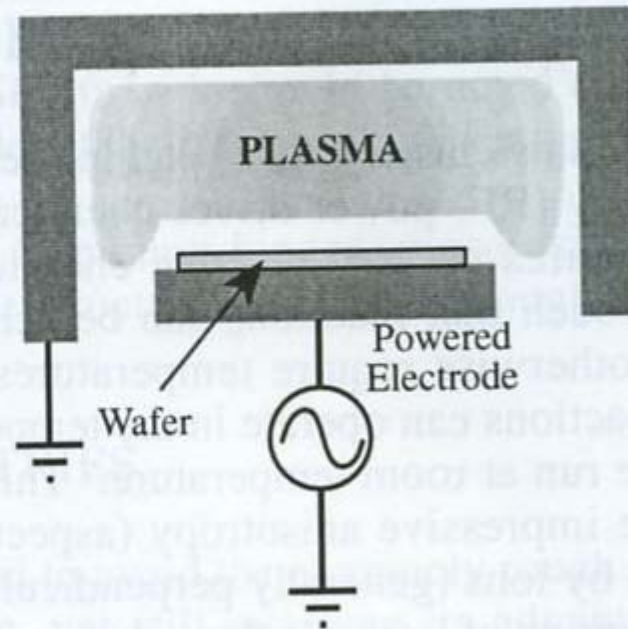
# Tørr-etsing, forts.

- **3. RIE – Reaktiv Ione Etsing**
  - **Bombardement av Si-overflaten** med høyenergi-ioner er sentralt ved **RIE**
  - Lavt trykk
  - Høyere anisotropi kan oppnås
    - Vertikal stråle : vertikal anisotropi
  - Høyere etsehastigheter

## PLASMA ETCHER



## REACTIVE ION ETCHER



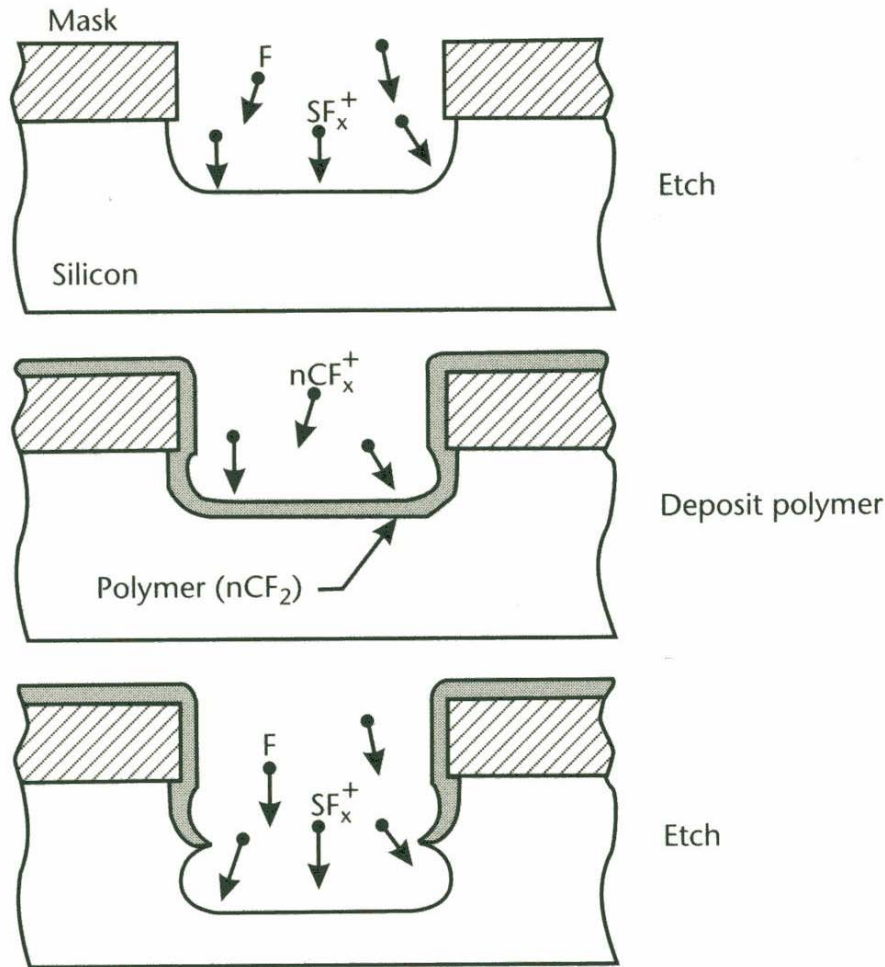
Kovacs

# DRIE

- **DRIE** – Deep Reactive Ion Etching (1995-)
  - Vertikal etsing
  - Kan etse dype hull ( $> 500 \mu\text{m}$ ) med tilnærmet vertikale sidevegger
  - Bosch-metoden
    - Figur  $\rightarrow$
    - Høy "aspect-ratio"
    - Etsing og deponeringstrinnene foregår vekselvis
      - ets:  $\text{SF}_6$ , mest i bunnen!
      - deposit: polymer

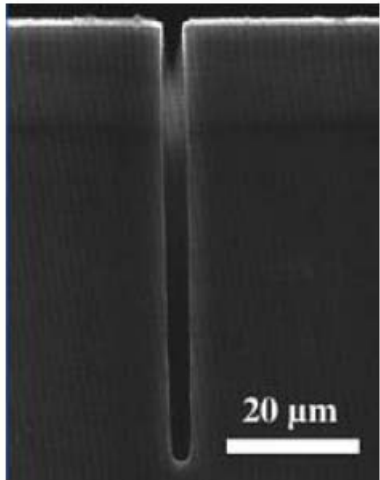


# Bosch-process

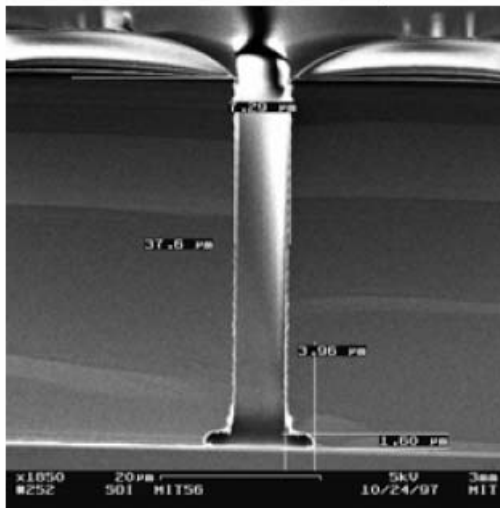
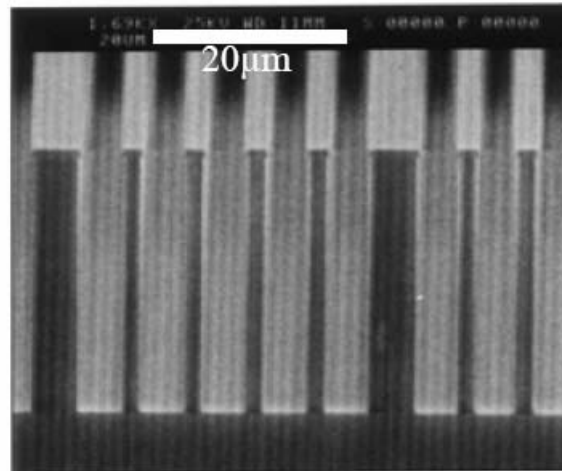


**Figure 3.12** Profile of a DRIE trench using the Bosch process. The process cycles between an etch step using  $\text{SF}_6$  gas and a polymer deposition step using  $\text{C}_4\text{F}_8$ . The polymer protects the sidewalls from etching by the reactive fluorine radicals. The scalloping effect of the etch is exaggerated.

# Deep RIE Examples

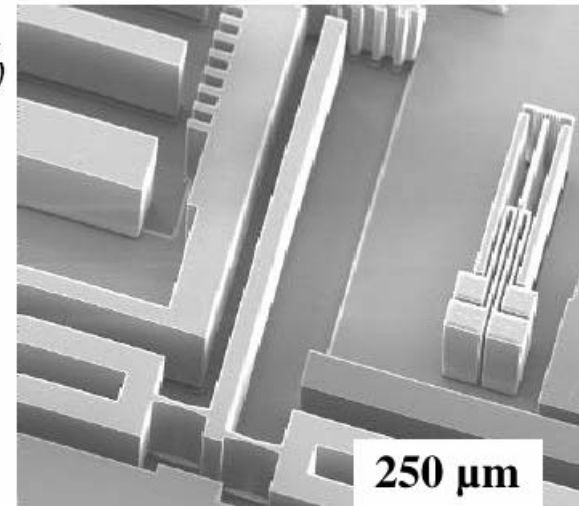


STS 1999



Ayon et al.,  
1998 (MIT)

Klaassen et al.,  
1995 (Stanford)



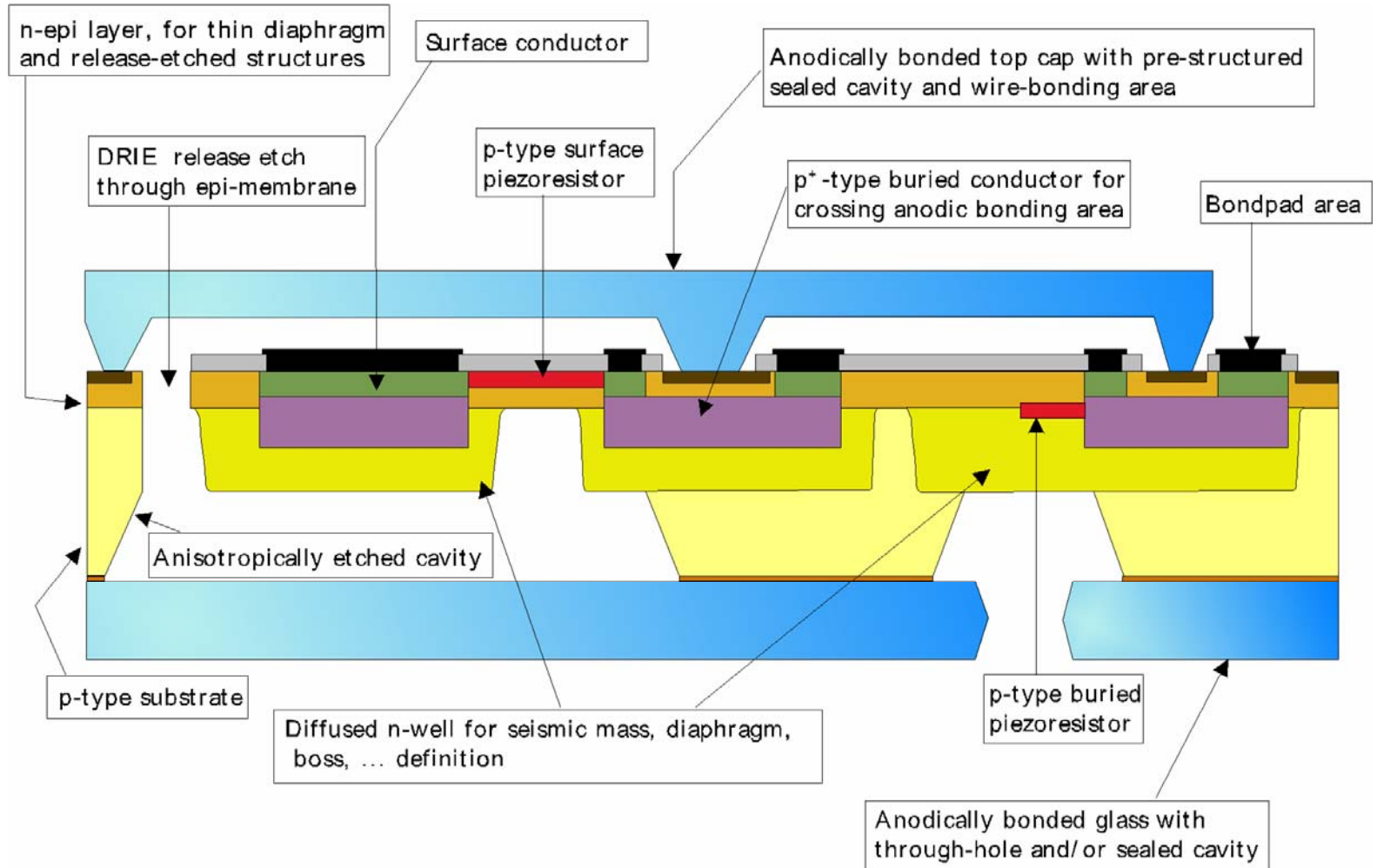
# Ion milling ("fresing")

- Edelgass (Ar) aksellereres mot substratet
  - ~ 1kV
- Ingen kjemisk reaksjon
  - **Alle materialer kan bruke metoden**
- Vertikal etseprofil
- Lavere etsehastighet enn RIE

# Eksempel på prosess

- Bulk mikromaskinering
- **MultiMEMS fra SensoNOR →**

# Cross section overview



# Additive prosesstrinn

- Dannelse av filmer på overflaten av substrat
  - **Structural layers**
  - **Sacrificial layers ("spacers")**
- Teknikker
  - Epitaksiell groing
  - Oksidering av Si
  - Fordamping
  - Chemical Vapor Deposition, CVD
  - Sputtering
  - Støping

# Epitaksiell groing

- Epitaksiell groing

- Groing av krystallinsk Si på en Si-skive

- Samme krystall-orientering
- Dope-materialer benyttes: arsenikk, fosfor, bor
- Damp-fase kjemisk deponering > 800 °C
- Tynt, 1-20 μm

- I utstrakt bruk i IC-industrien

- Groing på SiO<sub>2</sub> gir **polykrystallinsk** materiale

- Kan brukes til å gro SOS (Si på safir)

# Oksidering av Si

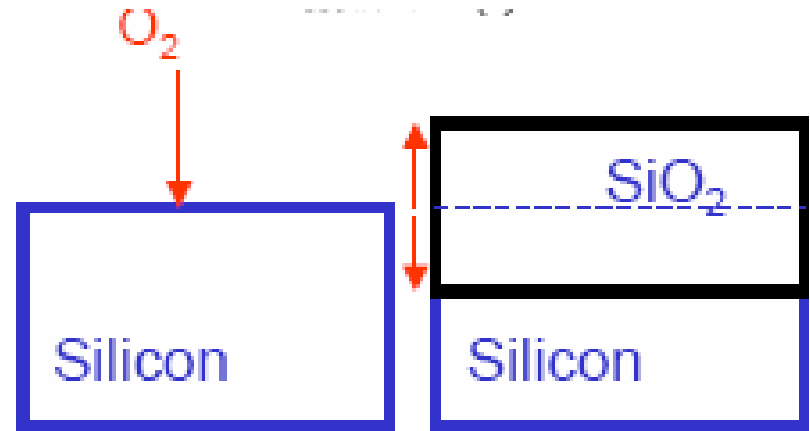
- Termisk oksidering

- **Høykvalitets** termisk grodd oksyd (amorft)

- Tørr  $O_2$  eller i damp ved høye temp, 850-1150 °C

- Termisk oksidering genererer kompressivt stress  $\rightarrow$  bøyning!

- Volum av  $SiO_2$  er større enn for Si
    - Ulik termisk utvidelses-koeffisient





# Fordamping

- Oppvarming av kilde til høy temp
  - → damp → kondensering → film avsettes
  - ~Vakuum
- Fordampingen skjer ved termisk oppvarming eller e-beam bombardement
- Er en retningsbestemt deponeringsprosess ved:
  - liten kilde, materialet deponeres i vinkel, dårlig "step coverage"
- Filmer får oftest **tensilt** stress (strekkes)

# CVD

- **Chemical Vapor Deposition**
  - Kjemisk reaksjon settes i gang ved oppvarmet overflate
  - Høytemperatur-prosess,  $>300\text{ }^{\circ}\text{C}$
  - Gir **høykvalitets** tynne dielektrikum og metall-filmer
    - PolySi, SiO<sub>2</sub>, SiNitrid (0.2 nm – 2 μm) for PECVD
    - Dopemateriale kan introduseres
  - Kategorier
    - **LPCVD**, Low-pressure, 400-800 °C
    - **PECVD**, Plasma-enhanced, ~ 300 °C eller lavere
      - Plasma-eksitering ved en valgt RF-frekvens
      - Større kontroll av stress

# CVD, forts.

- Deponering av **polysilisium** ved LPCVD
  - Poly er et attraktivt materiale ved mikromaskinering
  - Krystallinsk kornstruktur oppnås når  $> 630$  °C
  - Temperatur bestemmer **tensilt** eller **kompressivt** stress
  - "Annealing" ved  $900$  °C reduserer stress

# CVD, forts.

- Deponering av **SiO<sub>2</sub>** ved LPCVD eller PECVD
  - < 500 °C, **LTO = low-temp oxide**
  - Amorft
  - Brukes som isolasjon eller som offer-lag
    - Etses med HF
  - **Kvaliteten er ikke så god som for oksyd fremstilt ved termisk groing!**
- Deponering av **Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>**
  - Brukes til passivering
  - Som maske ved visse etsinger (KOH)

# Residual Stress in Thin Films

- Residual film stress
  - Microstructure
  - Thermal mismatch



- Compressive vs. tensile stress



Under **compressive stress**, film wants to expand. Constrained to substrate, bends it in convex way.

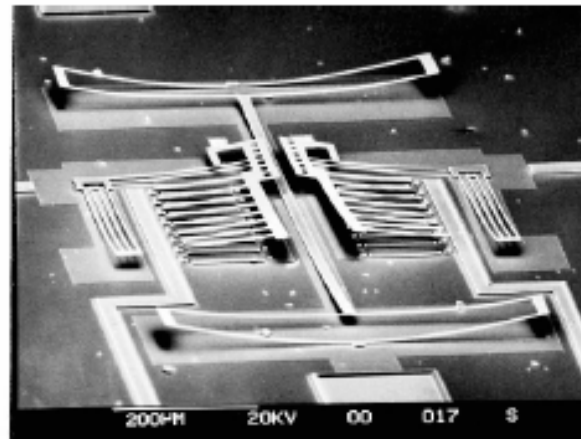
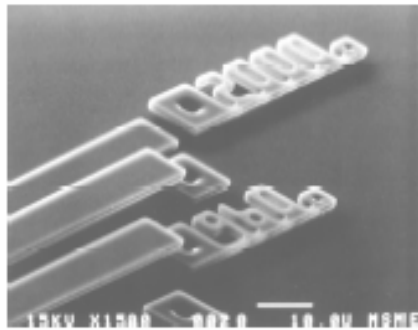
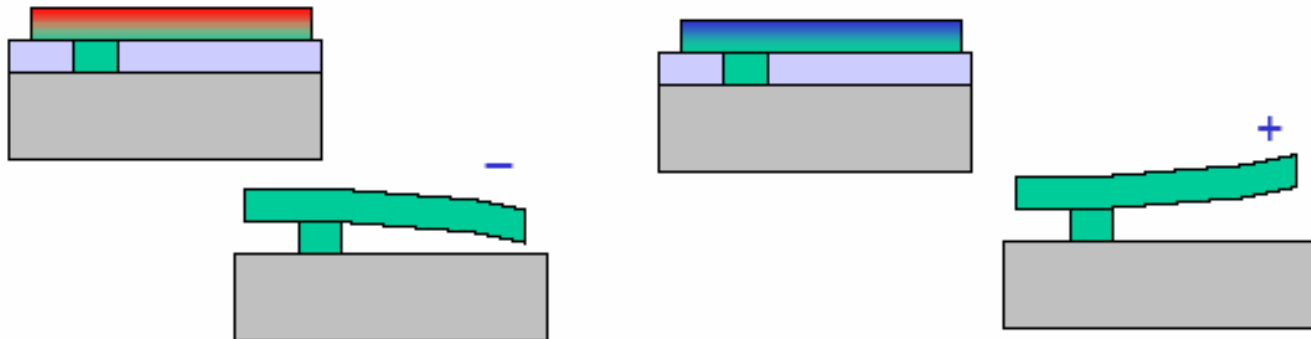


Under **tensile stress**, film wants to shrink. Constrained to substrate, bends it in concave way.

# Stress Gradients

- Stress gradient: (+) or (-)

compressive  
tensile



25

# Sputter deponering

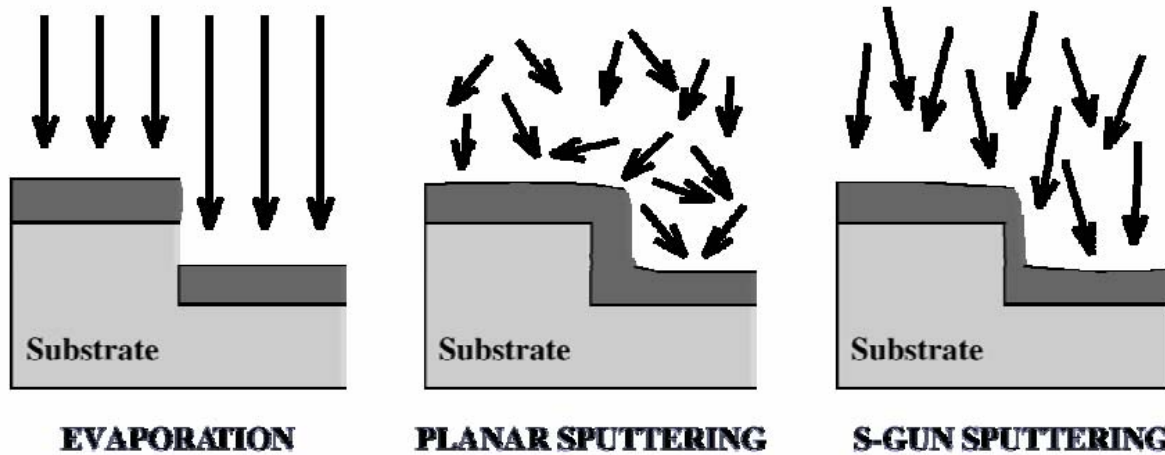
- Target materiale bombarderes med en strøm av edelgass-ioner ( $\text{Ar}^+$ )
  - ~ vakuum
  - Atomer rives løs og setter seg på skiven
- Ulike klasser sputtering finnes
  - Ionene aksellereres i DC felt mellom "target" og "wafer"
  - RF-eksitasjon av "target"
  - Ionestråle genereres i plasma og aksellereres mot "target"
- Både ledende og isolerende materialer kan sputres, dvs. et **vidt materialspekter**
  - Tynne metallfilmer, glass, piezoelektriske filmer (PZT)
- Bedre stress-kontroll

# Sputtering

- **Lave temperaturer**,  $<150\text{ }^{\circ}\text{C}$ 
  - Mange anvendelser i MEMS
- Reaktiv sputring
  - Nitrogen eller oksygen-gass legges til, reagerer!
- Retnings "randomness" når target er større enn skive
  - Gir god "step coverage"
- Stress-verdi varierer med påtrykt **effekt** og **trykk** i kammeret
  - Tensilt stress: lav effekt, høyt trykk
  - Kompressivt stress: høy effekt, lavt trykk



# Sputtering vs. Evaporation



Geometry of evaporation and sputtering chambers (as well as electromagnetic fields) determine *directionality* of deposition:

Good or bad step coverage (can be advantage or disadvantage)

*Figure: G. Kovacs, 1996.*

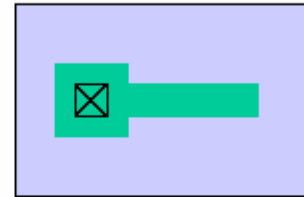
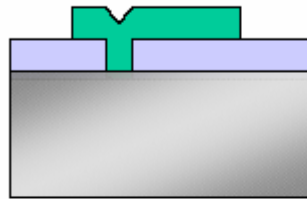
# ”Adhesion layer”

- Bruk av eget lag for å bedre vedheft
- Mange metaller fester ikke godt til Si, SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>
  - Gull, sølv, platina
  - Løsner (”peeling off”)
- Et eget tynt lag introduseres for å øke vedheft
  - Cr, Ti
  - Må unngå at disse lagene oksyderes, - noe som ødelegger vedheften

# Eksempler på prosesser

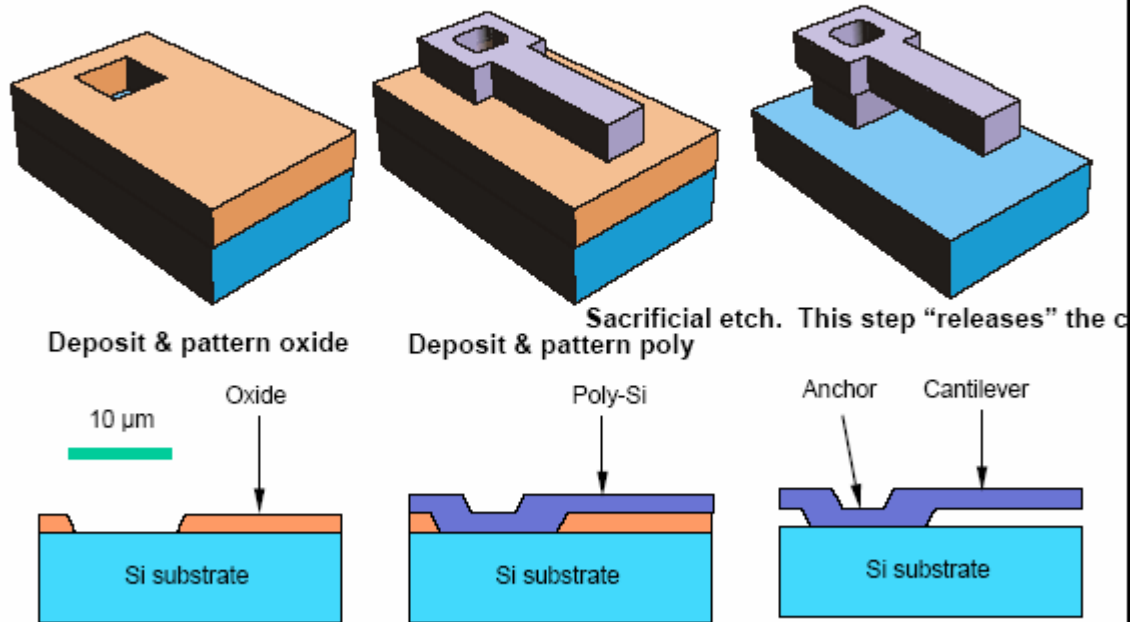
- Surface mikromaskinering
  - Enkel, prinsipiell prosess
  - **polyMUMPs fra MEMSCAP →**

## Surface Micromachining



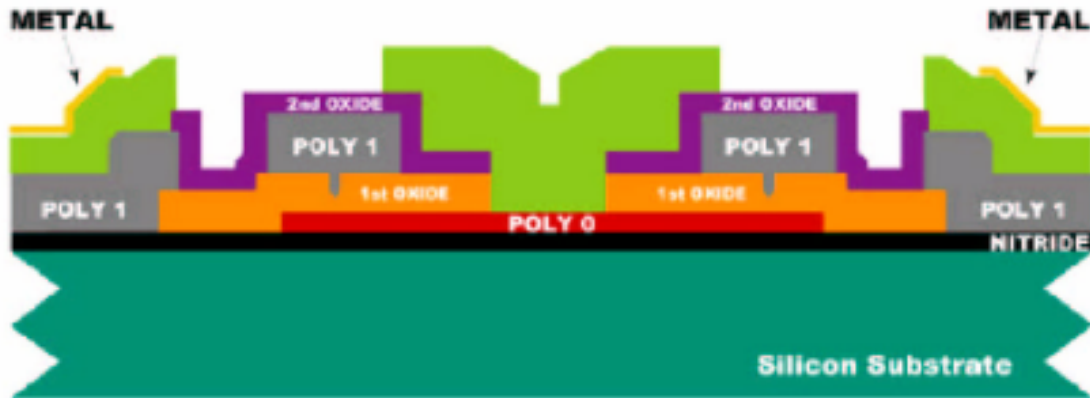
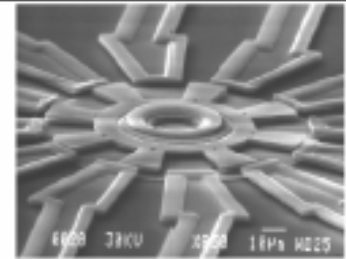
7

## Micromachining a Cantilever



8

# MUMPS Micromotor

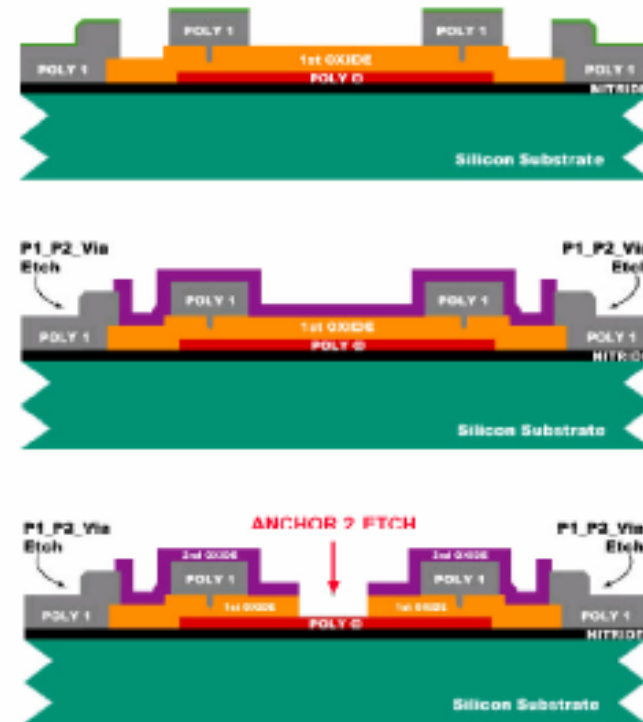
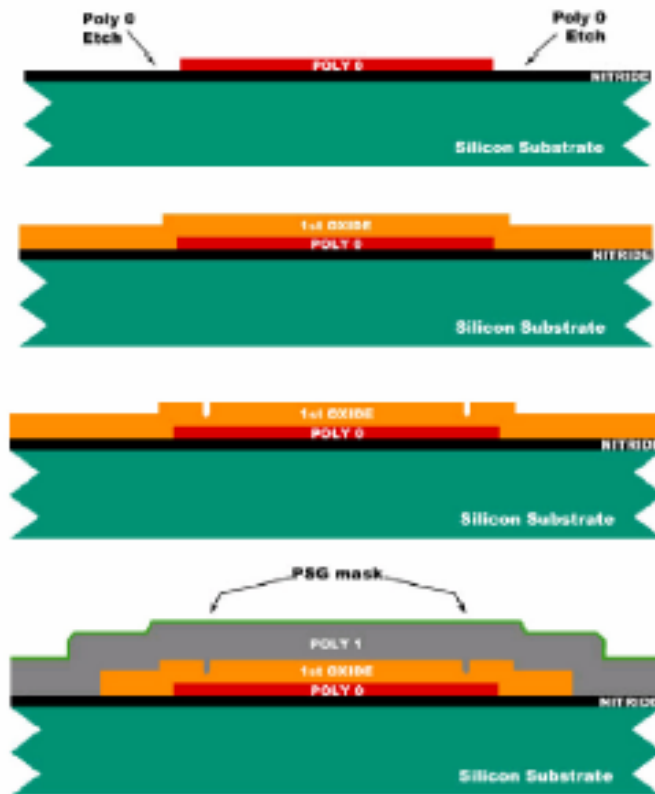


EE C245

U. Srinivasan

6

# MUMPS Process Flow I

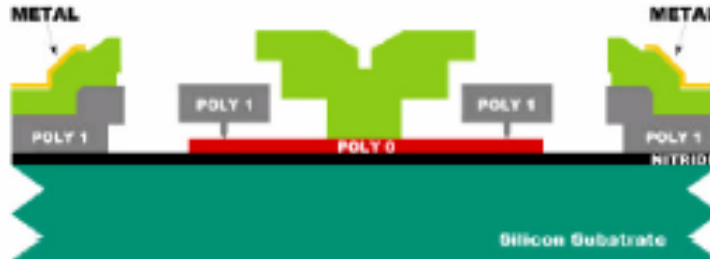
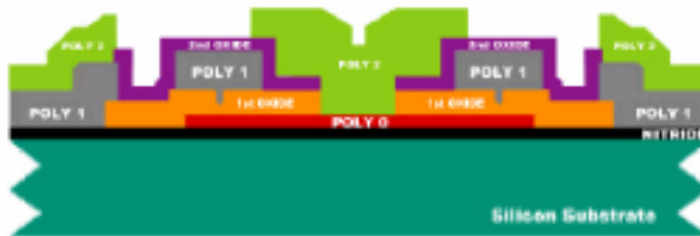
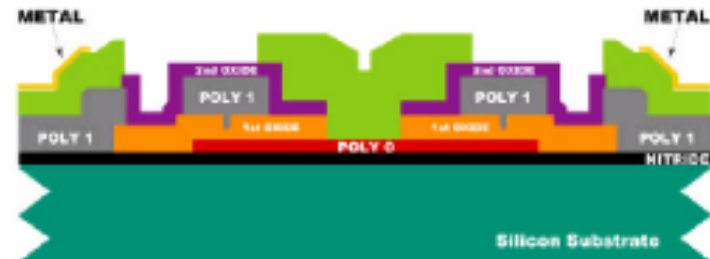


EE C245

U. Srinivasan ©

7

# MUMPS Process Flow II





# Avanserte prosesserings-trinn

- **Anodisk bonding**

- Si-skiver bondes sammen, glass – Si
  - Brukes for eksempel ved trykksensorer (jmf. MultiMEMS)
- 200 – 500 °C, 500 – 1500 V
- Glass får negative ioner i kontakt-skiktet mot Si

- **Elektroplettering ("electroplating")**

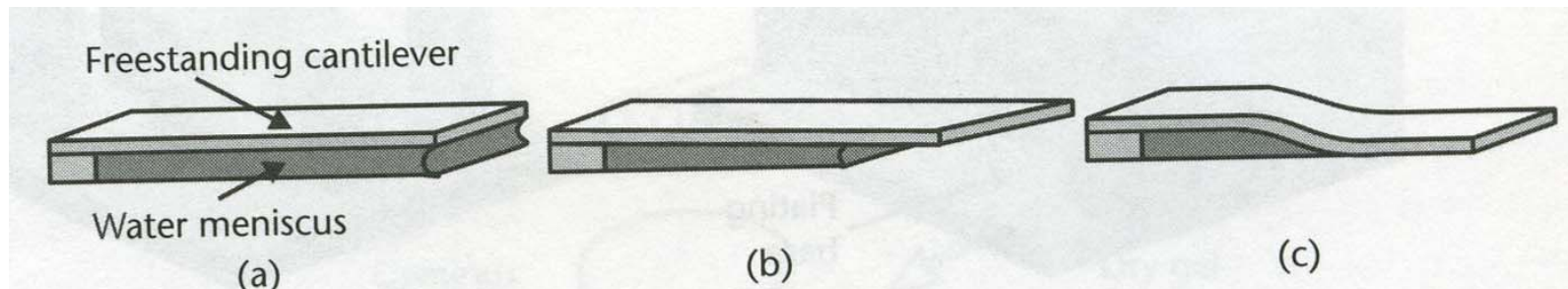
- Tynn pletteringsbase deponeres på Si-substrat ("seed layer")
- Plettering med gull, kobber, nikkel etc.
- Kan gi tykke lag, 5 – 100 µm
- Kan brukes for å lage form ved støping ("molding")
  - Mold = støpeform
- Strukturer kan formes etter underliggende substrat eller fotoresist

# Mikromaskinering ved LIGA

- **LIGA** = en støpeform-metode
  - **Lithographie, Galvanoformung, Abformung**
    - Røntgen-stråle maske-eksponering (X-ray)
    - Galvanisering → metall støpeform
    - Støping ("molding") → komponenter
      - **Plastikk**, metall, keramikk
- + Gir høy aspect ratio, 3D komponenter!
- + Fleksibel metode
- ÷ X-ray må benyttes, høy produksjonskostnad
- ÷ kun vertikal 3.dje dimensjon

# Superkritisk tørring

- Fjerning av offerlag er problematisk
  - HF etser -> skylling i vann
  - Vannet sitter igjen under strukturene (pga. overflate-spenning)
    - Tynn skive (menisk) dannes
  - Væske-volum avtar ved tørking
  - Strukturer dras ned → ”**stiction**” → struktur må fristilles
- ”**Supercritical Point Drying**”: hindrer dannelsen av menisker
  - Fuktig skive føres inn i metanol-kammer
  - Flytende CO<sub>2</sub> føres inn → blandingen tappes → CO<sub>2</sub>-rest varmes opp til superkritisk region (overgang: gass - væske) → gass luftes ut



# Oppsummering av MEMS metoder

- Metoder **spesielt** utviklet for MEMS
  - Anisotrop kjemisk våt-etsing
  - Dyp reaktiv ione-etsing, RIE
  - Offer-lag-etsing ("sacrificial layer")
  - "Critical-point drying"
  - "Wafer bonding"

# Strukturlag - offerlag

- Strukturelt lag – offerlag (eks. Varadan)
  - polySi                      SiO<sub>2</sub>
  - Polyimide                    aluminium
  - Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>                        polySi
  - Wolfram                      SiO<sub>2</sub>

# Strukturlag – offerlag, forts.

## Structure

polySi

Al

SiO<sub>2</sub>

Al

poly-SiGe

## Sacrificial

SiO<sub>2</sub>, PSG, LTO

photoresist

polySi

Si

poly-Ge

## Etchant

HF, BHF

O<sub>2</sub> plasma

XeF<sub>2</sub>

EDP, TMAH, XeF<sub>2</sub>

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, hot H<sub>2</sub>O

Srinivasan

# Transduksjon i (RF) MEMS

- **Elektromekaniske** transdusere
  - Transformasjon av elektrisk energi  $\leftrightarrow$  mekanisk energi
- Systemer kan beskrives ved **elektriske ekvivalenter**
  - Eks. fjær/masse  $\rightarrow$  elektriske ekvivalenter: R, C, L
  - + Gir design-innsikt/forståelse
  - + Tillater bruk av analyse-verktøy for elektronikk
  - Forskjellige transformasjoner/analogier eksisterer
    - Forelesning L3
- Transduser- og sensor-prinsipper  $\rightarrow$

# Transduser-prinsipper

- **Elektrostatiske** aktuatorer
  - Krefter mellom elektriske ladninger (Coulombs lov)
  - Den vanligste typen brukt ved elektro-mekanisk energi-konvertering
  - Energi som lagres når mekanisk eller elektrisk arbeid utføres på enheten kan konverteres til en annen energi-form
  - Ofte realisert ved en **kondensator** med bevegelige plater
    - **Vertikal** bevegelse: parallell plate
    - **Horisontal** bevegelse: Kamstrukturer
  - Enkel fabrikering



# Transduser-prinsipper, forts.

- **Piezoelektriske** transdusere
  - Enkelte anisotrope krystallinske materialer forskyver ladning når de utsettes for stress → elektrisk felt
  - Tilsvarende oppstår strain (tøyning) når de utsettes for et elektrisk felt
  - Eks. PZT (lead zirconate titanates) – keramisk materiale
- *(Electrostrictive transdusere*
  - *Mekanisk deformasjon ved elektrisk felt*
- *Magnetostrictive transdusere*
  - *Deformasjon ved magnetfelt)*

# Transduser-prinsipper, forts.

- **Elektromagnetiske** transdusere
  - Magnetisk spole trekker på elementet
- **Elektrotermiske** aktuatorer
  - Ulik termisk ekspansjon på ulike steder pga. temperaturforskjeller
    - Store utbøyninger kan oppnås
    - Langsomme

# Sammenligning av ulike prinsipper

**Table 1.4** Comparison of electromechanical transducers

Actuator	Fractional stroke (%)	Maximum energy density ( $\text{J cm}^{-3}$ )	Efficiency	Speed
Electrostatic	32	0.004	High	Fast
Electromagnetic	50	0.025	Low	Fast
Piezoelectric	0.2	0.035	High	Fast
Magnetostrictive	0.2	0.07	Low	Fast
Electrostrictive	4	0.032	High	Fast
Thermal	50	25.5	Low	Slow

Source: Wood, Burdess and Hariss, 1996.

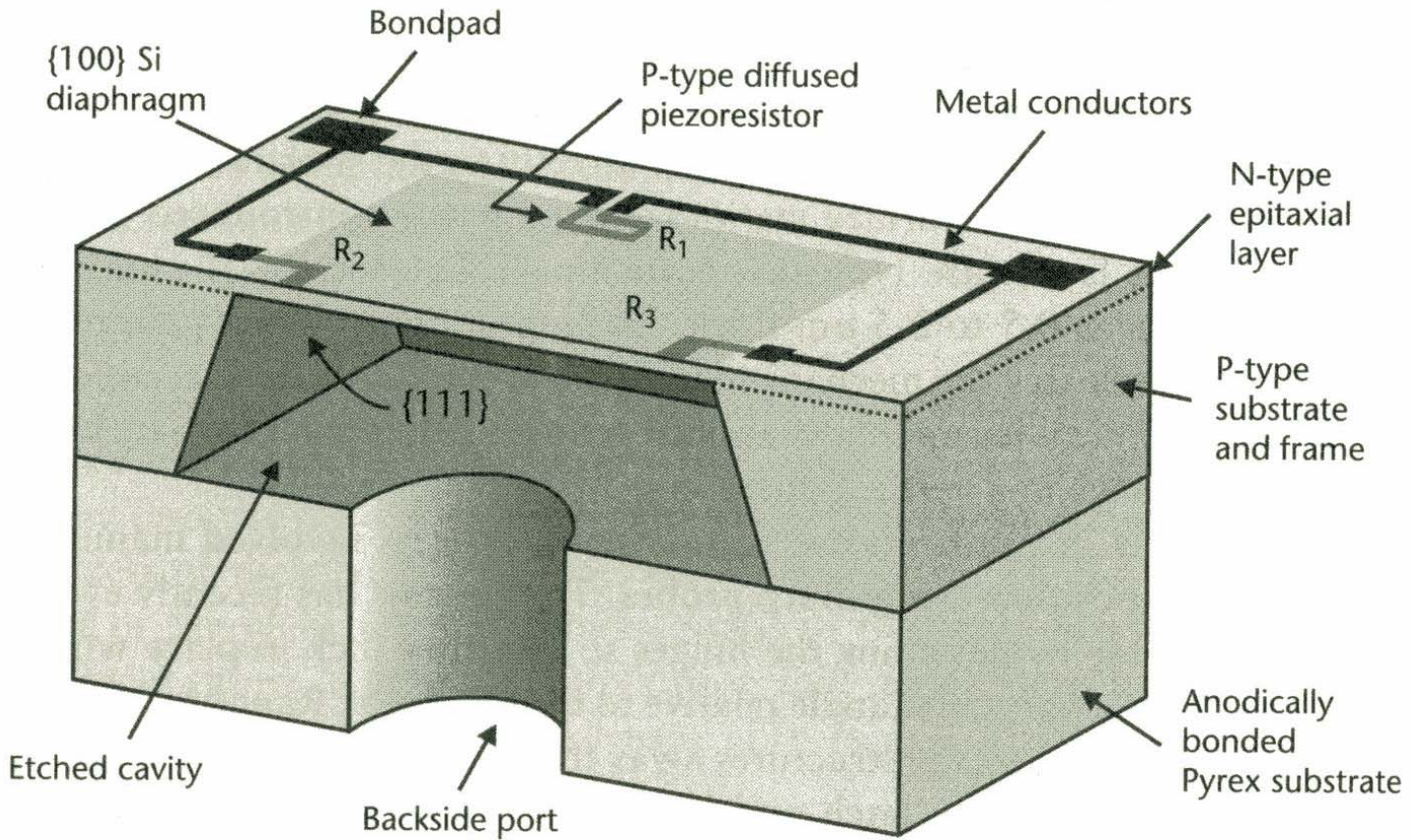
# Oppsummering

- Elektrostatisk er fordelaktig pga. enkelheten
  - + Operasjon kontrolleres ved spenning
  - ÷ Krever beskyttelse mot omgivelsene (støv)  
→ krav til pakking
  - ÷ Transduksjonsmekanismene er typisk ulineære
    - Gir forvrengninger
    - Botemiddel: små signalvariasjoner rundt en DC-spenning

# Bruken av de ulike prinsippene

- **Piezoresistiv** deteksjon
  - Resistans varierer pga. ytre trykk/stress
  - Brukes til trykk-måler
    - membran
  - Piezo-motstander plasseres på membran hvor "strain" har høyest verdi
  - Resistansverdien er proporsjonal med "strain"
  - Ytelsen av piezoresistive mikrosensorer er temperaturavhengig

# Trykksensor



# Bruken av prinsippene, forts.

- **Kapasitiv** deteksjon
  - Benytter kapasitans-endringer
  - Trykk → elektrisk signal
    - Detekteres ved endring i f.eks. oscillasjons-frekvens, ladning, spenning (V)
  - Har potensial for høyere ytelse enn ved piezoresistiv deteksjon
    - + Høy følsomhet
    - + Kan detektere små trykk-endringer
    - + Høy stabilitet

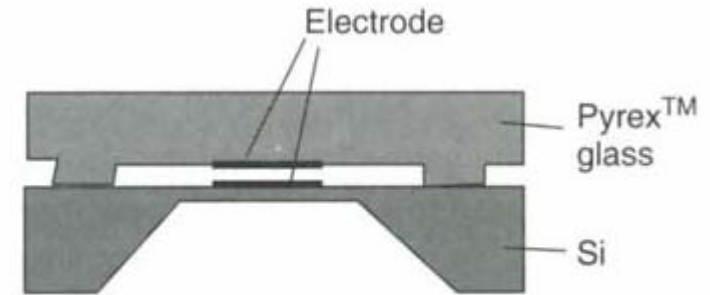


Figure 1.19 Capacitive sensing structure

# Bruken av prinsippene, forts.

- **Piezoelektrisk** deteksjon
  - Elektrisk ladnings-endring ved kraft-påtrykk
- **Resonans** deteksjon
  - Analogi: stressvariasjon på en streng fører til strain ("tøyning") og endring av den naturlige svinge-frekvensen