

INF 5490 RF MEMS

F12: RF MEMS induktanser

V2007, Oddvar Søråsen
Institutt for informatikk, UiO

Dagens forelesning

- Hva er en induktor?
- Induktanser realisert som MEMS
- Modellering
- Ulike typer RF MEMS induktorer
 - **Horisontalplan** induktanser
 - Ekte **spoler** (solenoider)
- Hvordan øke ytelsen
 - Q-verdi, Induktans (L), Selvresonans-frekvens (f_{\max})
- Eleverte induktanser
- Induktor-banker

Hva er en induktor?

- Induktor = en komponent med interaksjon mellom **magnetisk** og **elektrisk fluks**
 - magnetfelt \leftrightarrow strøm
- To sentrale lover
 - Faradays lov
 - Varierende **magnetfelt** induserer **strøm**
 - Amperes lov
 - **Strøm** som flyter setter opp **magnetfelt**

Faradays lov

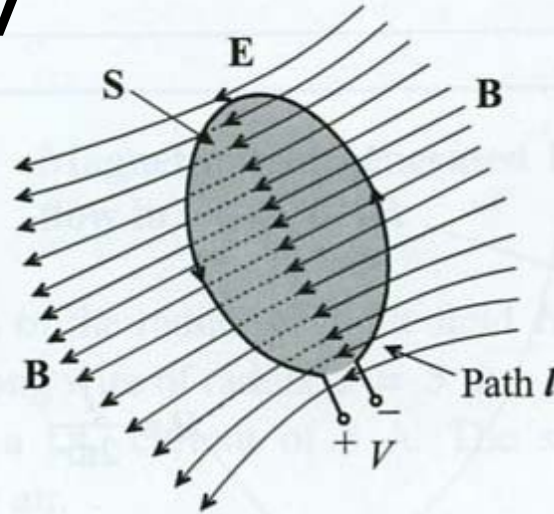


Figure 2-15 The time rate of change of the magnetic flux density induces a voltage.

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d}{dt} \iint \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

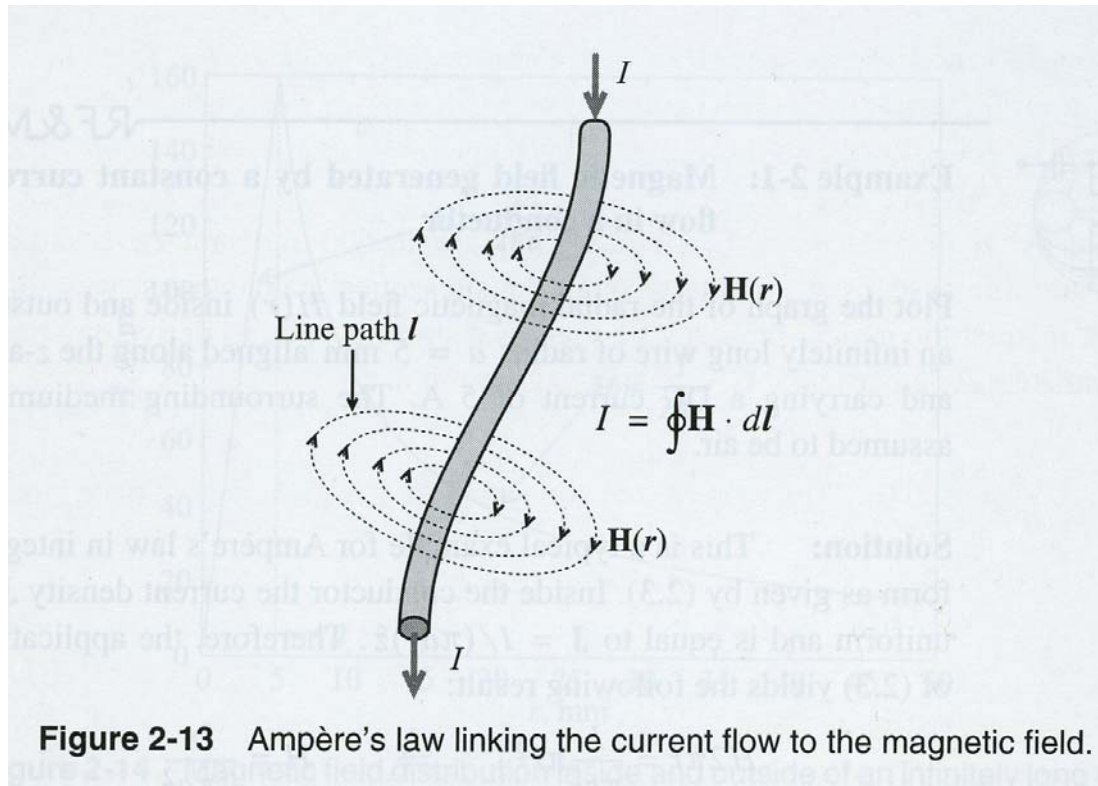
\vec{B} = magnetisk flukso-tetthet

$$\vec{B} = \mu \cdot \vec{H}$$

μ = permeabilitet = $\mu_0 \cdot \mu_r$

\vec{H} = magnet felt

Ampere's law



$$I = \oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = \iint \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

Induktor er underlagt **Faradays/Amperes lover**

- Strømindring i induktor →
- Endring i magnetfelt (Amperes lov) →
- Elektrisk felt induseres (Faradays lov) →
- Det induerte elektriske feltet motvirker ytterligere endringer i strømmen (Lenz lov)
 - Treghet mot endring ("reaktans")

Induktans

- Realiseres som **spole**
 - 2D eller 3D
 - Flere vindinger benyttes for å øke magnetisk flukstetthet
 - Kan gi stor induktans, L , på lite areal
- Grunnleggende ligninger
 - $V = L \, di/dt$
 - $V = Ls * I$ (Laplace)
- Spoler i **planet** er typisk for IC og MEMS

Konkurranse fra IC

- Standard **CMOS, SiGe-teknologi** har vist seg å gi gode resultater!
 - F.eks. $Q = 12-18 @ 2 \text{ GHz}$, $16-22 @ 6 \text{ GHz}$ (2003)
- Grunner til at IC-komponenter har økt i ytelse
 - Optimalisering av **induktor-geometri** vha. gode CAD-verktøy
 - Benytte **tykke metall-lag** av gull ($3 \mu\text{m}$)
 - Benytte substrater med høy **resistivitet**, 10-2000 ohm-cm, noe som reduserer "eddy currents" -tap under induktoren (= magnetisk induserte strømmer)
 - **Tykt dielektrikum** ($3-6 \mu\text{m}$ oksyd over substratet)

Muligheter for RF MEMS induktanser?

- Mikromaskinerte induktanser bør ha bedre egenskaper enn dagens CMOS-induktanser
 - MEMS gir muligheter for høye Q-verdier!
 - **Q>30**
 - MEMS kan gi høyere L og egenresonans-frekvens
- Bør være CMOS compatible
 - F.eks. post CMOS prosessering
- Ingen mikromaskinerte induktanser er ennå et kommersielt produkt

Anvendelser for (RF MEMS) induktorer

- Erstatnings-komponenter i
 - Lav-støy oscillatorer
 - Integreerte LC-filtre
 - Forsterkere
 - On-chip matching-nettverk
 - Impedans-transformere
 - Faseskiftere

RF MEMS induktorer

- To-dimensjonale (**planare**) induktorer
- Tre-dimensjonale induktorer, **solenoider**
- Kun **fast-verdi** induktorer realiseres
 - Ingen praktisk implementasjon av tunbare eksisterer
- Realisering av **induktor-banker**
 - Mange induktanser med faste, høye Q-verdier
 - I kombinasjon med kontakt-svitsjer

Planare induktorer, generelt

- Realisert i et plan
- Laget ved et enkelt **metall-lag** som er etset ut
- Induktor hviler på et **substrat** dekket av et **dielektrikum**
- Tap i induktor pga.
 - Endelig konduktivitet i metallet
 - Tap i dielektrikum
 - Tap i substratet
- Areal-begrensning
 - Total linjelengde i spolen bør være vesentlig mindre enn bølgelengden
 - Gir derved neglisjerbart faseskift i signalet

Ulike planare geometrier

- Enkle **linje-seksjoner**
 - Har lav induktans-verdi, nH
- **Meandere**
 - Kobling ved negativ mutual induktans
- **Spiral-induktorer**
 - Høyere L, høyere Q
 - Den **indre vindingen** tilkobles ved
 - Wire bonding
 - Eget struktur-lag
 - Flip-chip-metoder

Bidrag til induktans

- **Selv-induktans** fra egen vinding
- **Mutual induktans** fra nabo-vindinger
 - Gjensidig kobling mellom nabo-linjer
- Total induktans er summen av selvinduktans og gjensidig induktans fra nabo-elementer
 - I noen elementer går strømmen i samme retning, i andre motsatt

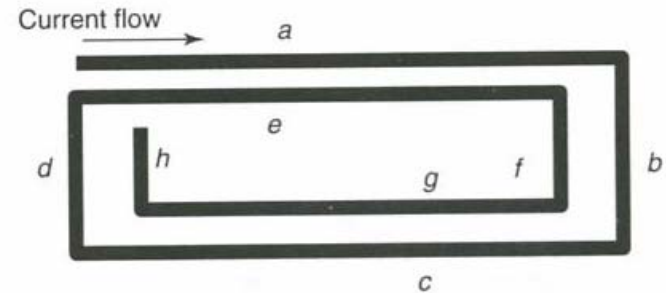


Figure 4.2 Spiral inductor and the effect of current flow in nearby segments

Ulike planare geometrier

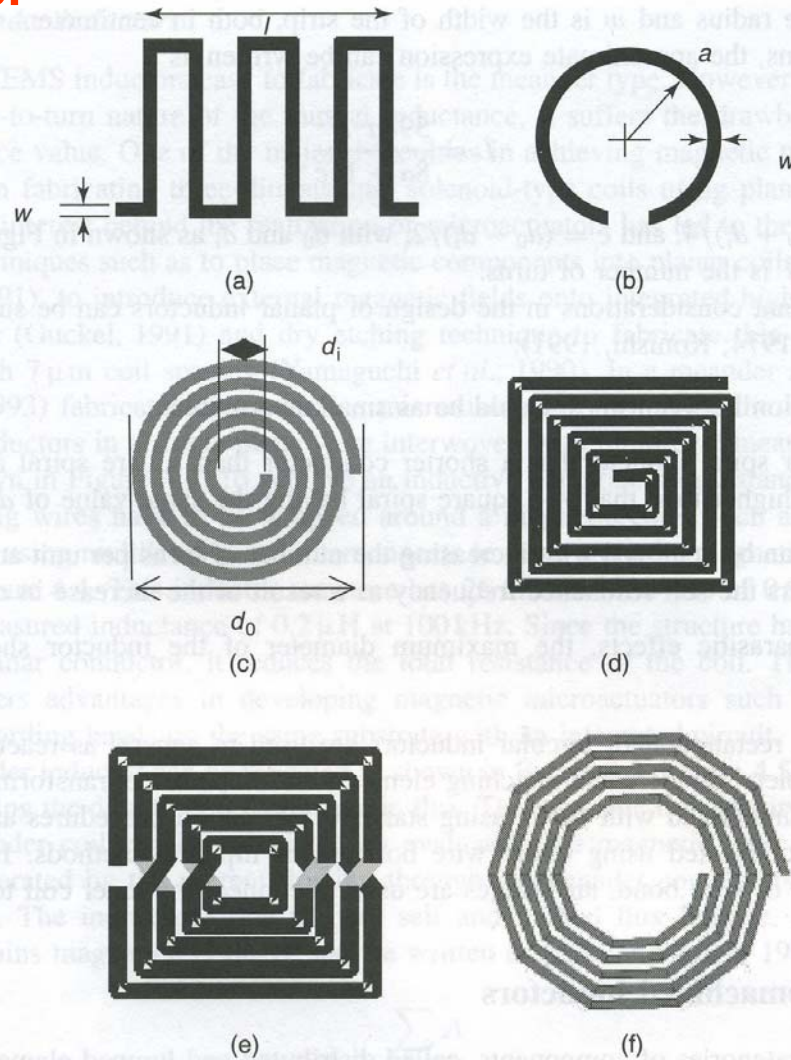


Figure 4.3 Schematic diagram of common planar inductors: (a) meander; (b) loop; (c) circular spiral; (d) square spiral; (e) symmetric spiral; (f) polygon spiral

Kommentarer til fig. 4.3

- Avstanden mellom linjene er kritisk
- Sirkulær spiral har en kortere leder-lengde enn en kvadratisk spiral
 - \rightarrow Lavere R
 - Q er ca. 10% høyere med samme "diameter", d_0
- Høyere Q kan oppnås ved å øke antall vindinger pr. arealenhet
 - Selvresonans-frekvensen blir lavere pga økning i kapasitansen \rightarrow begrenser bruksområdet

Induktor er en ikke-ideell komponent

- Endrer verdi mhp frekvens
 - Blir etterhvert kapasitiv

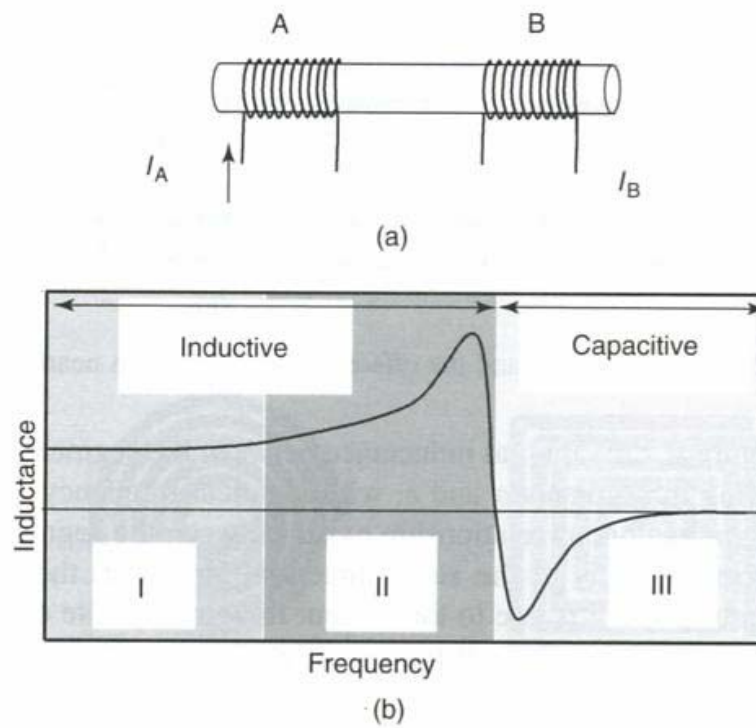


Figure 4.1 (a) Self-inductance and mutual inductance due to a change in current; (b) typical operational regions of an inductor. Note: I_A and I_B , current in coils A and B, respectively

Generell modell for planar induktor

L_s er lavfrekvens induktans

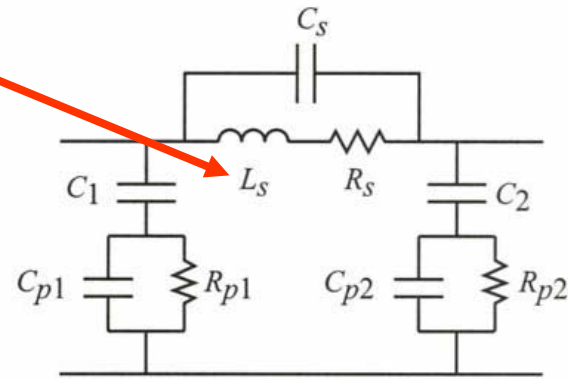
R_s er serie-resistans

C_s er kapasitans mellom vindingene

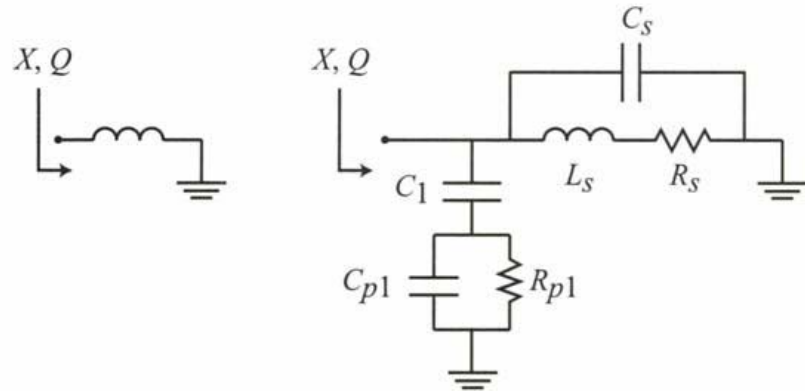
C_1 er kapasitansen i oksydlaget mellom spolen og substratet

C_p er kapasitans til jord gjennom substratet

R_p er eddy current tap i substratet



(a)



(b)

Figure 12.1. (a) The equivalent LRC model of a planar inductor. (b) A short-circuited inductor model typically used in S -parameter and Q measurements. C_{p1} and C_{p2} are often assumed identical and equal to C_p .

Frekvensrespons til en planar induktor

- Ved lave frekvenser gjelder

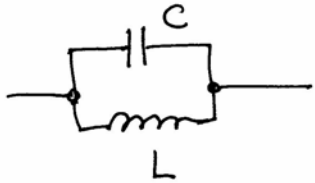
$$Z = R_s + j\omega L_s \quad (12.1)$$

- Ved høye frekvenser:
 - R_{p1} kan neglisjeres
 - C_1 og C_{p1} kan slås sammen $\rightarrow C_p$

$$Z = (R_s + j\omega L_s) \parallel \left(\frac{1}{\omega C_s} \right) \parallel \left\{ \frac{1}{\omega C_1} + \left(\frac{1}{\omega C_{p1}} \parallel R_{p1} \right) \right\} \quad (12.2)$$

Parallell resonator

Parallell resonans



$$Z = \frac{\frac{1}{j\omega C} \cdot j\omega L}{\frac{1}{j\omega C} + j\omega L}$$

Resonans når

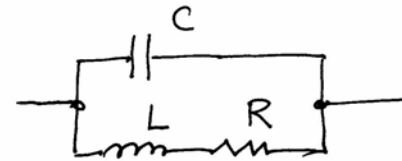
$$\frac{1}{\omega C} = \omega L$$

$$\frac{1}{j\omega C} + j\omega L = 0$$

$$Z = \infty$$

På grunn av parasitt-kapasitanser vil en få en gitt egenresonans-frekvens

$$Q_{ind} = \omega L / R$$



$$Z = \frac{\frac{1}{j\omega C} \cdot (R + j\omega L)}{\frac{1}{j\omega C} + R + j\omega L} = \frac{-j\omega L (R + j\omega L)}{R}$$
$$\approx -j\omega L$$

Ved resonans:

$$Z = \frac{\omega^2 L^2}{R} - j\omega L \approx \frac{\omega^2 L^2}{R}$$

Induktor reaktans

Resistansen defineres ved 2 GHz

R antas å variere som sqrt (f) over 2 GHz pga skin-effekten (senere i forelesningen →)

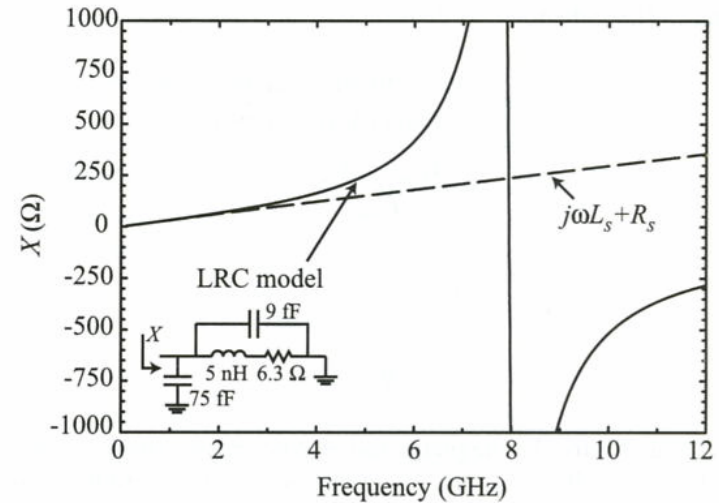
Parallell-type resonans ved 8 GHz, fasen endres også

Ved resonans er input-impedansen til en parallell resonator reell og gitt ved:

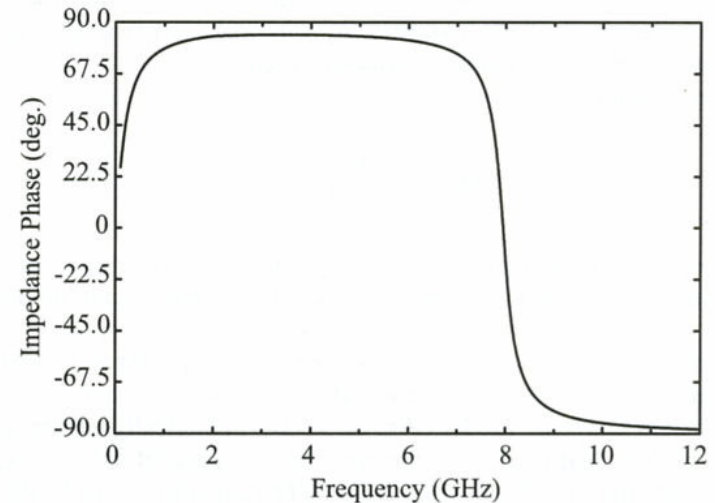
$$Z_{res} = \frac{(\omega L_s)^2}{R_s} \quad (12.3)$$

Viser at enkel L, R –modell er valid til 0.5 f_resonans

Fase-egenskapene viser at komponenten er induktiv også videre oppover



(a)



(b)

Figure 12.2. The calculated X (a) and phase (b) of a planar 5-nH inductor. The resonant frequency is 8 GHz and the resistance is assumed constant up to 2 GHz and then increases as \sqrt{f} .

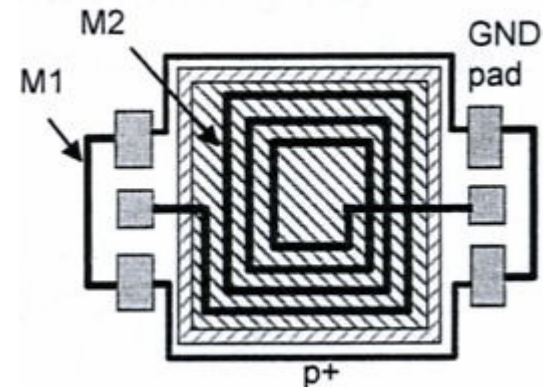
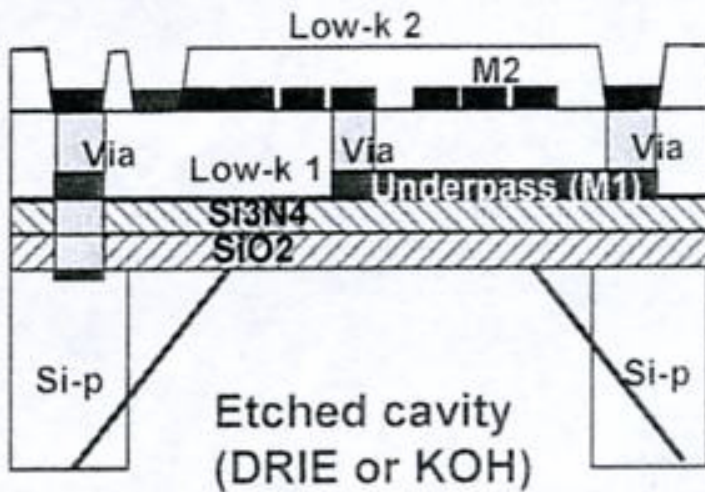
Dagens forelesning

- Hva er en induktor?
- Induktanser realisert som MEMS
- Modellering
- Ulike typer RF MEMS induktorer
 - **Horizontalplan** induktanser
 - Ekte **spoler** (solenoider)
- Hvordan øke ytelsen
 - Q-verdi, Induktans (L), Selvresonans-frekvens (f_{\max})
- Eleverte induktanser
- Induktor-banker

Eksempel: Tykk kobber/polyimid horizontal-plan induktor

Process (EPF Lausanne, WIDE-RF):

- 4-8 μm electroplated Cu in polyimide mold using Ta barriers



”Form” av organisk materiale

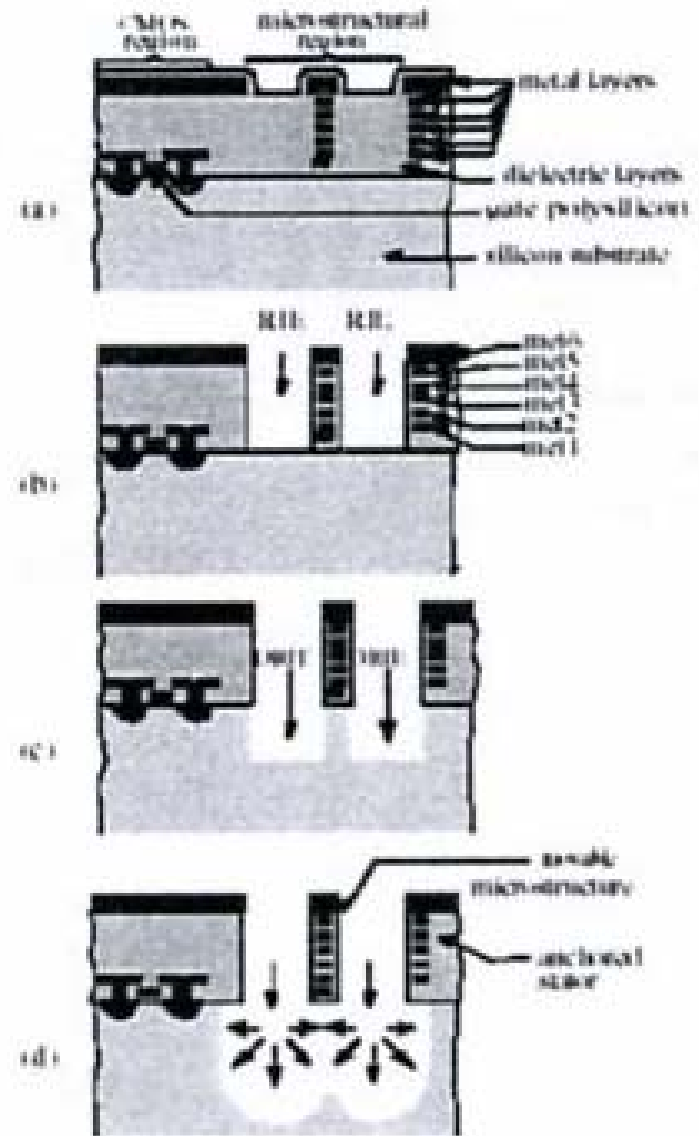
Eks fra Transducers 2001, MAI 82-83

- Høy Q, 6 kobber-lag
- Lav- ϵ dielektrikum
- Post CMOS prosessering
 - Standard CMOS + RIE post prosessering
- X. Zhu et al

Carnegie Mellon University

Isotrop etsing etterfulgt av anisotrop etsing

Metallag er maske



Eks. Spiral induktor (Ahn & Allen)

- To spoler
- **Magnetisk kjerne** benyttes for å samle magnetisk fluks
 - Må være materiale med høy permeabilitet
 - Eks Varadan fig. 4.7 (Ahn & Allen) →
- Krever ledning fra sentrum!

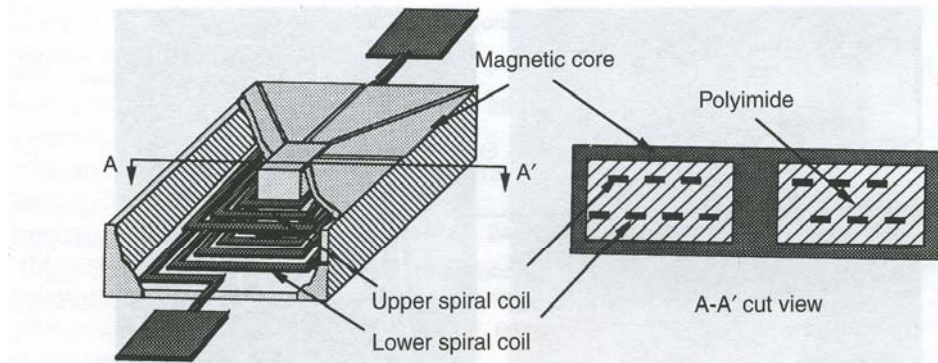


Figure 4.7 Schematic diagram of a micromachined spiral inductor. Reproduced from C.H. Ahn and M.G. Allen, 1993, 'A planar micromachined spiral inductor for integrated magnetic microactuator applications', *Journal of Micromechanics Microengineering* 3: 37–44, by permission of the Institute of Physics

Virkningen av å ha en magnetisk kjerne (core)

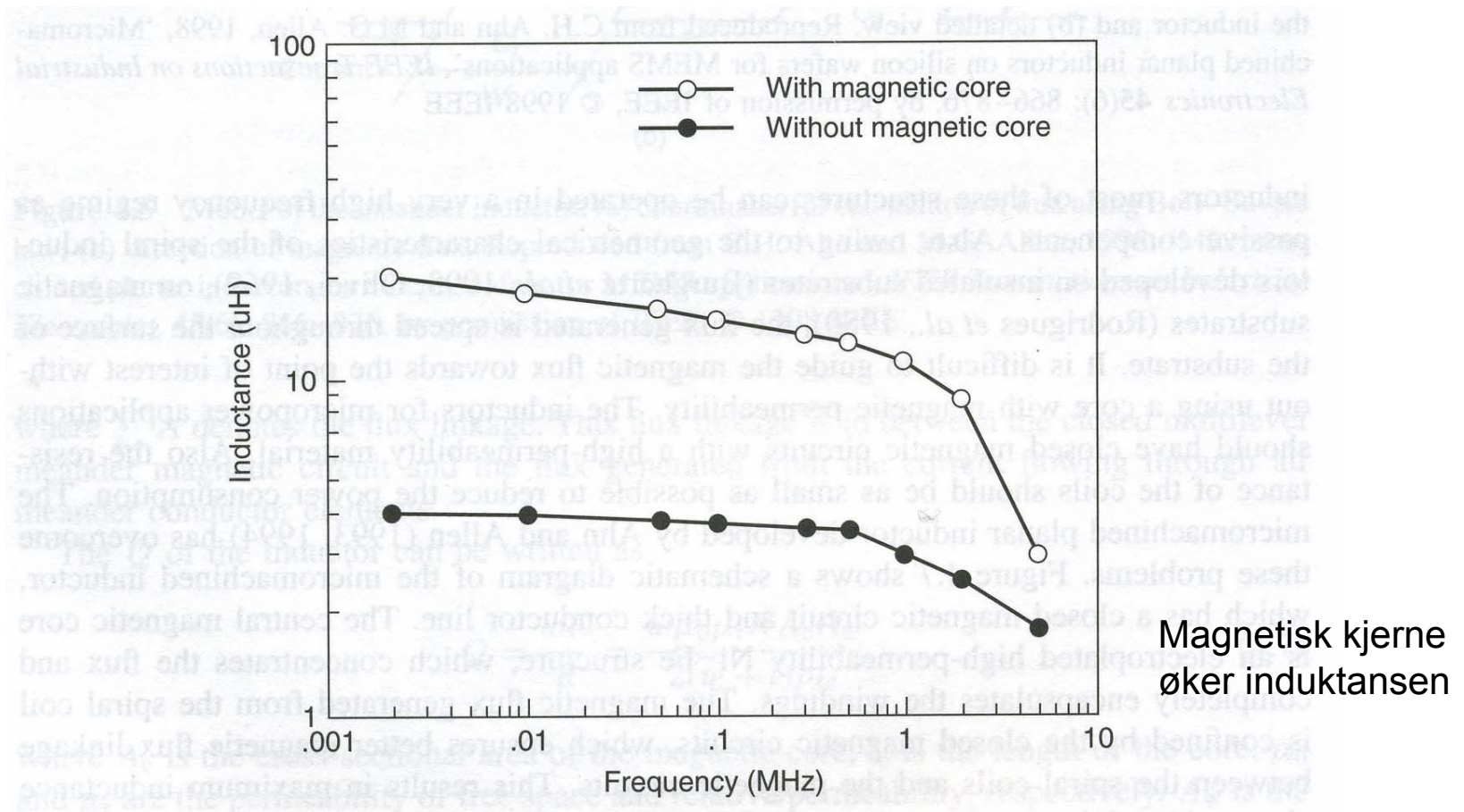


Figure 4.8 Measured inductance with and without magnetic core. Reproduced from C.H. Ahn and M.G. Allen, 1993, 'A planar micromachined spiral inductor for integrated magnetic microactuator applications', *Journal of Micromechanics Microengineering* **3**: 37–44, by permission of the Institute of Physics

Meander-induktanser

- Meander har lavere induktans-verdi enn spiral induktoren
- Meander laget ved overflateprosessering (skjematisk) →
 - a) Metall-leder i ett lag
 - gjennomvevd med multilevel magnetisk kjerne
 - b) Prinsipiell skisse
 - magnetisk kjerne i ett lag med metall-vindinger rundt

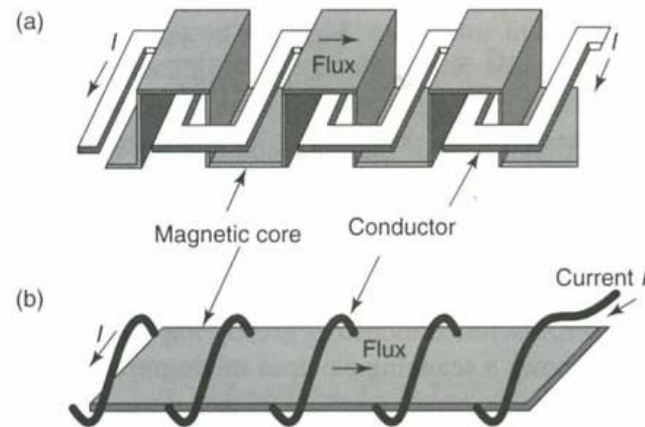


Figure 4.4 Schematic diagram of the micromachined multilevel meander inductor. Reproduced from C.H. Ahn and M.G. Allen, 1998, 'A fully integrated surface micromachined microactuator with a multilevel meander magnetic core', *Journal of Microelectromechanical Systems* 2(1): 15–22, by permission of IEEE, © 1998 IEEE

Meander fabrikert

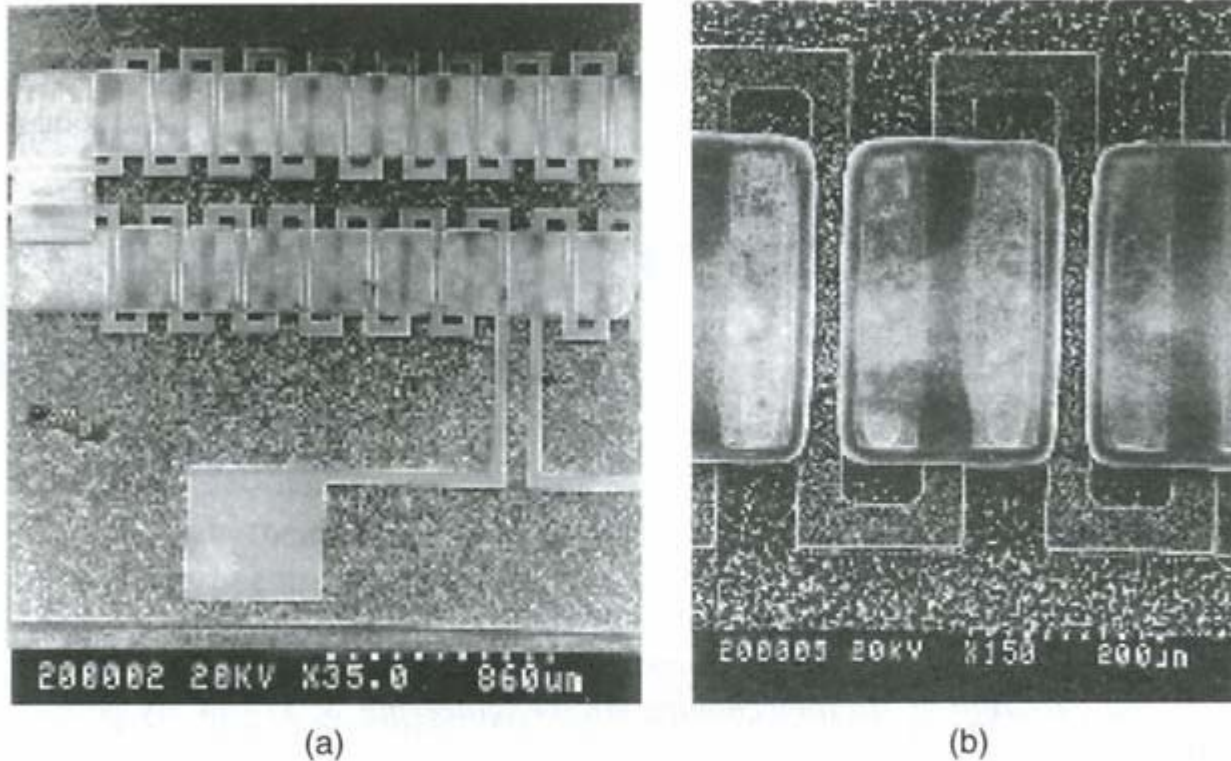
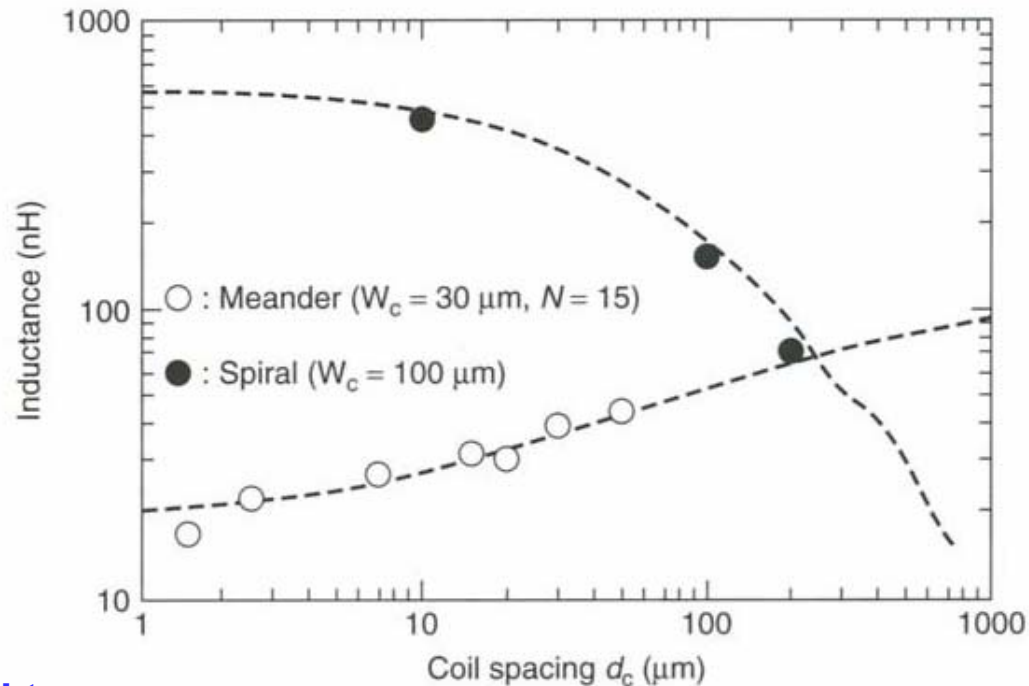


Figure 4.6 Scanning electron micrograph of the fabricated toroidal-meander inductor: (a) half of the inductor and (b) detailed view. Reproduced from C.H. Ahn and M.G. Allen, 1998, 'Micromachined planar inductors on silicon wafers for MEMS applications', *IEEE Transactions on Industrial Electronics* **45**(6): 866–876, by permission of IEEE, © 1998 IEEE

Effekt av ulike utlegg/ realiseringer

- Hvordan **linjeavstanden** innvirker på L



Ulik virkning for spiral og meander: konstruktiv versus destruktiv mutual induktans

Figure 4.10 Change in inductance arising from changes in spacing between the conductors for meander and spiral inductors. Reproduced from M. Yamaguchi, M. Mastumo, H. Ohzeki and K.I. Arai, 1991, 'Analysis of the inductance and the stray capacitance of the dry-etched micro inductors', *IEEE Transactions on Magnetics* **27**(6): 5274–5276, by permission of IEEE, © 1991 IEEE

Effekt av ulike utlegg/ realiseringer: meander

- Linjebreiddens innvirkning
 - ”sheet resistance” er invers proporsjonal med w : → avtar!
 - Resistansen blir mindre med økende w , mens kapasitansen øker

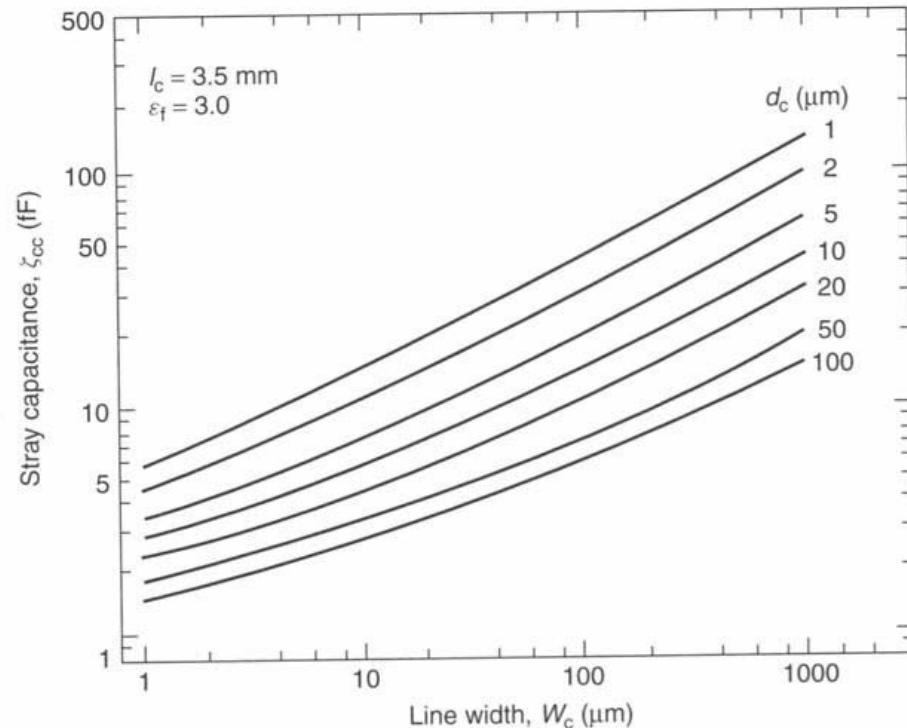
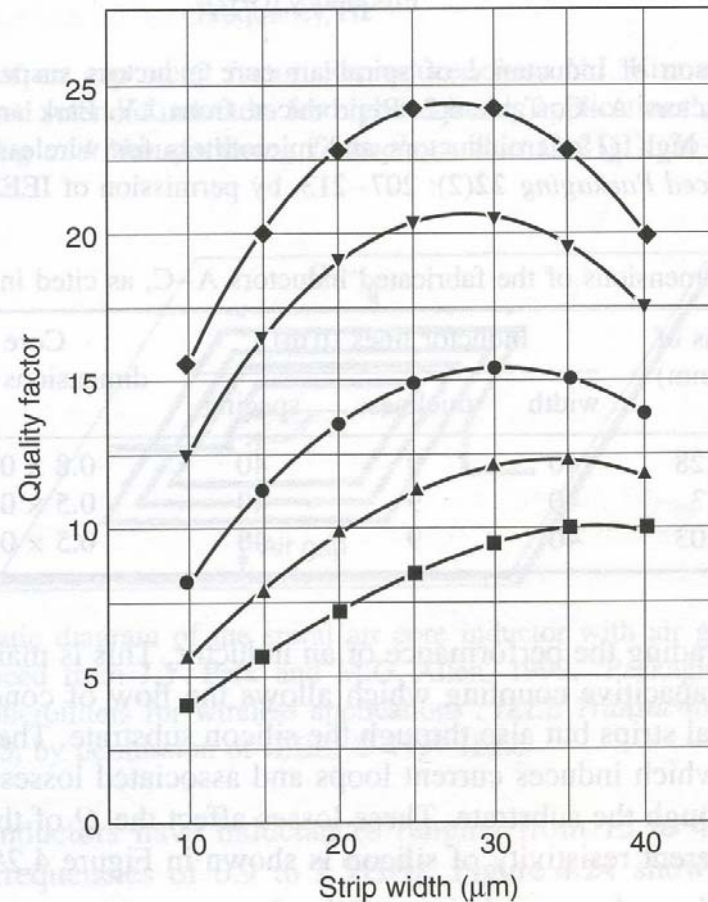


Figure 4.11 Computed stray capacitance due to change in line width W_c . Reproduced from M. Yamaguchi, M. Mastumo, H. Ohzeki and K.I. Arai, 1991, 'Analysis of the inductance and the stray capacitance of the dry-etched micro inductors', *IEEE Transactions on Magnetics* **27**(6): 5274–5276, by permission of IEEE, © 1991 IEEE

dc= avstand mellom lederne

Effekt av stripebredden w på Q-faktor



Det finnes optimale verdier av w for å minimalisere serie-resistans og maksimalisere Q

Figure 4.26 Change in Q due to change in strip width for 20-nH inductors for different frequencies: ■, 7 GHz; ▲, 1 GHz; ●, 1.5 GHz; ▼, 2.5 GHz; and ◆, 3.5 GHz. Reproduced from I.J. Bahl, 1999, 'Improved quality factor spiral inductors on GaAs substrates', *IEEE Microwave and Guided Wave Letters* 9(10): 398–400, by permission of IEEE, © 1999 IEEE

- Effekt av **antall vindinger** på L og Q
- Spiral induktorer med samme dimensjoner
- $n: 3 \rightarrow 8$:
 - L øker
 - Q avtar

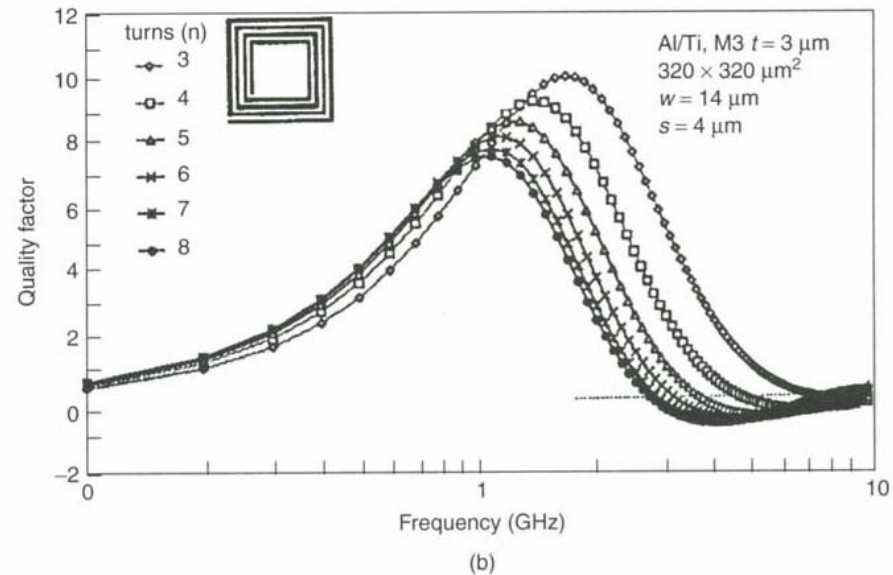
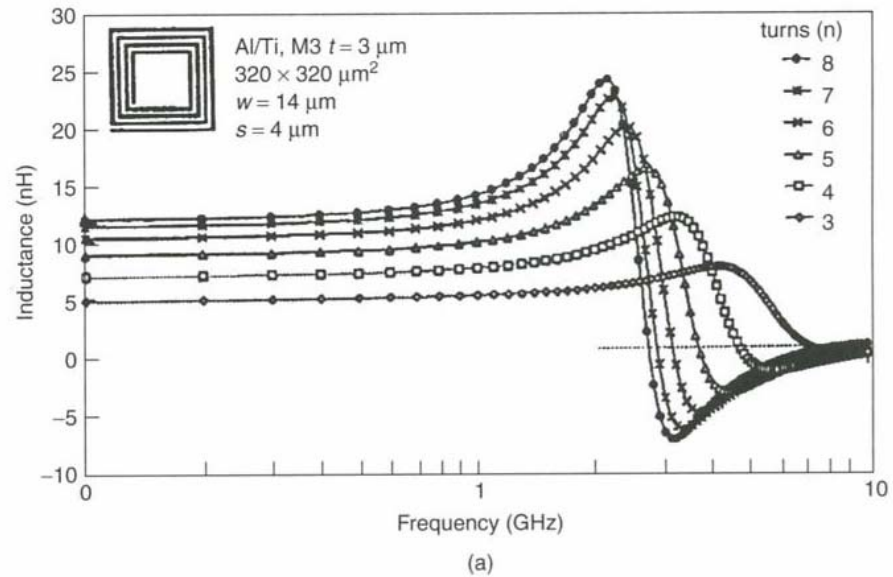
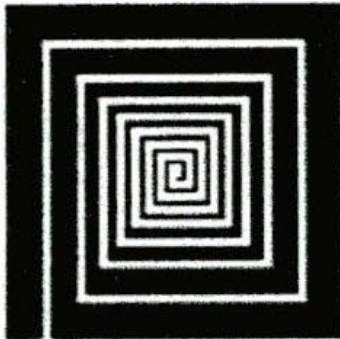


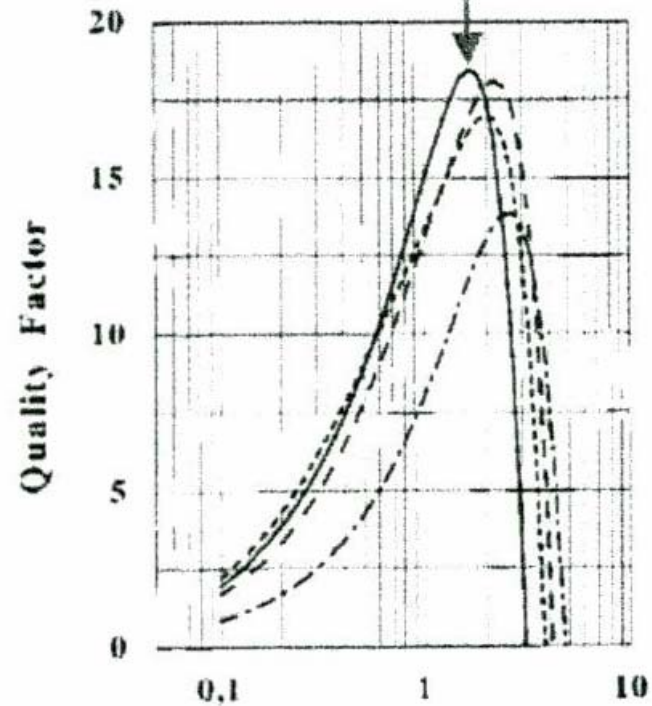
Figure 4.12 Effect of number of turns on (a) the inductance value and (b) Q factor. Reproduced from Y.K. Koutsoyannopoulos and Y. Papananos, 2000, 'Systematic analysis and modeling of integrated inductors and transformers in RF IC design', *IEEE Transactions on Circuits and Systems II* 47(8): 699–713, by permission of IEEE, © 2000 IEEE

Optimalisering

- Bredden på hver turn kan optimaliseres
 - Konstant motstand i hver turn

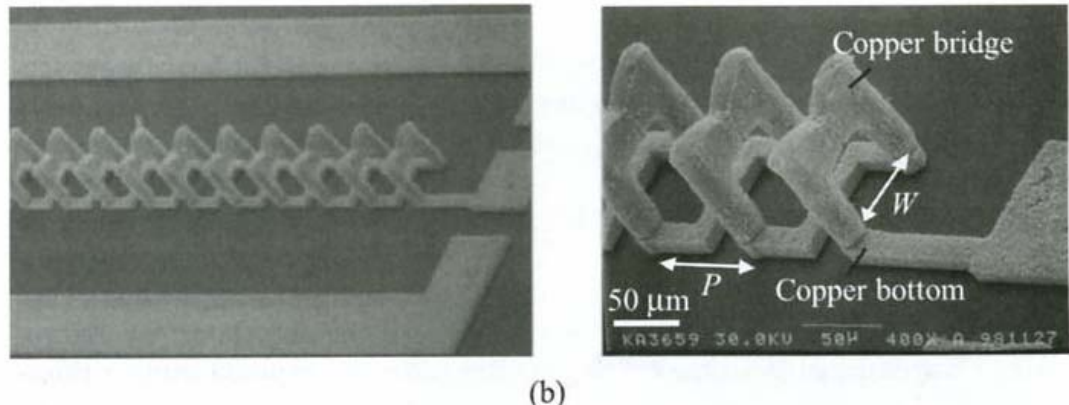
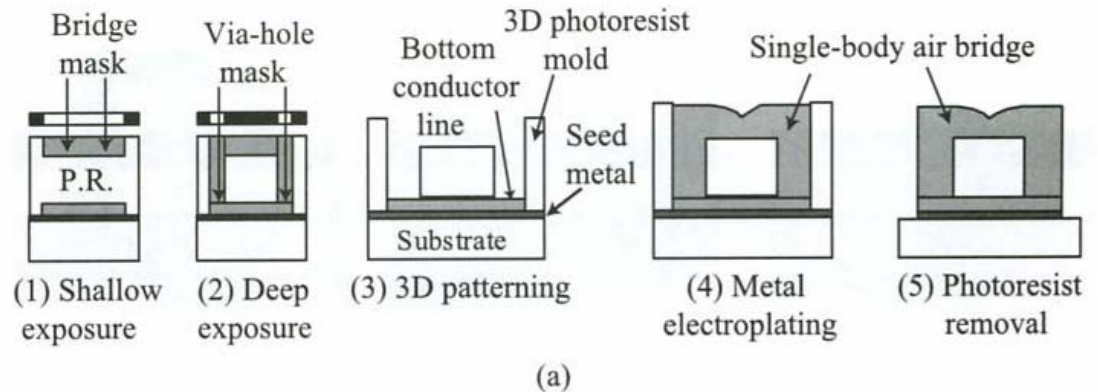


Optimized (**width of each turn**) inductor design

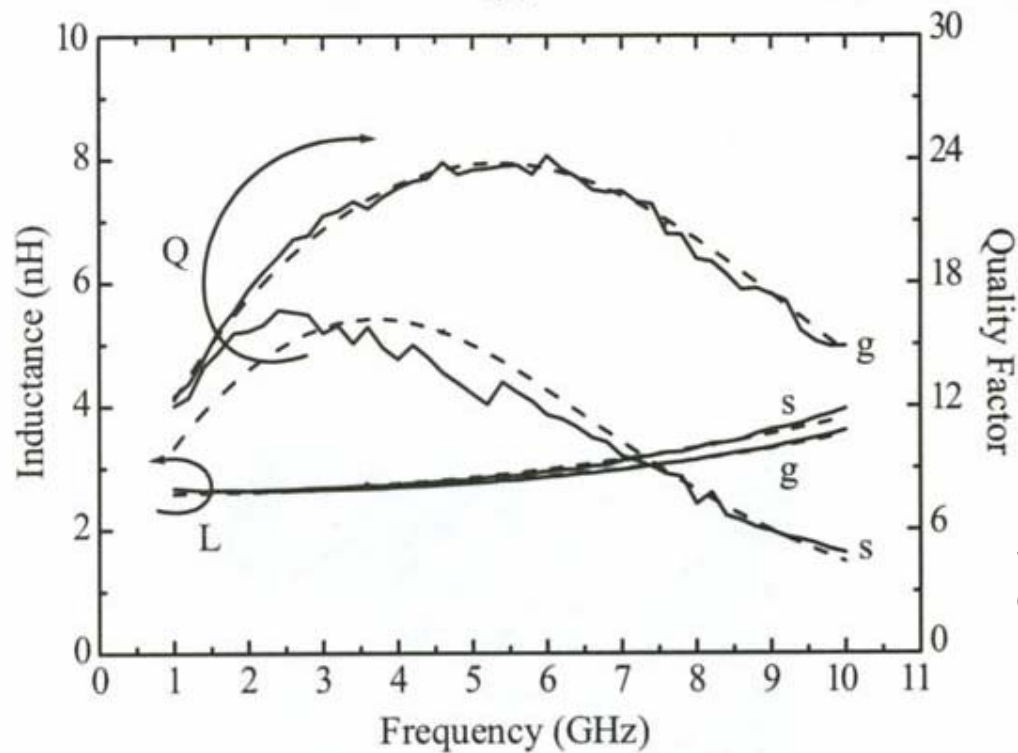


Solenoid-type induktorer

- Klassisk eksempel
- Prosess med en **tykk fotoresist-form**
 - 45 – 60 μm dyp
- Toppen fabrikeres med kobber:
elektroplettering
 - 20 – 30 μm kobber-lag på toppen
- Resultat: "løkker"



Solenoid-type kobber induktorer



(c)

Figure 12.14. Fabrication process (a), picture (b), and measured performance (c) of a 2.4-nH all-copper solenoid inductor on silicon and glass substrates [24, 25] (Copyright IEEE).

**Si eller glass-substrat
gir ulike verdier**

Resultater fra Yoon et al.

Ekstrem variant

- Solenoid-type induktor med en stor alumina-kjerne
 - Plasseres **manuelt** på et Si-substrat, fig. →
 - Tverrsnitt 650 x 500 μm^2
 - Fotoresist på alumina-kjernen
 - Direkte write laser, 3 dimensjonal
 - Elektrolettering 5-10 μm kobber
 - **Ikke praktisk**

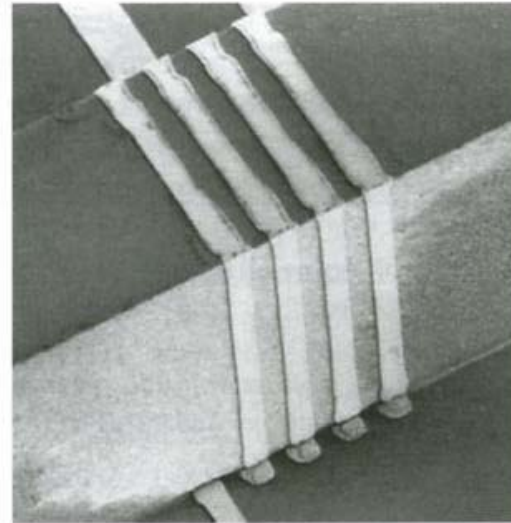


Figure 12.16. A solenoid-type four-turn inductor using a large alumina core [28] (Copyright IEEE).

Young et al., 1997

Eksempel på 3-D struktur

- Vanskelig å produsere
 - Nikkel-jern permalloy magnetisk kjerne
 - Multilevel kobber + via-kontakter
 - Kontaktene har høy kontakt-resistans
 - Må ha mange vindinger for å få høy L
- Flere kontakter → høyere resistans
- Elektroplettering av spolens metall-linjer og vias kan avhjelpe

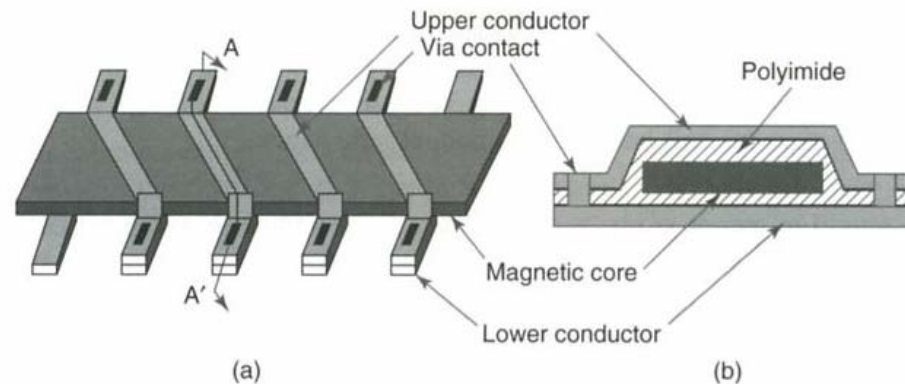


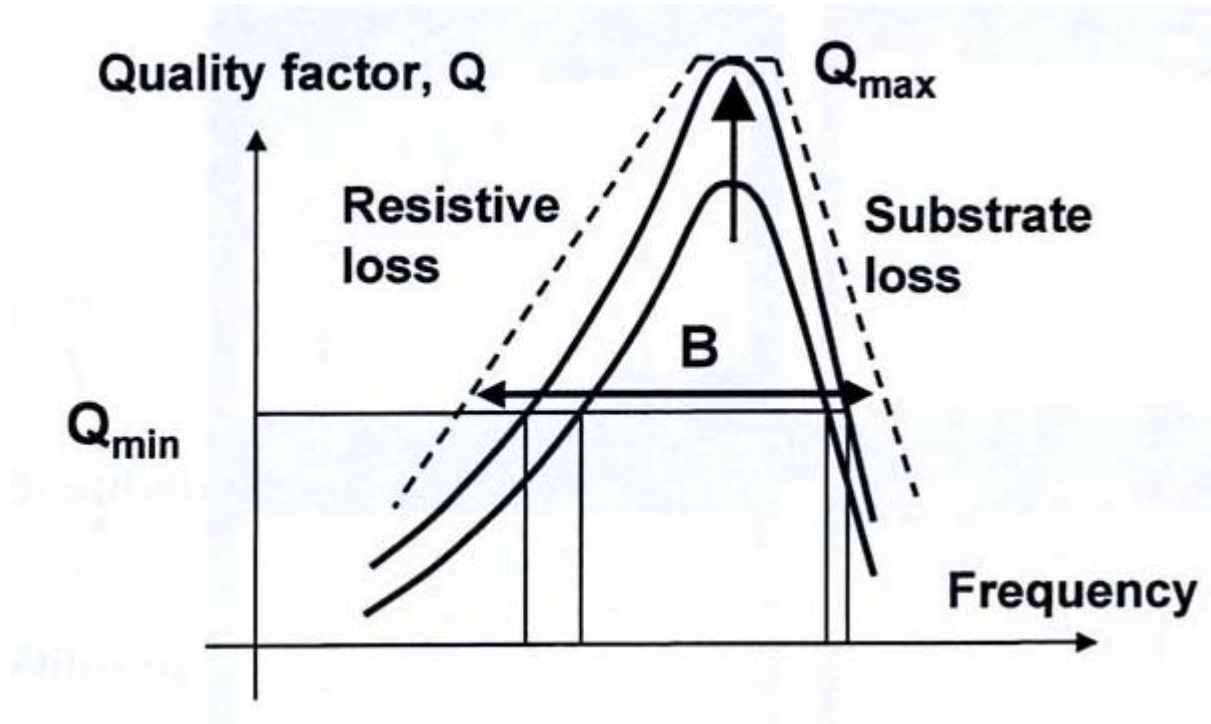
Figure 4.9 Schematic diagram of a solenoid-type inductor: (a) schematic view; (b) cross-sectional view at AA'. Reproduced from C.H. Ahn and M.G. Allen, 1998, 'Micromachined planar inductors on silicon wafers for MEMS applications', *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 45(6): 866–876, by permission of IEEE, © 1998 IEEE

Ahn & Allen, 1998

Dagens forelesning

- Hva er en induktor?
- Induktanser realisert som MEMS
- Modellering
- Ulike typer RF MEMS induktorer
 - **Horisontalplan** induktanser
 - Ekte **spoler** (solenoider)
- **Hvordan øke ytelsen**
 - Q-verdi, Induktans (L), Selvresonans-frekvens (f_{\max})
- Eleverte induktanser
- Induktor-banker

Q-faktor er avhengig av resistivt tap og substrat-tap



For lave frekvenser er det spesielt **resistivt tap** som begrenser Q

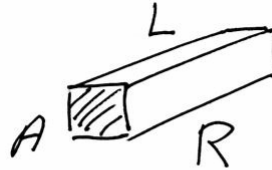
For høye frekvenser er det spesielt **substrat-tapet** som begrenser Q

Forbedring av Q-faktor

- Metalliseringen er viktig
 - Reduksjon av resistivt tap
- Bruk metall med **lavere motstand**
 - Bruk kobber, Cu, istedenfor Al
- Bruk **tykkere** strukturer

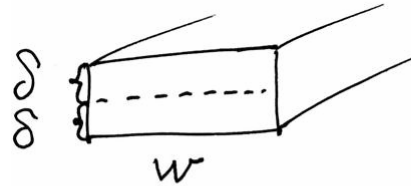
Effekt av metalliserings-tykkelse

- Serie-resistansen begrenser ytelsen
- Simuleringer viser at en trenger min 2 x "skin depth" i tykkelse for å oppnå min resistans



ρ = resistivitet

$$R = \frac{\rho \cdot L}{A}$$



Resistivitet pr. lengde

$$\frac{R}{L} = \frac{\rho}{A} = \frac{\rho}{2\delta \cdot w}$$

Skin-depth = δ

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\pi \mu \cdot f}} \sim \frac{1}{\sqrt{f}}$$

Permeabilitet i fritt rom = μ

$$\frac{R}{L} \sim \frac{1}{\delta} \sim \sqrt{f}$$

Tykke ledere trengs

- For kobber ved 1 GHz er skin depth ca 2 μm
- Bør ha leder som er min 2 x skin depth i tykkelse
 - dvs. ca 4 - 5 μm for Cu: tykke lag!
 - Slike metall-tykkelser oppnås typisk ved **elektroplettering**

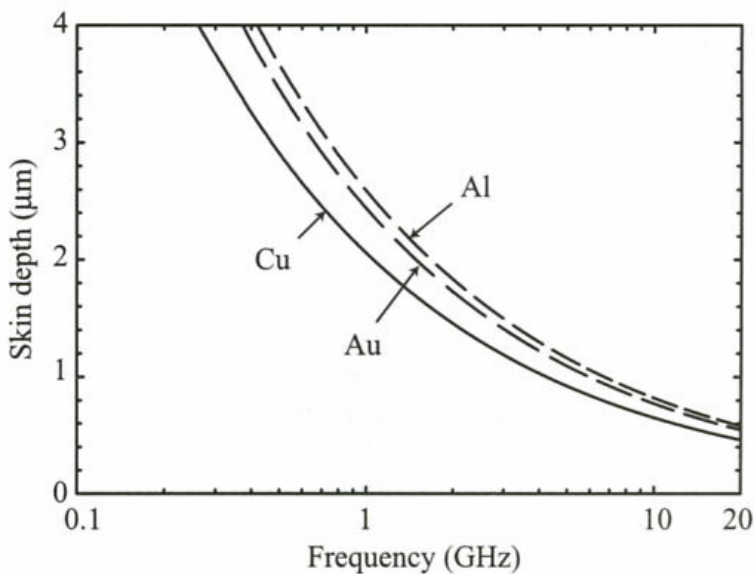


Figure 12.4. Skin depth versus frequency for copper, gold, and aluminum metal layer (bulk values of resistivities are assumed).

Effekt av serie-resistans på Q-faktor

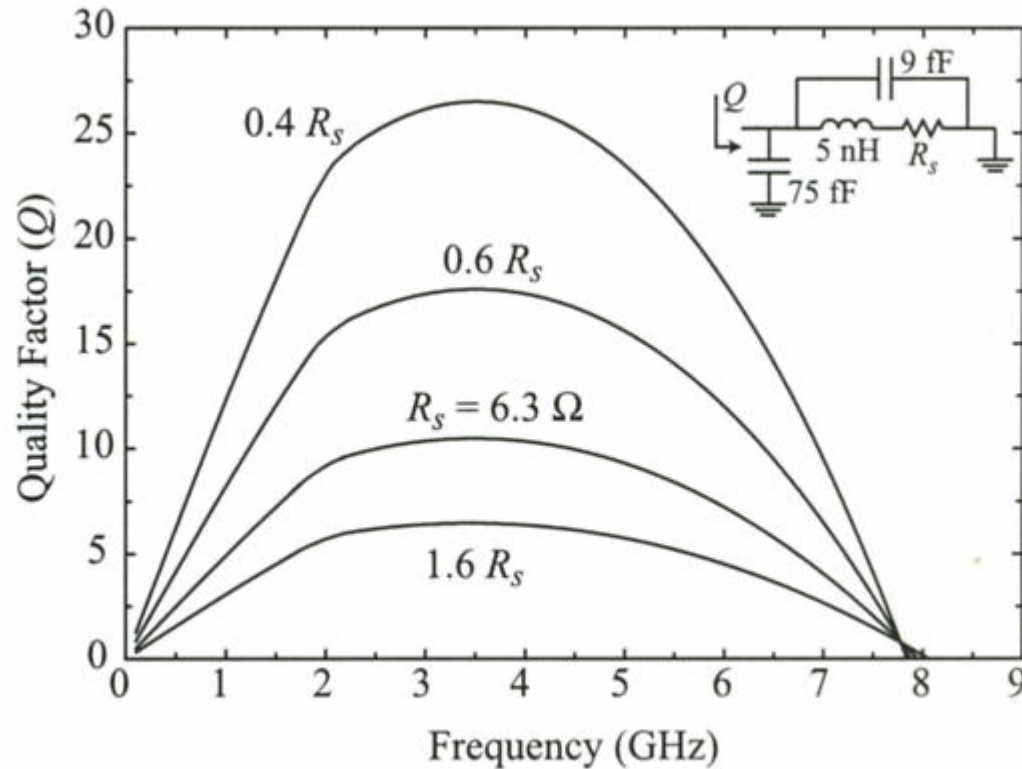


Figure 12.5. The effect of the series resistance on the Q of a 5-nH inductor. The resistance is assumed constant up to 2 GHz and then increases as \sqrt{f} .

$$Q = \omega L/R$$

Serieresistansen øker som sqrt (f). I tillegg kommer virkningen av C

Dobbelt nivå metallisering

Legend: "motsatt"?

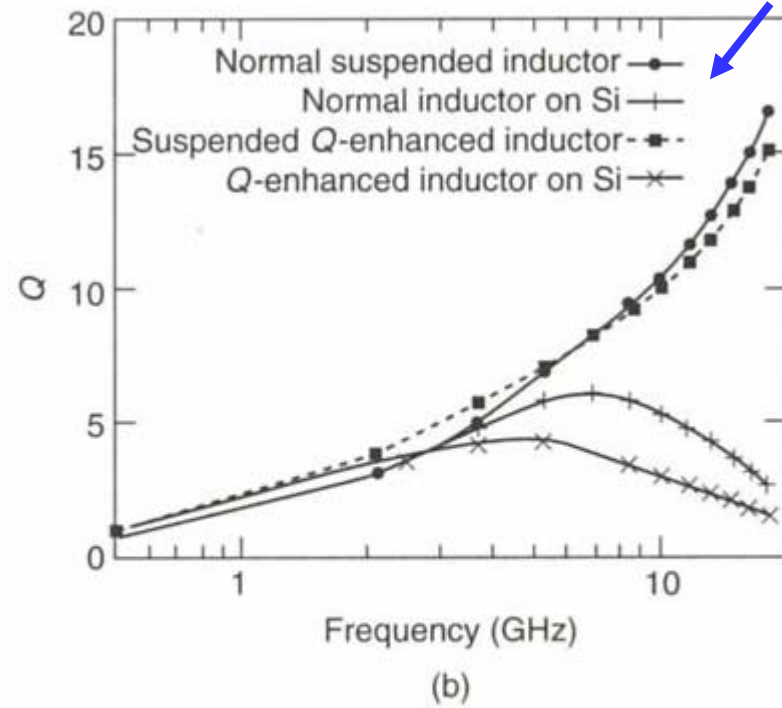
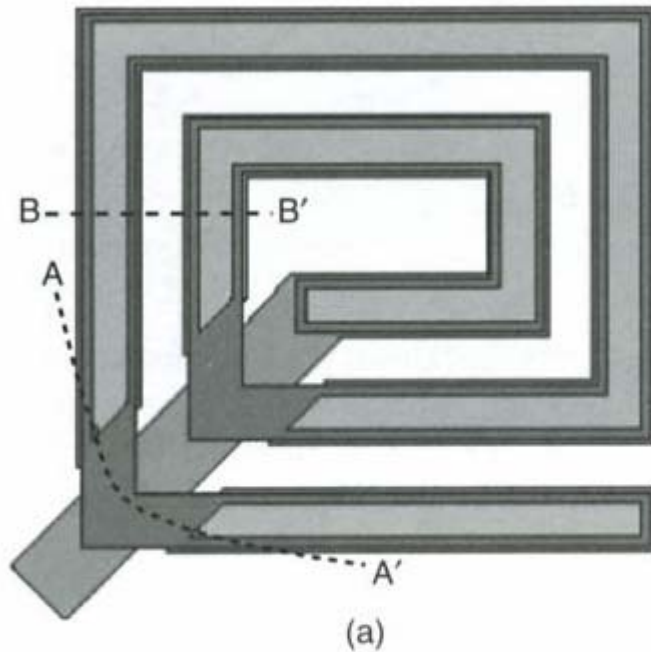


Figure 4.27 (a) Schematic diagram of a Q -enhance inductor; (b) measured results of normal and Q -enhanced inductors. Reproduced from Y. Sun, J.L. Tauritz and R.G.F. Baets, 1999, 'Micromachined RF passive components and their applications in MMICs', *International Journal of RF and Microwave CAE* 9: 310–25, © Wiley (1999), by permission of Wiley

4.5 μm \rightarrow 9 μm , på/uten 10 μm polyimid-lag

Endring av Q versus metall-tykkelse

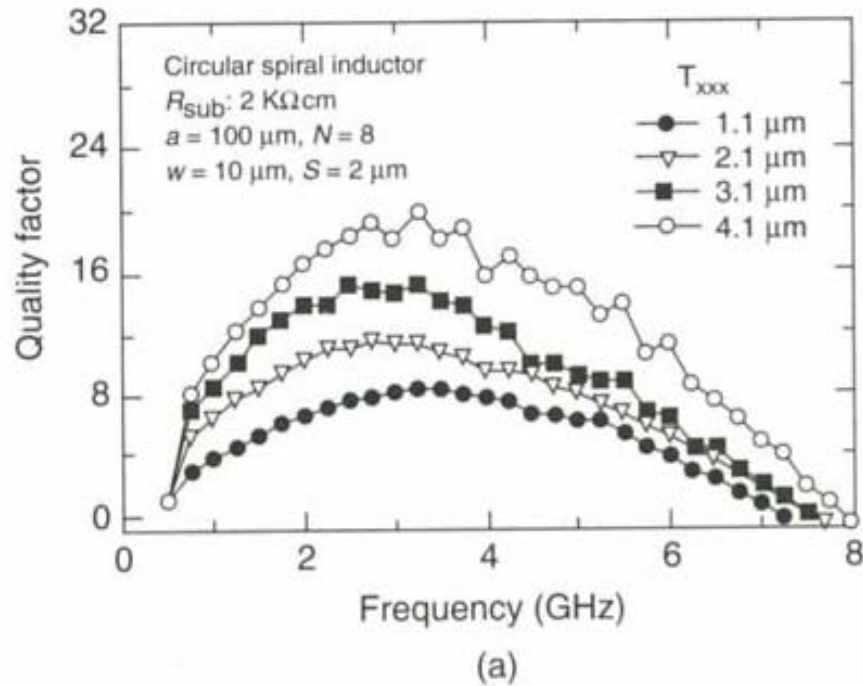


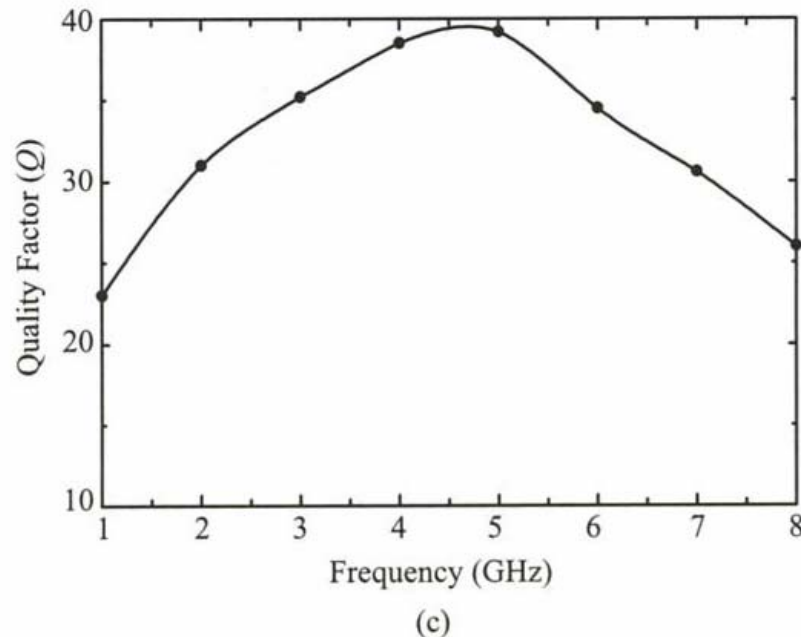
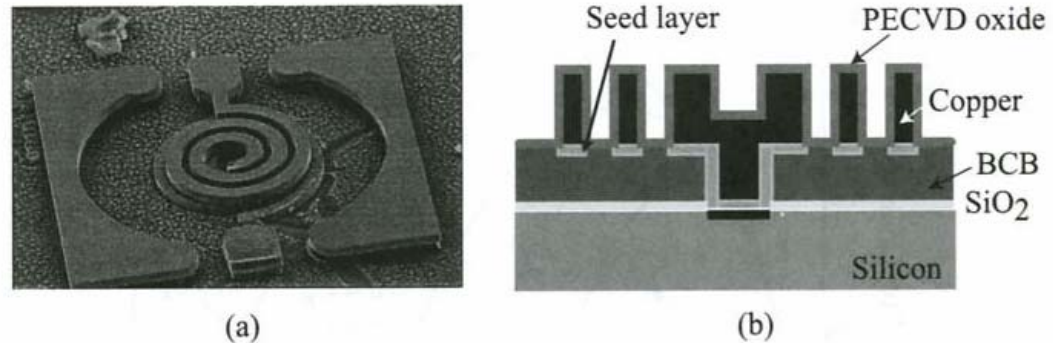
Figure 4.29 Change in Q of an inductor for (a) different metal thickness; (b) for substrates with different resistivity. Reproduced from M. Park, C.S. Kin, J.M. Park, H.K. Yu and K.S. Nam, 1997b, 'High Q microwave inductors in CMOS double metal technology and its substrate bias effects for 2 GHz RF IC application', in *Proceedings of IEDM 97*, IEEE, Washington, DC: 59–62, by permission of IEEE, © 1997 IEEE

Mikromaskinering ved **tykke metall-lag**

Tykt BCB-lag (Benzocyclobutene, lav ϵ dielektrikum, polymer) 10 μm tykt kobber-lag

Post CMOS, lav-temperatur prosessering

Det tykke kobberlaget er fordelaktig pga stor overflate paa kobber-induktoren sml med skin-depth



Q_{max} = 40

Figure 12.7. The electroplated copper MEMSCAP inductor (a), cross-sectional view (b), and the measured Q of a 1.5-nH inductor [12] (Copyright IEEE).

Effekter av substrat og dielektrikum

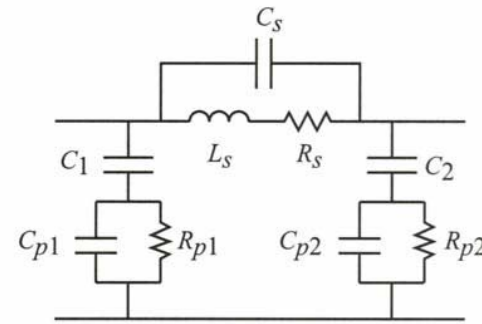
- Parasitt-kapasitans mellom induktor og jord-plan er et problem
 - Avhenger av type og tykkelse av dielektrikum
 - Avhenger av type og tykkelse av substrat
- **Etsing** av substratet
 - Reduksjon av parasitt kapasitans
 - Q øker
 - Skyver resonans-frekvensen til høyere frekvenser
 - Resonans oppstår pga. kapasitansen mellom substrat og vindingene i spolen
 - Øker frekvensområdet induktoren kan brukes i
 - Kan realisere høy L uten å få for lav f_{\max}

Parasitt-kapasitansen i substratet

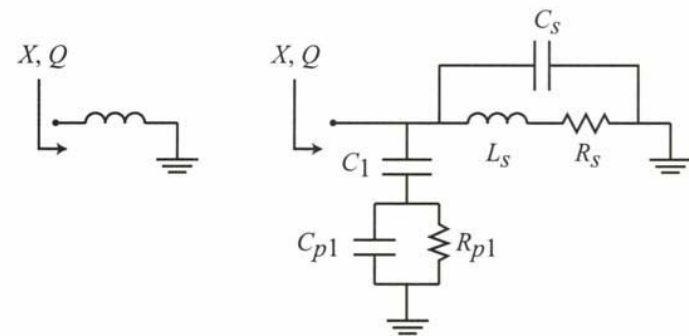
- Er den dominerende kapasitans (for medium til store induktorer), C_p
 - For veldig lav C_p , parasitt, må en ta med C_s i beregning av resonans-frekvensen

$$f_r \approx \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s(C_p + C_s)}} \quad (12.11)$$

- Reaktansen er prop med f , mens R_{serie} er prop med \sqrt{f}



(a)



(b)

Figure 12.1. (a) The equivalent LRC model of a planar inductor. (b) A short-circuited inductor model typically used in S -parameter and Q measurements. C_{p1} and C_{p2} are often assumed identical and equal to C_p .

Substrat-etsing

- Substrat-etsing har ingen effekt på Q ved lave frekvenser
 - R_s er da begrensende
- Se på effekten av ulike substratmaterialer →
 - Ulik resistivitet
 - Ulik kapasitans

Q-faktor for substrater med forskjellig resistivitet

”Eddy current”-effekter opptrer ved høye frekvenser

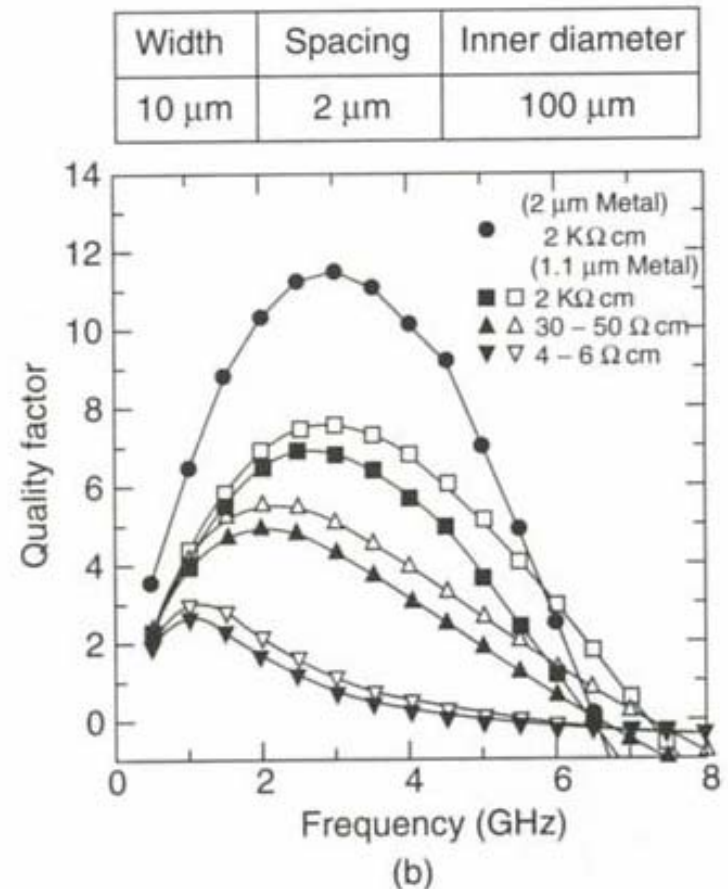


Figure 4.29 Change in Q of an inductor for (a) different metal thickness; (b) for substrates with different resistivity. Reproduced from M. Park, C.S. Kin, J.M. Park, H.K. Yu and K.S. Nam, 1997b, ‘High Q microwave inductors in CMOS double metal technology and its substrate bias effects for 2 GHz RF IC application’, in *Proceedings of IEDM 97*, IEEE, Washington, DC: 59–62, by permission of IEEE, © 1997 IEEE

**Substrat-
kapasitansens
effekt på Q og
reaktansen X**

Ved 1 – 4 GHz
begrenser serie-
resistansen

Viser at høyere Q samtidig betyr
en høyere selvresonans-frekvens

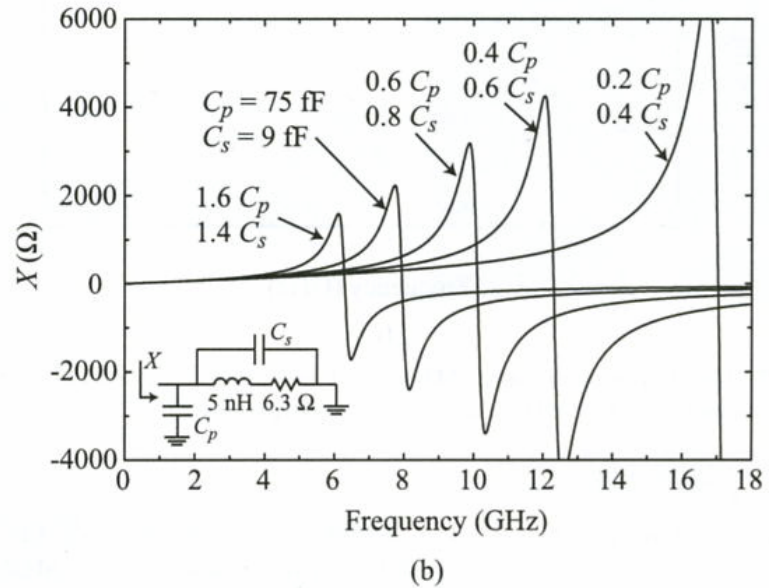
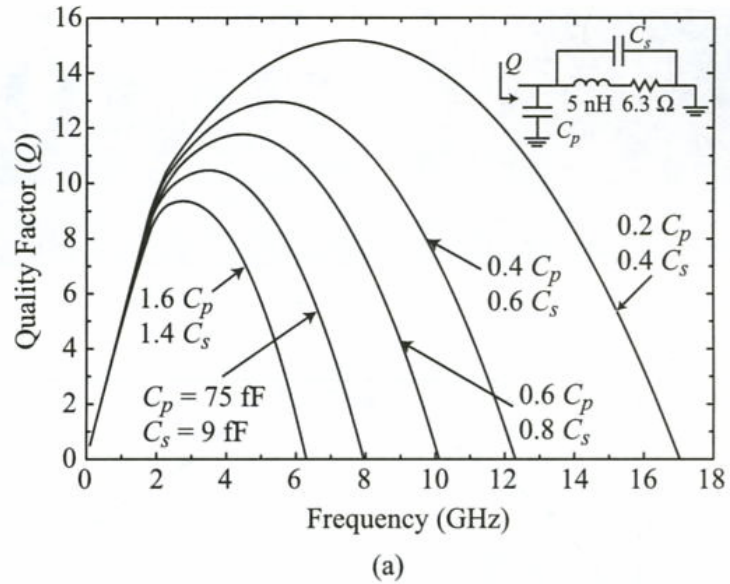
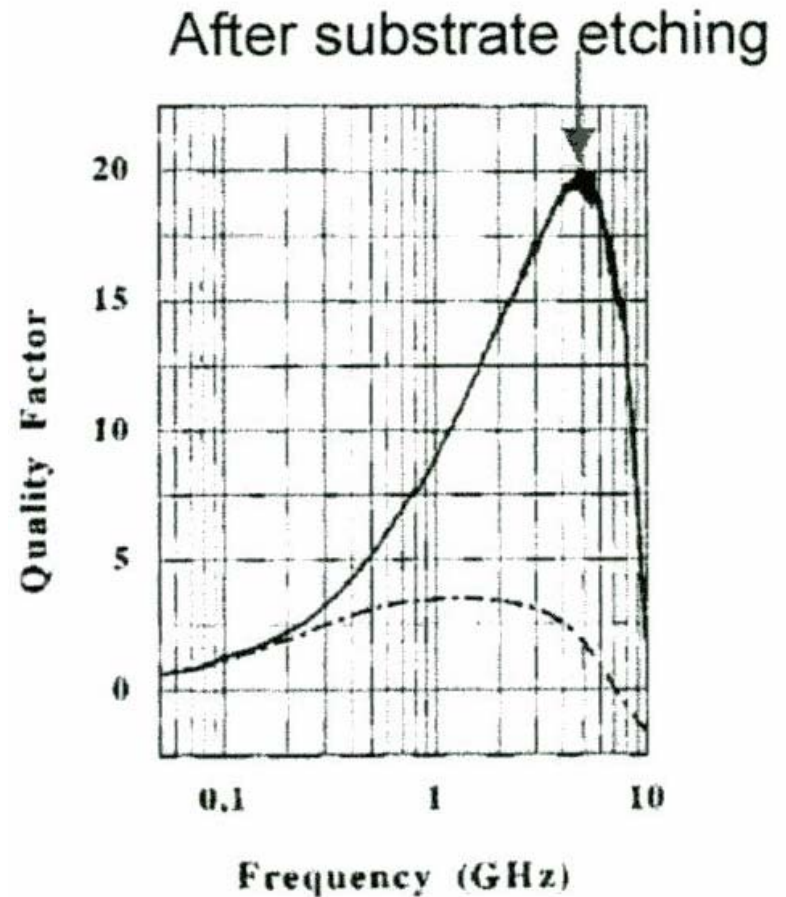


Figure 12.6. The effect of the substrate capacitance on the Q (a) and X (b) of a 5-nH inductor. The resistance is assumed constant up to 2 GHz and then increases as \sqrt{f} .

Eks.: Horisontalplan-induktans

- Forbedring av Q-faktor ved å etse substratet



Testsystem

- Eksempel-system for å teste ut virkningen av å ha spole på membran eller på Si

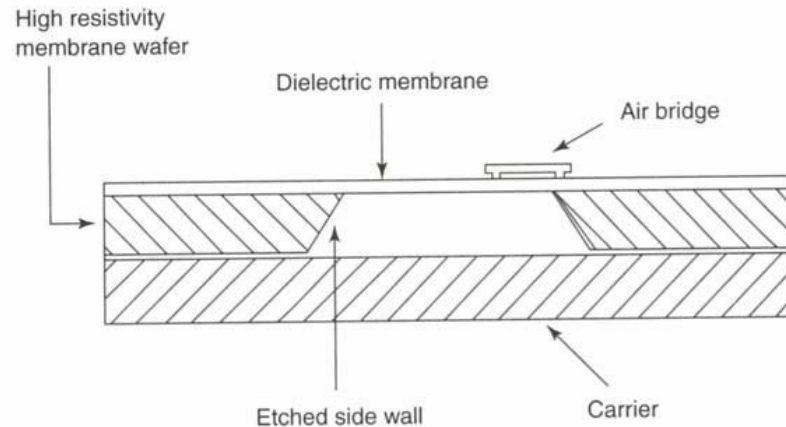
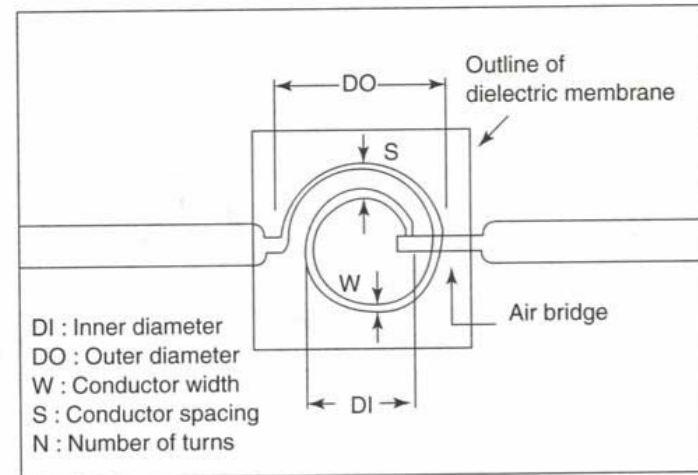


Figure 4.14 Schematic diagrams of the planar inductor and the membrane outline. Reproduced from C.-Y. Chi and G.M. Rebeiz, 1995, 'Planar microwave and millimeter wave lumped elements and coupled line filters using micromachining technique', *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* **43**(4): 730–738, by permission of IEEE, © 1995 IEEE

Oppnådd L på Si og membran

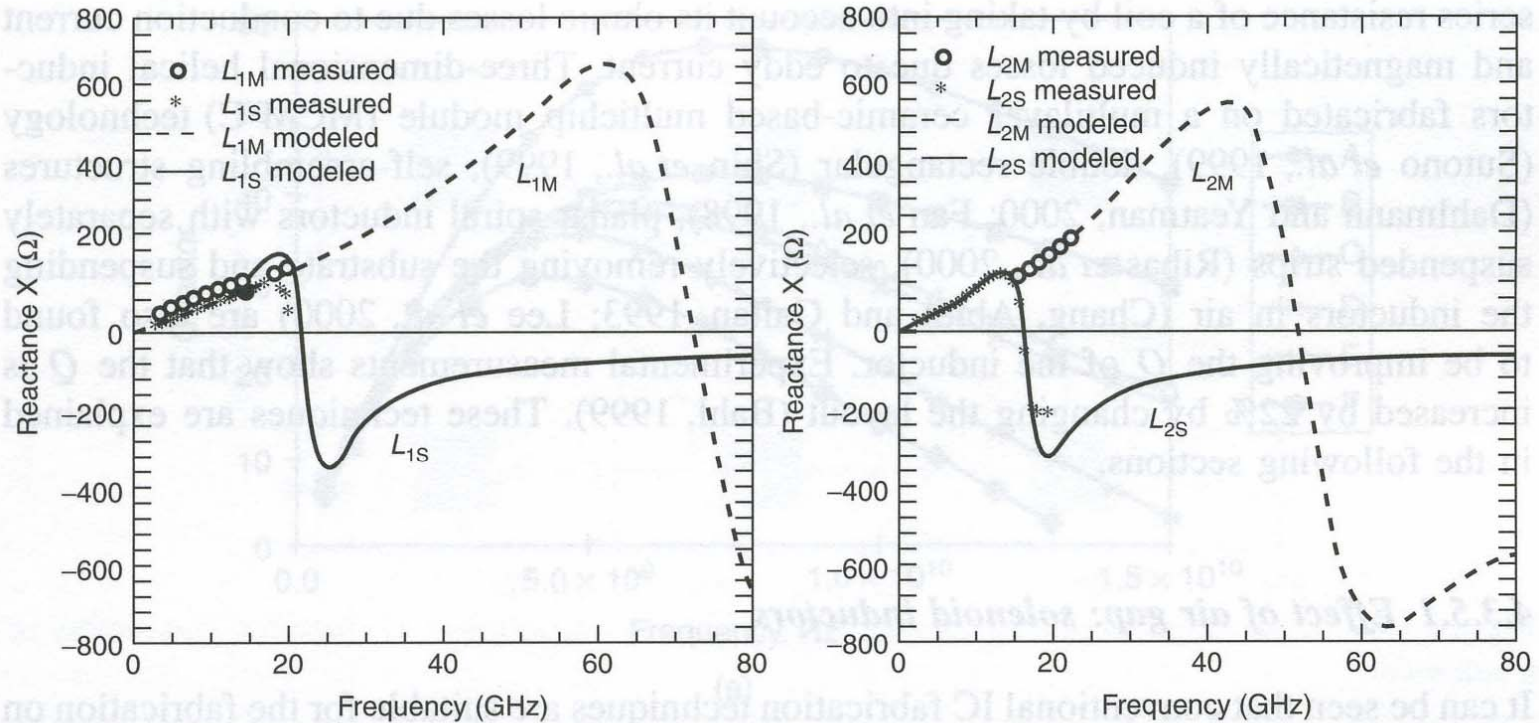


Figure 4.15 Measured and modeled reactance for inductors on silicon (L_{1S} , L_{2S}) and on membrane (L_{1M} , L_{2M}). Reproduced from R. Rodrigues, J.M. Dishman, F.D. Dickens and E.W. Whelan, 1980, 'Modeling of two-dimensional spiral inductors', *IEEE Transactions Components, Hybrids, Manufacturing Technology* **5**: 535–541, by permission of IEEE, © 1980 IEEE

Eks.: Q ved ulike etse-dybder

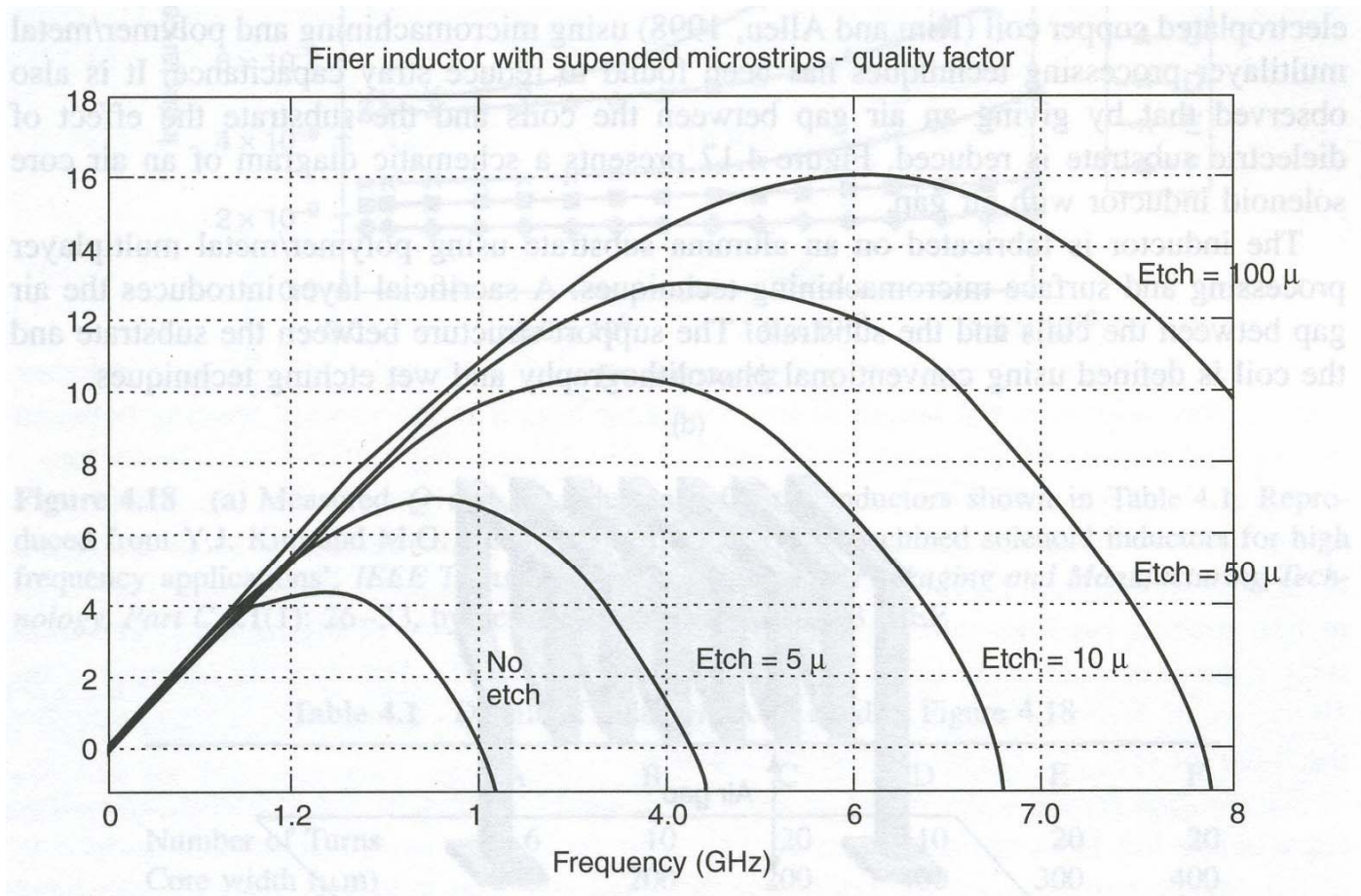
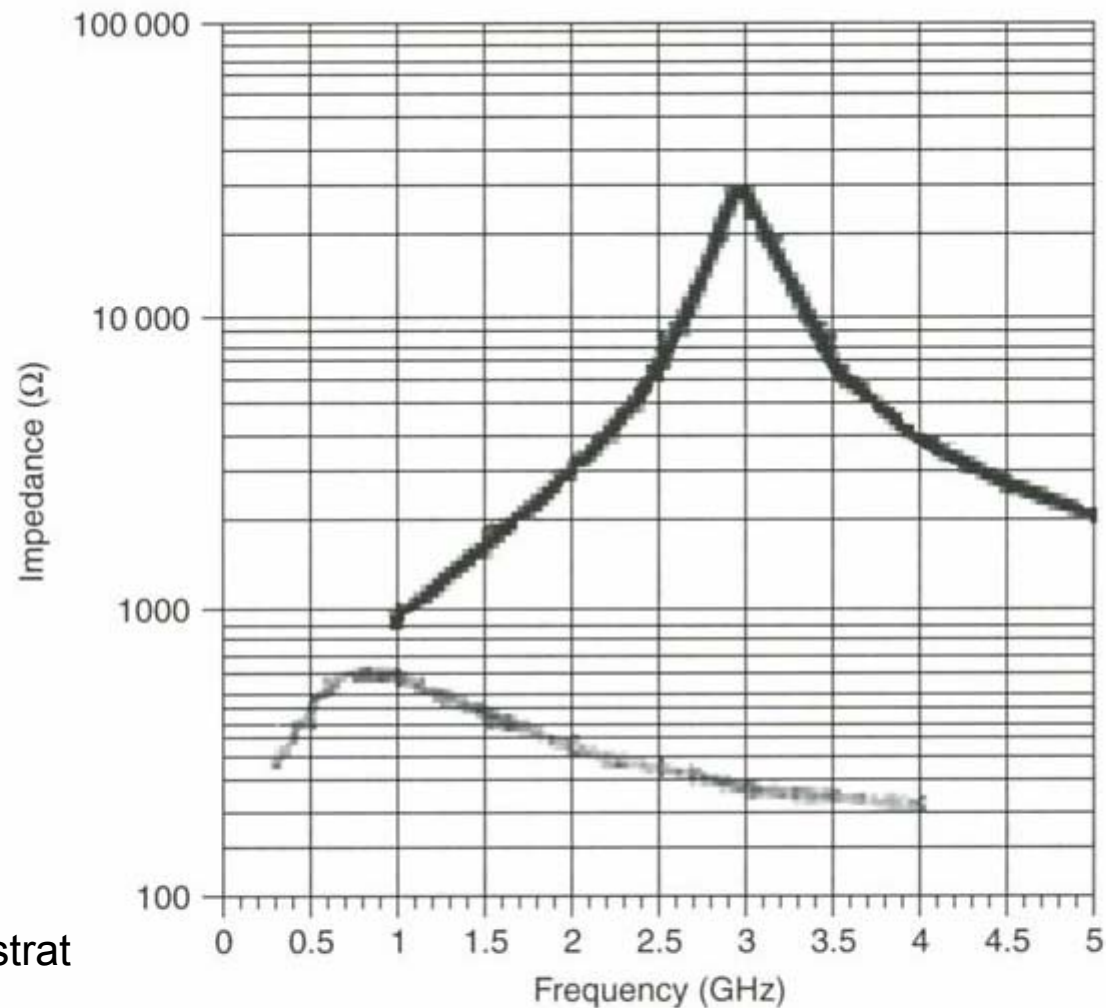


Figure 4.16 The change in Q for a suspended planar inductor for different etch depth. Reproduced from R.P. Ribas, N. Bennouri, J.M. Karam and B. Courtois, 1997, 'GaAs MEMS design using $0.2\mu\text{m}$ HEMT MMIC technology', in *Proceedings of the 19th Annual IEEE Gallium Arsenide Integrated Circuit Symposium*, IEEE, Piscataway, NJ, USA: 127–130, by permission of IEEE, © 1997 IEEE

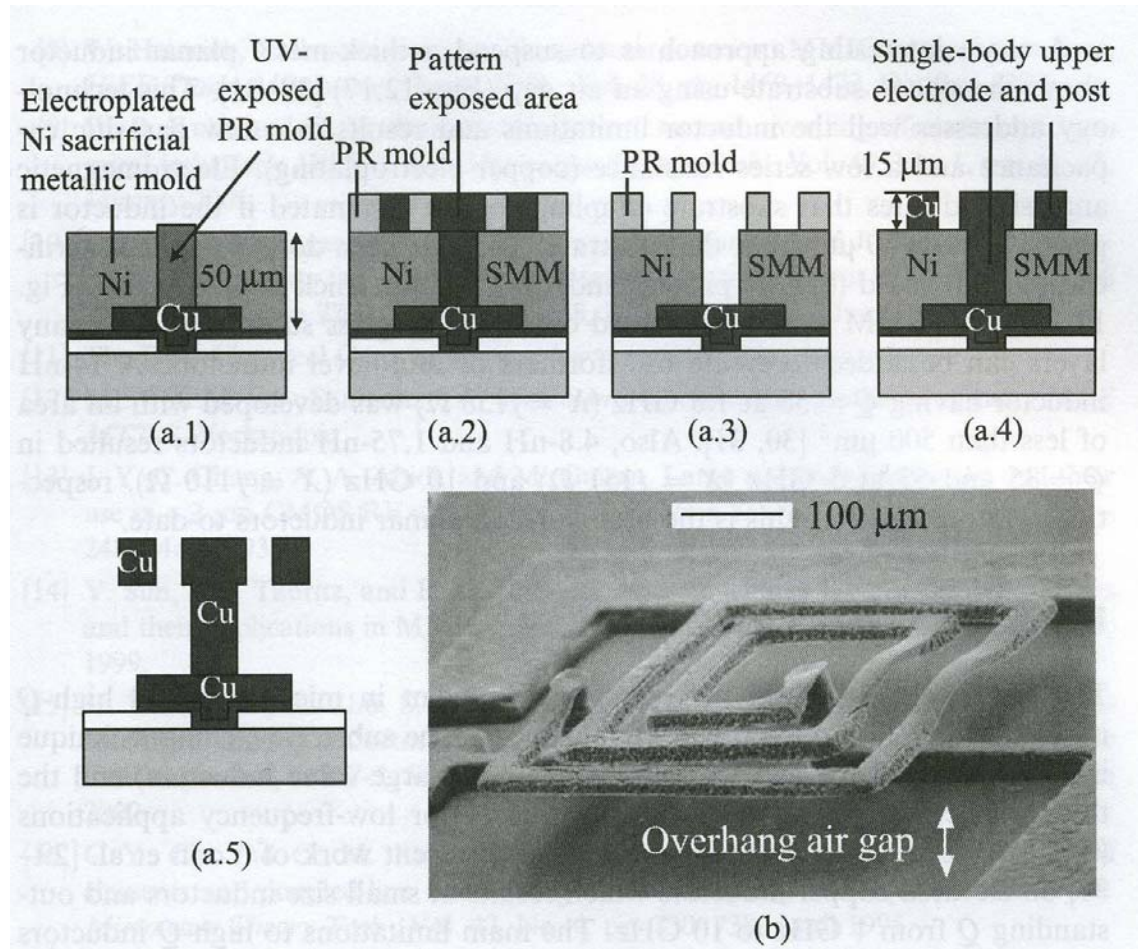


Med og uten
underliggende substrat

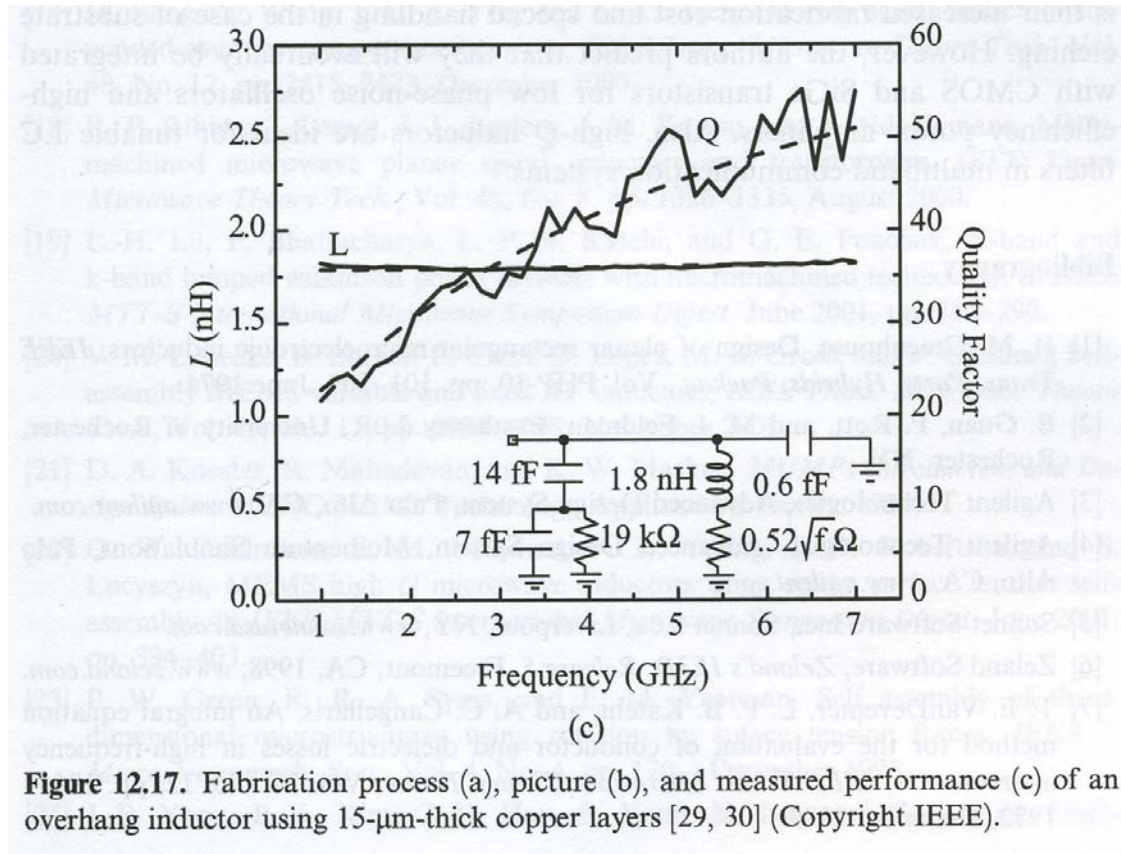
Figure 4.13 Simulated change in resonant frequency of 100 nH inductor with (gray) and without (black) underlying substrate. Reproduced from J.Y.-C. Chang, A.A. Abidi and M. Gaitan, 1993, 'Large suspended inductors on silicon and their use in a 2 mm CMOS RF amplifier', *IEEE Electron Device Letters* **14**(5): 246–248, by permission of IEEE, © 1993 IEEE

"Luftgap" - induktor

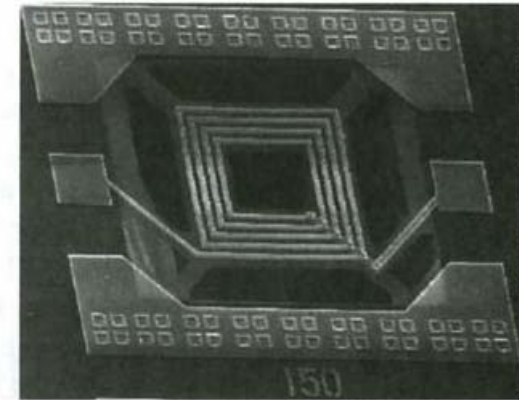
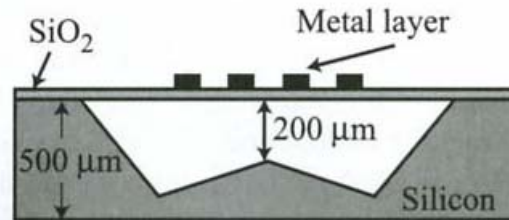
- **Tykk metall** planar induktor over substratet med et **luftgap**
 - Eliminering av substrat-kobling ved 30 μm elevasjon
 - Sacrificial metallic mold (SMM) prosess benyttet + 10-15 μm kobberlag



Ytelse til induktor over luftlag

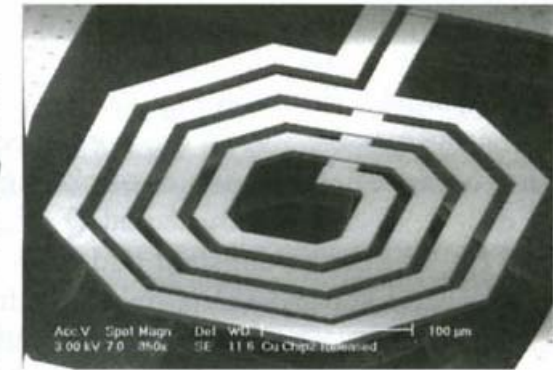
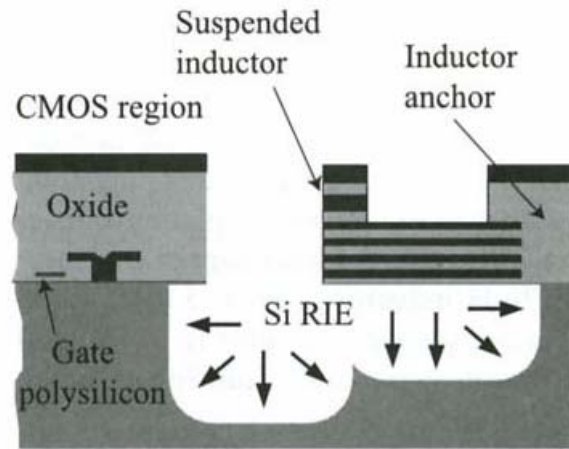


- Eks fra det første kjente arbeidet, fig 12.8 a: anisotrop etsing



(a)

- Fig 12.8 b: suspended inductor
 - Enkelt-ankret, følsom for mekaniske vibrasjoner
 - $Q = 17$ ved 8.6 GHz



(b)

Figure 12.8. Suspended inductors using front-etching techniques and compatible with CMOS processing: UCLA and Delft [13, 14] (a), Carnegie Mellon (b), effort [15] (Copyright IEEE).

Effekt av luft-gap for solenoider

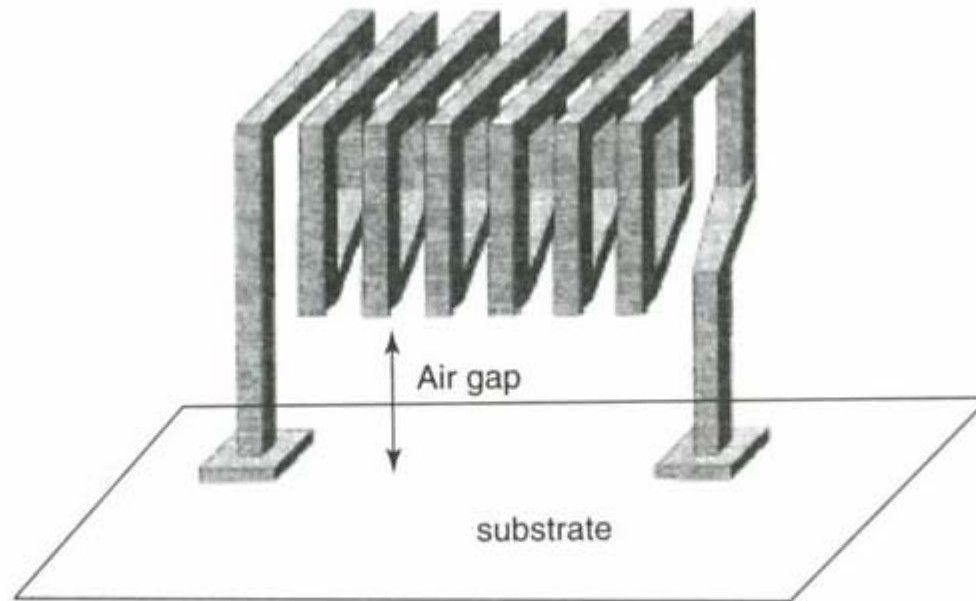


Figure 4.17 Schematic diagram of a solenoid inductor with an air gap. Reproduced from Y.J. Kim and M.G. Allen, 1998, 'Surface micromachined solenoid inductors for high frequency applications', *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part C* **21**(1): 26–33, by permission of IEEE, © 1998 IEEE

Effekt av luft-gap for spiral induktorer

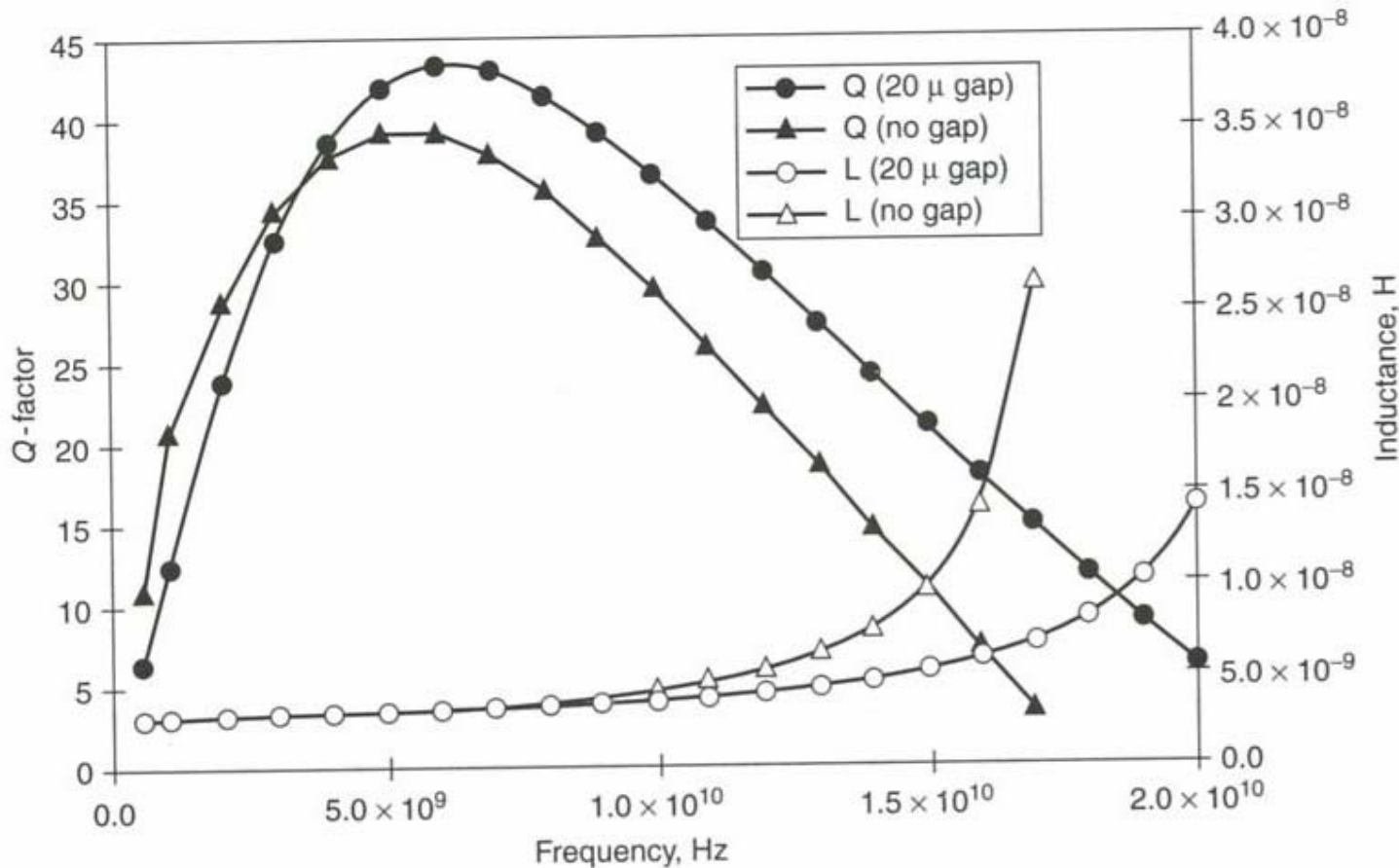


Figure 4.22 Effect of air gap on Q factor. Reproduced from Y.J. Kim and M.G. Allen, 1998, 'Surface micromachined solenoid inductors for high frequency applications', *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, Part C* **21**(1): 26–33, by permission of IEEE, © 1998 IEEE

Oppsummering: Hvordan øke ytelsen?

- Ha **tykke metall-lag** med god ledningsevne
 - For å redusere serie-motstand
- Benytte **substrat-etsing**
 - Substratets parasitt-kapasitans reduseres
- Benytte **3-D** strukturer
 - Ved vertikalplan-spoler kan L-verdien økes
- Bruk av **kjerne-materiale**

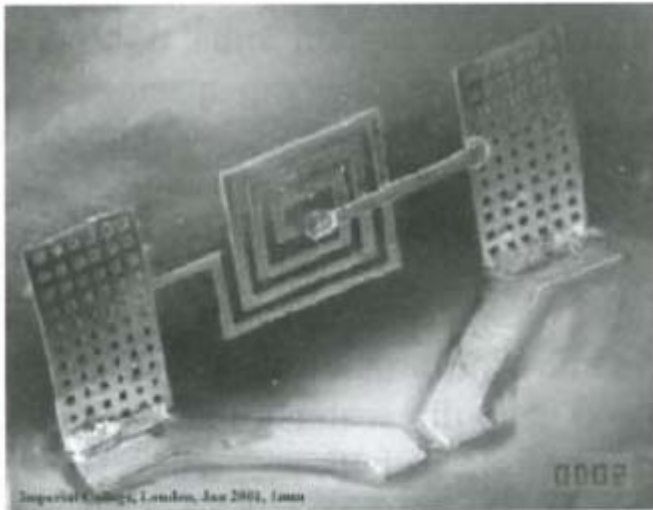
Sentrale teknologier for realisering

- Tykt metall **elektroplettering**
 - 0.2 – 6 GHz
- **Substratetsing**
 - 1 – 100 GHz
- Tre-dimensjonal **solenoid-type** (spole) induktorer
 - Høye L og Q-verdier
 - 0.2 – 6 GHz
- **”Self-assembly” (heving)** av induktorer
 - Få induktor **opp fra substratet** for å redusere parasitt-kapasitanser til substratet, 1 – 100 GHz

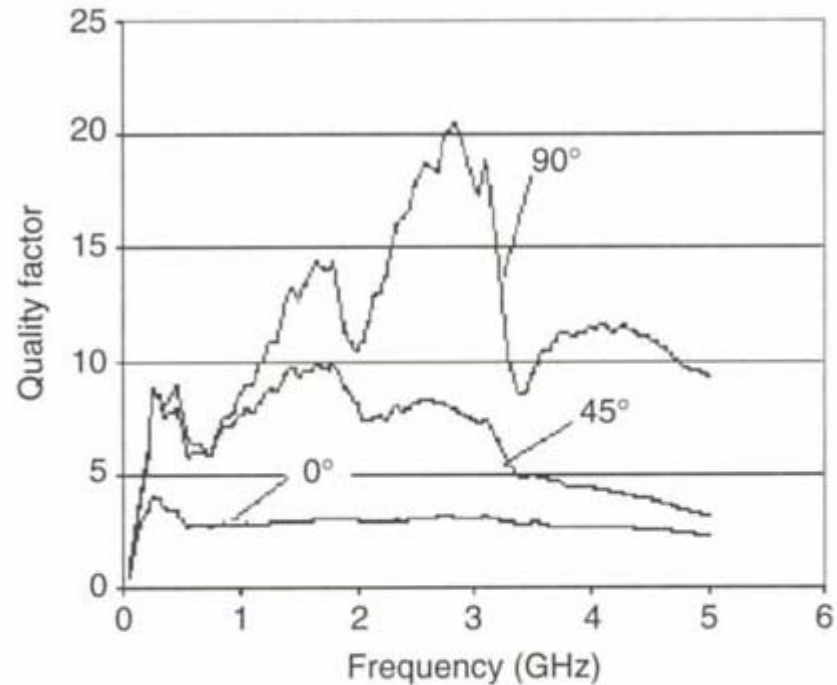
Dagens forelesning

- Hva er en induktor?
- Induktanser realisert som MEMS
- Modellering
- Ulike typer RF MEMS induktorer
 - **Horisontalplan** induktanser
 - Ekte **spoler** (solenoider)
- Hvordan øke ytelsen
 - Q-verdi, Induktans (L), Selvresonans-frekvens (f_{\max})
- **Eleverte induktanser**
- Induktor-banker

Foldede og eleverte induktanser



(a)



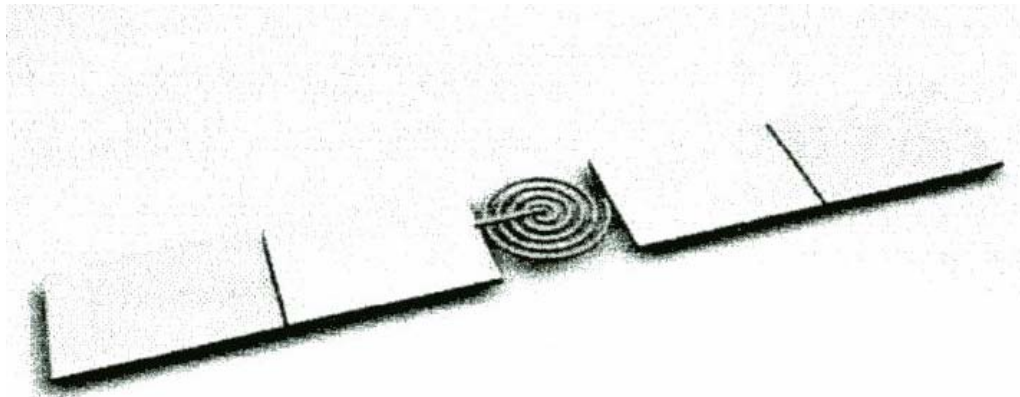
(b)

Figure 4.30 (a) Three-turn spiral folded inductor after self-assembly; and (b) change in Q against frequency for different angles between coil and substrate. All devices are $4\frac{1}{2}$ -turn meander inductors ($L = 2$ nH). Reproduced from G.W. Dahlmann and E.M. Yeatman, 2000, 'High Q microwave inductors on silicon by surface tension self-assembly', *Electronics Letters* **36**(20): 1707–1708, by permission of IEEE, © IEEE 2000

[Eric. Yeatman, Imperial College, London](#)

Induktans som løftes

- Induktans kan løftes ut av planet ved "scratch actuators"
 - L. Fan et al, MEMS 1998
 - Elevert 250 μm over Si substrat
 - Resonans ved 1.8 – 6.6 GHz etter at spolen er løftet



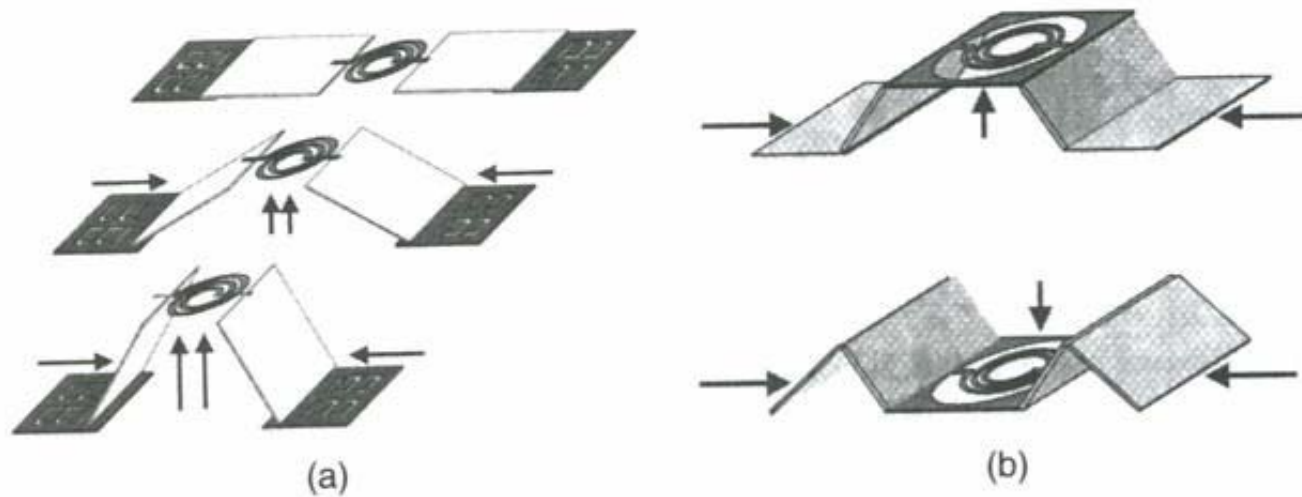


Figure 4.31 (a) Schematic diagram of the MESA micro-elevator by self-assembly structure; (b) the center platform can move upward or downward. Reproduced from L. Fan, R.T. Chen, A. Nepolsa and M.C. Wu, 1998, 'Universal MEMS platforms for passive RF components: suspended inductors and variable capacitors', in *Proceedings of 11th Annual International Workshop on MEMS '98*, IEEE, Washington, DC: 29–33, by permission of IEEE, © 1998 IEEE

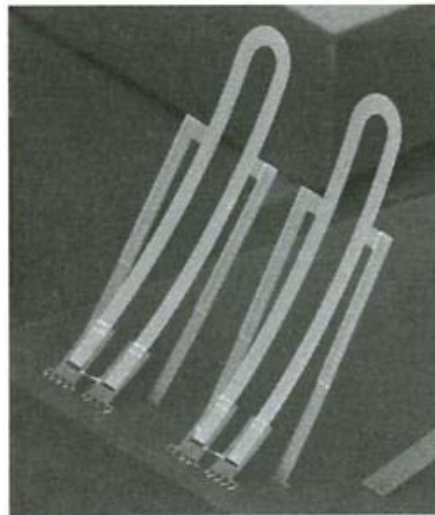
Mikromaskinering ved self-assembly

Heve induktoren over substratet for å redusere parasittkapasitansene

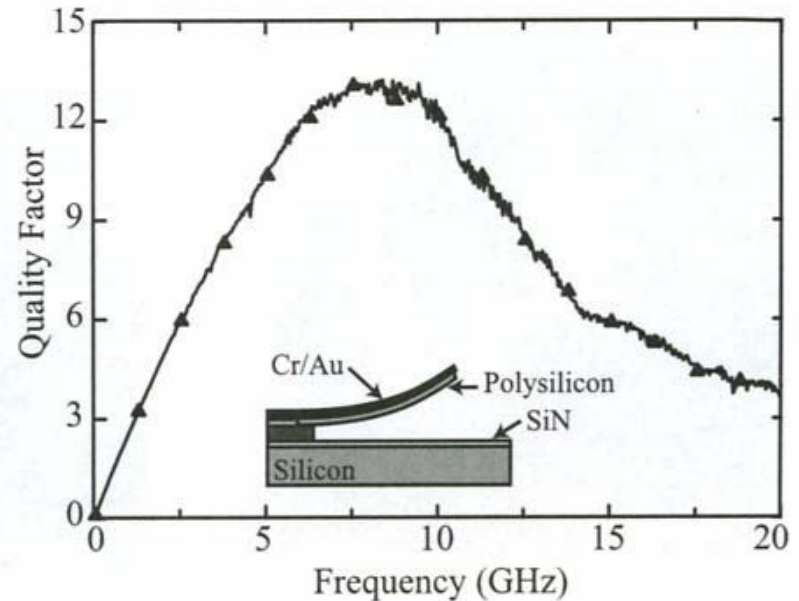
Cr-Au lag over poly-lag

Ulikt residuelt **stress** i materialene forårsaker at induktoren hever seg over substratet

Anker-konstruksjonen har en betydelig effekt og forårsaker parasittkapasitans



(a)



(b)

Figure 12.12. Picture (a) and measured Q (b) of a self-assembled 1.2-nH inductor [20] (Copyright IEEE).

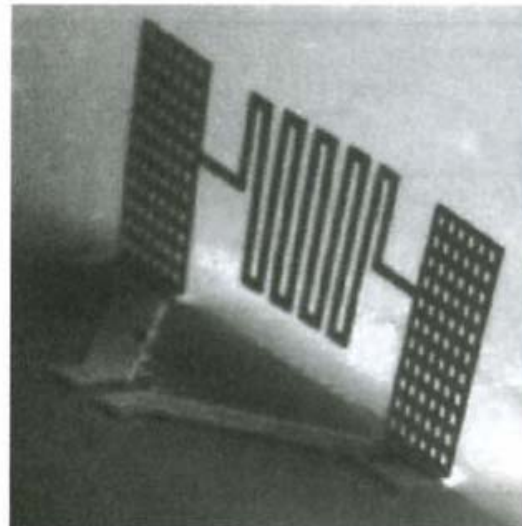
Spenninger i lodde-overflaten benyttes

Fotoresist som offerlag

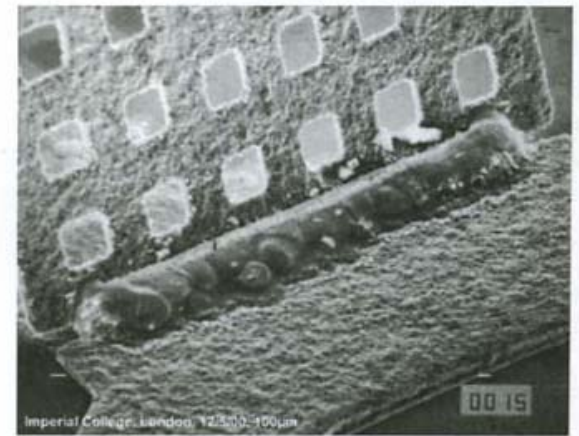
Kobberstruktur med lodde-padder mellom anker og en fritt bevegelig struktur

Oppvarming til 185°C \rightarrow lodde-paddene smelter og drar ved sine **overflate-spennings-krefter** strukturen til en vertikal posisjon

Avkjøling \rightarrow loddene stivner



(a)

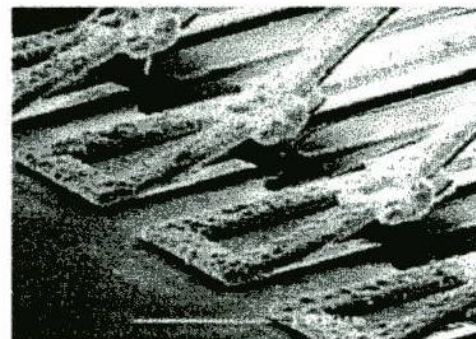
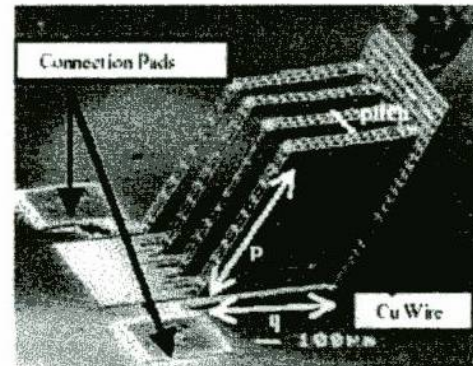
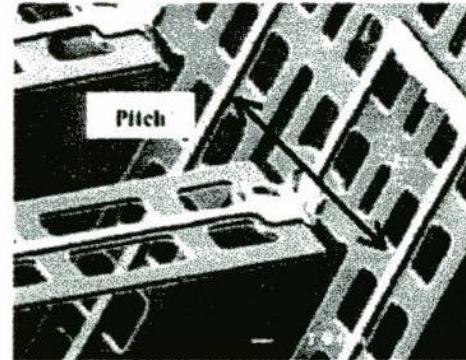


(b)

Figure 12.13. (a) Out-of-plane meander-type inductors after self-assembly, and (b) a blow-up of the solder hinges after heating [22, 23] (Copyright IEEE).

Struktur med hengsler

- Kobber-strukturen kan **manuelt** foldes opp og limes
- Typisk er "turns" med store dimensjoner $\sim 100 \mu\text{m}$
- M. Gel et al,
Transducers 2001



Dagens forelesning

- Hva er en induktor?
- Induktanser realisert som MEMS
- Modellering
- Ulike typer RF MEMS induktorer
 - **Horisontalplan** induktanser
 - Ekte **spoler** (solenoider)
- Hvordan øke ytelsen
 - Q-verdi, Induktans (L), Selvresonans-frekvens (f_{\max})
- Eleverte induktanser
- **Induktor-banker**

Programmerbare induktor banker

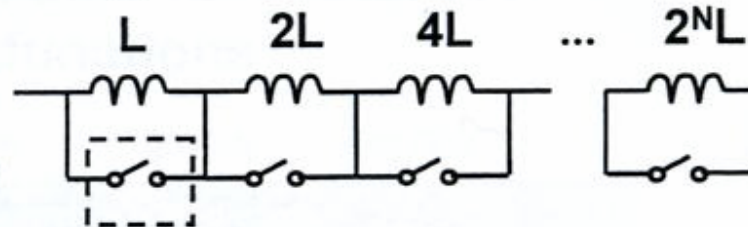
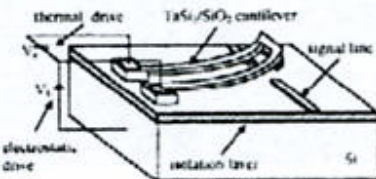
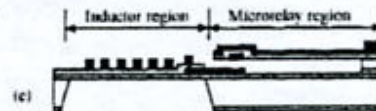
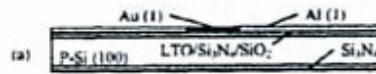


Micromachined digitized high-Q inductor banks

Design and process

(New jersey Institute of Technology)

- micro-relays made on $TaSi_2/SiO_2$ bimorph cantilever beam, gold-to-gold electrical contact, Al as sacrificial layer and thermal actuation
- gold inductors and pads



Contact switch (micro-relay)

Termisk aktivering!

Performance:

- $L = 2.5$ up to 162.4 nH
- $Q=3.3$ @ 1.6 GHz
- electro-thermal relays with $R_{on}=0.6-0.8\Omega$
- thermal power= 8 mW, $V=20$ V
- contacts fails after 10^6 cycles (!!)

$D_1 D_2 D_3 D_4$	L (nH)	$D_1 D_2 D_3 D_4$	L (nH)
0000	324.8	1000	162.4
0001	277.9	1001	105.7
0010	223.2	1010	67.4
0011	185.0	1011	45.9
0100	166.9	1100	60.5
0101	127.3	1101	31.5
0110	103.8	1110	16.2
0111	83.1	1111	2.5

S. Zhou, X.-Q. Sun, W.N. Carr, TRANSDUCERS '97, Vol. 2, June 1997, pp. 1137-1140.

Hvordan ulike designparametre påvirker ytelsen

- Q_{\max} og f_{rez} avtar når areal og antall turns øker

Integrated inductor performance versus design space

After Varadan et al. [3]

		Q_{\max}	L	f_{rez}
Conductor thickness	↗	↗	-	-
Sheet resistance	↗	↘	-	-
Insulator thickness	↗	↗	-	↗
Substrate resistivity	↗	↘ ↗	-	↗
Area	↗	↘	↗	↘
Number of turns	↗	↘	↗	↘
Track width	↗	↗	↘	↘
Multilayer inductor (extra layer)	↗	↘	↗	↘

(Dobbelpil: mindre påvirkning)