

INF5490 RF MEMS

L1: Introduksjon. MEMS i RF

Denne forelesning

- Bakgrunn
- Motivasjon
- Opplegg for emnet INF5490
- Introduksjon til temaet
 - MEMS generelt
 - RF-systemer
 - MEMS i RF-systemer
- Perspektiv

INF5490 RF MEMS

- Nytt emne V05
 - Prototyp-versjon
 - ca 15 kandidater
- **MEMS** (Mikro Elektro Mekaniske Systemer) er en forholdsvis ny aktivitet ved MES (gruppen for Mikroelektronikksystemer)
- Nasjonal satsing på mikroteknologi (NFR)
 - MiNaLab i nabobygg
 - SINTEF lab
 - UiO lab

Hvorfor MEMS ved MES

- Ser det som en ny mulighet til å realisere **integreerte systemer**
 - Kan ta i bruk også mikro**mekaniske** komponenter
 - Elektroniske systemer med MEMS gir en ny **frihetsgrad** for designeren
 - Interaksjon mellom MEMS og mikroelektronikk
 - MEMS trenger typisk et **rammeverk** i form av elektronikk for å bli virkelig interessant!
- Egnert **kompetanse** ved MES
 - Kompetanse innen modellering, analyse og implementasjon av VLSI fra transistor til komplekse systemer

Personlig kompetanse

- Fysikk → modellering og design av VLSI → system design → arkitektur
- Utvidelse av kompetansefelt ved sabbatsår: MiNaLab 03/04
- Studier av bøker og artikler
- Seminarer
 - RF MEMS-seminar by M.A. Ionescu, EPFL, ved KTH H04
 - Arr: FSRM, Swiss Foundation for Research in Microtechnology
 - RF MEMS tutorial: G.M. Rebeiz, UCSD, i Tønsberg H05
 - Arr: IMAPS Nordic Conference
- Bruk av CoventorWare
- Veiledning av studenter i relevante oppgaver

Hvorfor MEMS mot RF?

- MEMS er et bredt felt
 - Spesialisering var nødvendig → RF MEMS!
- ***”RF MEMS refers to the design and fabrication of dedicated MEMS for RF (integrated) circuits”***
 - 1a) Komponentene **opererer** mikromekanisk
og/eller
 - 1b) Komponentene **fabrikeres** ved mikromaskinering
 - 2) Komponentene benyttes i **RF systemer**

Noen argumenter for en aktivitet innen RF MEMS ved MES

- Nær sammenheng med kretsteknikk
- Utfordrende, spennende!
- Lovende felt
- Økende antall anvendelser av MEMS innen RF
 - **Aktuelt tema!**
- Stort marked: trådløs kommunikasjon
 - Telekom
 - Mobilbransjen
 - Distribuert intelligens (observasjon, aktivering)
 - Miljøovervåkning
 - ("Ambient Intelligence")
- Emnet passer inn i MES-utdanningen

Typiske RF MEMS komponenter

- Svitsjer
- Faseskiftere
- Resonatorer
- Mikromekaniske filtre
- Variable kapasitanser
- Induktorer

- **Dagens RF systemer trenger off-chip komponenter for å oppnå ønskede egenskaper**
 - Matche-nettverk, filtre, oscillatorer for miksing etc.

Bruk av RF MEMS

- A) **Erstatning** for diskrete passive komponenter
- B) **Ny** integrert funksjonalitet
 - → Rekonfigurerbare RF ICs (bruk av svitsjer)
 - nye system-arkitekturer

Fordeler gitt av RF MEMS

- Krets og system **miniaturisering**
 - Integrasjon med IC eller ved pakking -> systemintegrasjon
 - Batch prosessering -> lavere kostnader
- Lavere **effektforbruk**
- Høy **ytelse**
 - Gir gode komponent-parametre, f.eks.
 - Økt selektivitet
 - Høyere Q-faktor
 - Redusert tap
 - Bedret isolasjon
 - Lav forvrengning
 - Økt båndbredde

Eks.: mikrobølge svitsj

- En tidlig anvendelse av RF MEMS
 - Elektrostatisk styring
 - Høy linearitet
 - Lav DC "standby power"
 - Lav "insertion loss"
 - Ulemper
 - Lav hastighet
 - Pålitelighet i mekaniske kontakter

Noen utfordringer for RF MEMS

- Aktiveringshastighet bør økes
- Oppnåelig RF frekvens bør heves
 - filtre
- Pålitelighet
- Pakking
 - vakuum, moduler av ulik teknologi
 - SoP – System-on-Package
- Integrasjon
 - SoC – System-on-Chip

Opplegg for emnet INF5490

- Ukentlige **forelesninger**
 - Torsdager 10.15 – 12 i 3A
 - Unntak 23/2 + helligdager
- **Fellesgruppe** enkelte uker
 - Tirsdager 9.15 – 10 i 3A
 - Første gang 31/1
 - Presentere opplegg og tema for obliger
 - Gjennomgang av støttestoff
 - Øvingsoppgaver
 - Praktiske aspekter ved emnet
 - Spørsmål, diskusjon

Tematisk inndeling av emnet

- Tverrfaglig felt (emne)
 - MEMS: fremstilling og virkemåte
 - Modellering, design og analyse
 - Utfordringer ved RF kretsdesign
- RF MEMS kretselementer
- prinsipper, modeller og eksempler
 - Svitsjer, faseskiftere, resonatorer, filtre, passive kapasitanser (C) og spoler (L)
- Pakking, systemdesign

Forelesningsplan V06

- **Dato Tema**
- 26.01.2006 Introduksjon. MEMS i RF
- 02.02.2006 MEMS: fremstilling og virkemåte
- 09.02.2006 Modellering, design og analyse
- 16.02.2006 Utfordringer ved RF kretsdesign
- 23.02.2006 Ingen forelesning
- 02.03.2006 RF MEMS svitsjer I
- 09.03.2006 RF MEMS svitsjer II
- 16.03.2006 RF MEMS faseskifttere. Resonatorer I
- 23.03.2006 RF MEMS resonatorer II
- 30.03.2006 RF MEMS resonatorer III
- 06.04.2006 RF MEMS filtre
- 13.04.2006 Ingen forelesning, påske
- 20.04.2006 RF MEMS kapasitanser
- 27.04.2006 RF MEMS induktanser
- 04.05.2006 Integrasjon og pakking
- 11.05.2006 Trådløse systemer med RF MEMS
- 18.05.2006 Oppsummering, repetisjon I
- 25.05.2006 Ingen forelesning, Kr. himmelfartsdag
- 01.06.2006 Oppsummering, repetisjon II

Obliger

- Oblig'er med vekt på mikromekaniske svingekretser (resonator, filter)
- **2 obliger** skal leveres og godkjennes
 - Simuleringer med CoventorWare
 - 3-dim modellering, FEM-analyse
 - Levering av 2 rapporter innen frister
 - Samarbeid i grupper av 2 studenter
- 3 timers avsluttende eksamen
 - muntlig (evnt. skriftlig, - avhengig av antall kandidater)

Litteratur

- Ingen enkelt lærebok er spesielt velegnet
 - → Mye av pensum som foiler (ca. 1000)
- Pensumbok
 - Vijay K. Varadan, K.J. Vinoy, K.A. Jose, "**RF MEMS and their applications**". John Wiley, 2003. ISBN 0-470-84308-X
- Forelesningsfoiler
 - Legges ut før aktuell forelesning
- Annen litteratur?
 - Lagt ut på emne-siden i web
- *Tekniske betegnelser: ~ engelsk/norsk*

Praktisk

- Kontaktinfo emneansvarlig
 - Oddvar Søråsen, rom 3411, tlf.: 22 85 24 56
 - oddvar@ifi.uio.no
- Kontaktperson CoventorWare
 - Vidar Øverås, vidarso@ifi.uio.no
- web-sider
 - <http://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF5490/v06/>

Introduksjon til temaet

- 2 bestanddeler: RF og MEMS
- RF – Radio frequency
 - Høye frekvenser MHz, GHz
 - Typisk i trådløs overføring
 - Det er mange særtrekk og karakteristiske egenskaper ved høyfrekvens design
 - Noe tas opp i INF5490
 - Eget kurs (Tor Fjeldly)
 - INF5480 RF-kretser, teori og design

Teknologien er: MEMS

- MEMS – Micro Electro Mechanical Systems (mikrosystemer, MST etc.)
 - Vokste ut av IC fabrikasjons-prosesser (Si)
 - I dag finnes en rekke ulike fremstillingsprosesser
 - **Mikromaskinering er sentralt!**
 - MEMS er en lovende teknologi også for RF
 - Eget kurs ved Fys inst. i høstsemesteret (Liv Furuberg)
 - FYS4230 Mikro- og nanosystem modellering og design

Litt om MEMS, generelt

- Aktuatorer og sensorer kan realiseres
 - **Aktuator:**
 - Bevegelig struktur kontrollert ved elektrisk mikrokrets
 - Eks. mikromotor
 - Gir lite energi, nok for RF
 - **Sensor:**
 - kan "føle"/påvirkes av omgivelsene
 - de tidligste anvendelser, mange ulike eksempler

Aktiveringsmekanismer

- MEMS strukturer er bevegelige **horisontalt** eller **vertikalt**
- Aktiveringsmekanismer (mer i senere forelesning)
 - **Elektrostatisk**
 - Kapasitans-strukturer
 - **Termisk**
 - **Magnetisk**
 - **Piezoelektrisk**
 - Trykk eller tøyning produserer et elektrisk felt, - og motsatt!

Andre prinsipper

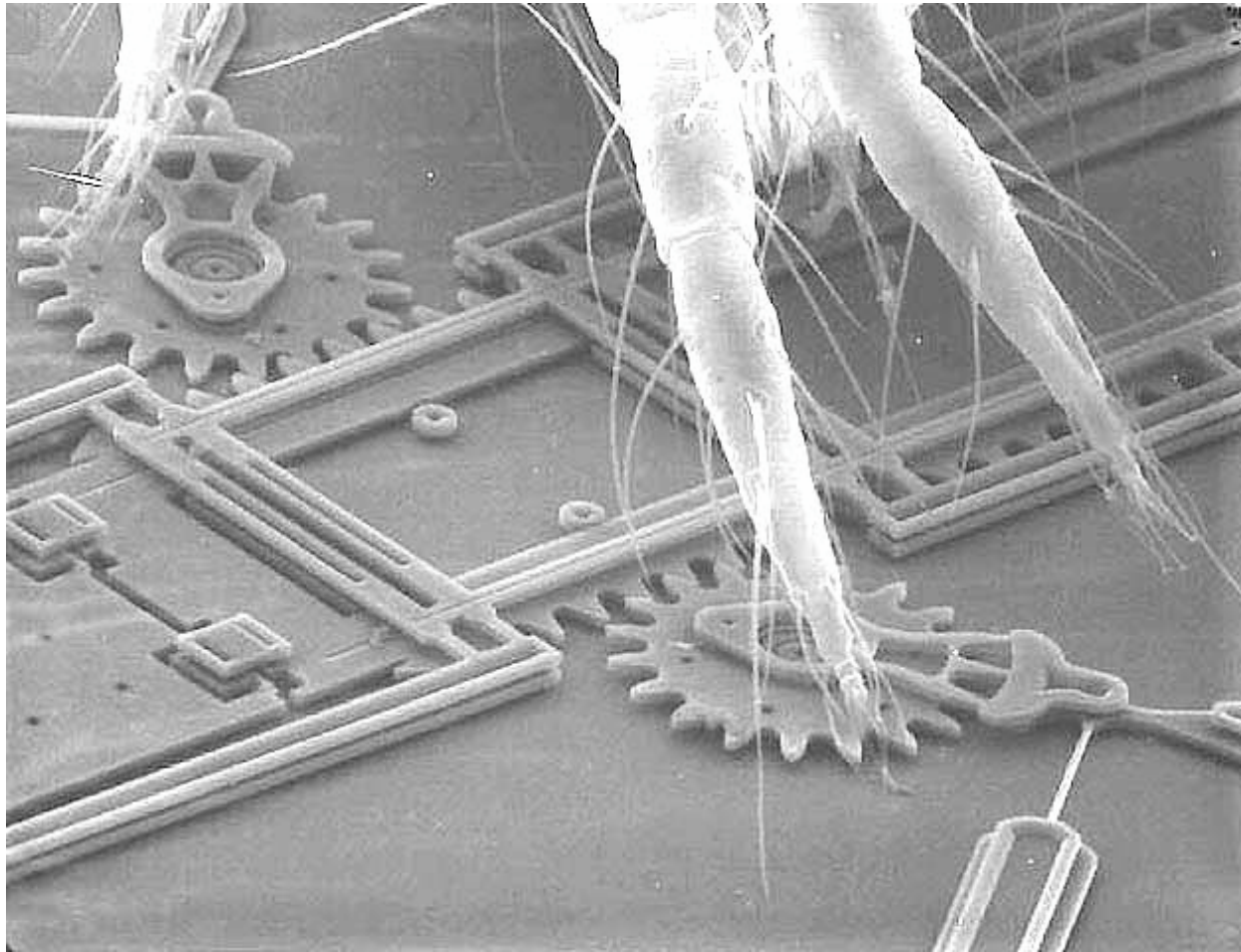
- Finnes også moduler basert på akustiske prinsipper (SAW, BAW)
 - Surface Acoustic Wave
 - Bulk Acoustic Wave
- INF5490 legger vekt på **ekte vibrerende strukturer**

Noen eksempler på MEMS

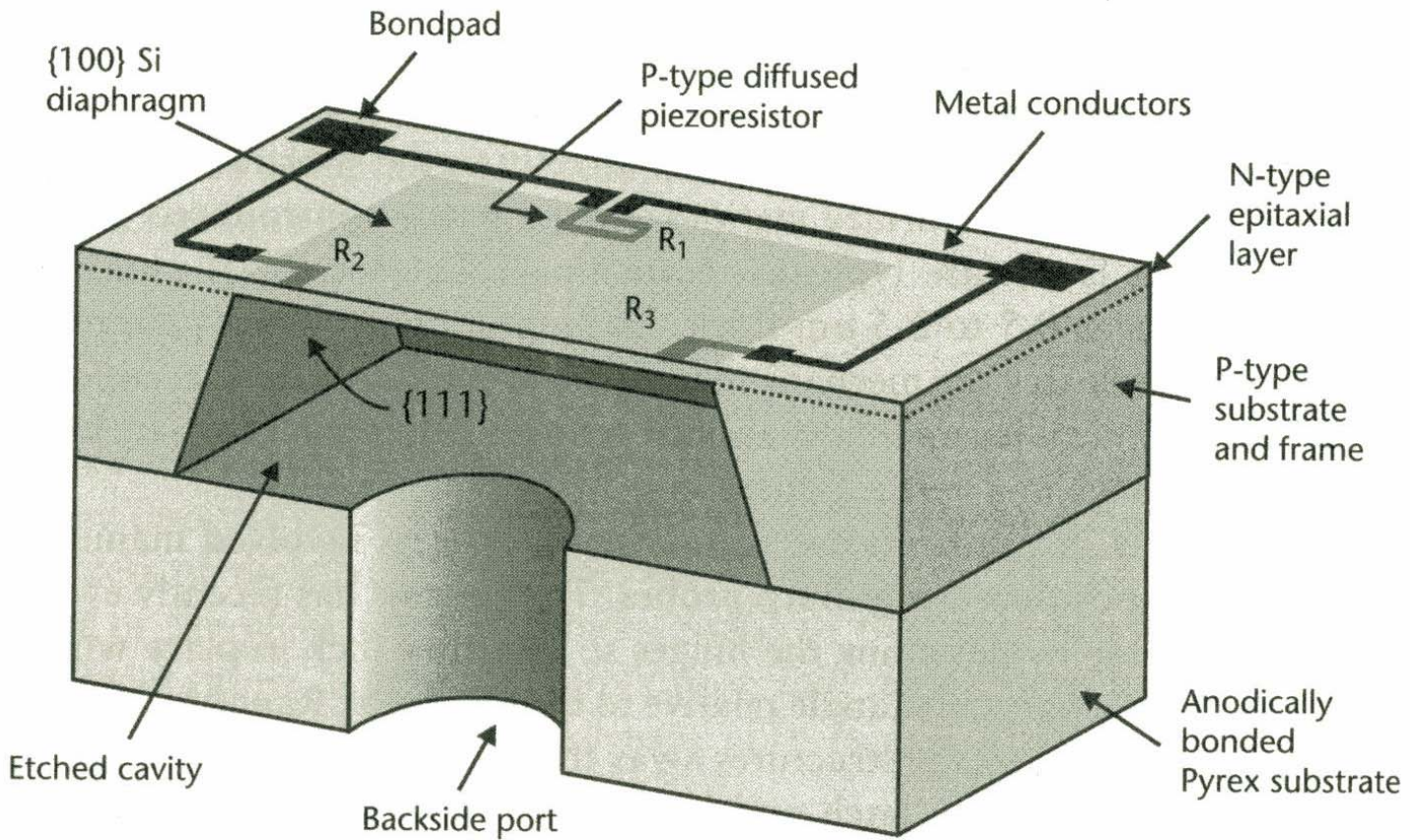
- Mikroaksellerometer
 - Airbag-utløser (SensoNor)
- Trykkfølere
- Blekkskriver-hoder
- Mikrospeil for projektor

- Generelle anvendelser innen
 - Mikrofluidikk
 - Biomedisin
 - Kjemisk analyse
 - Trådløs kommunikasjon
 - Optikk

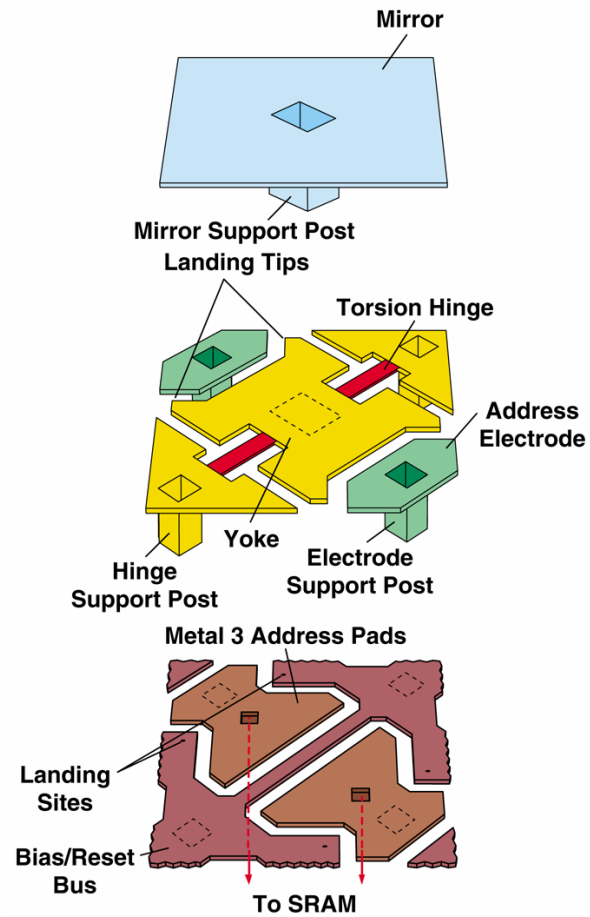
Mikromotor fra Sandia



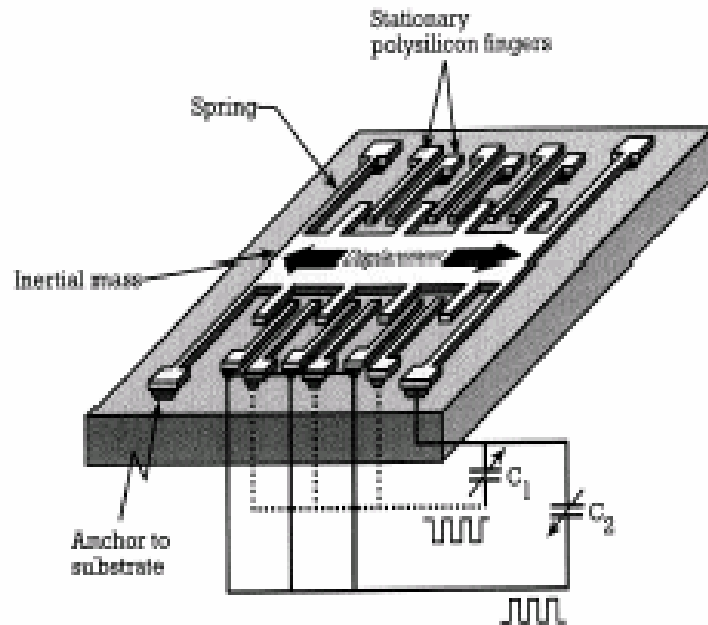
Trykksensor



Mikrospeil

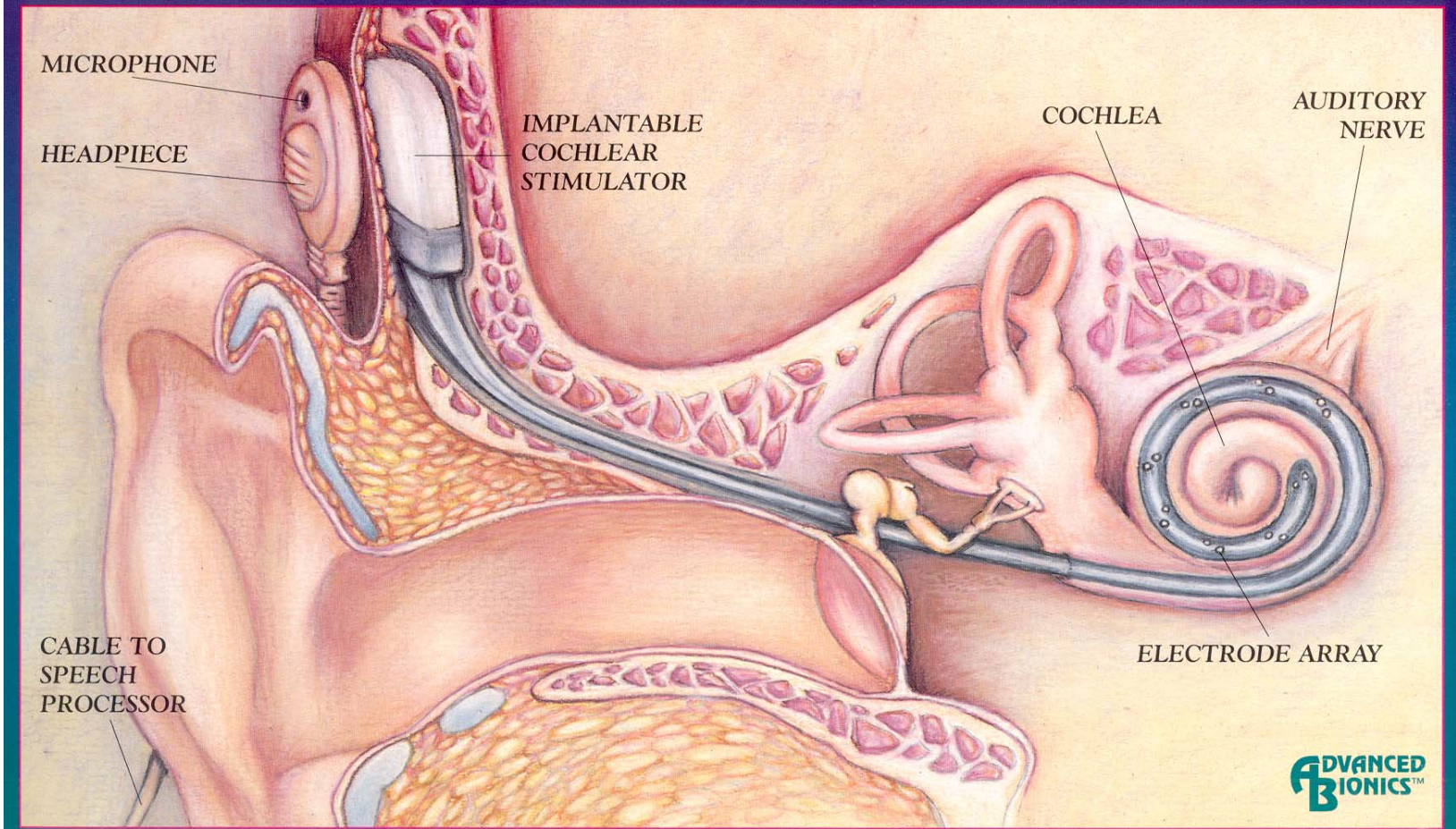


A Capacitive Accelerometer



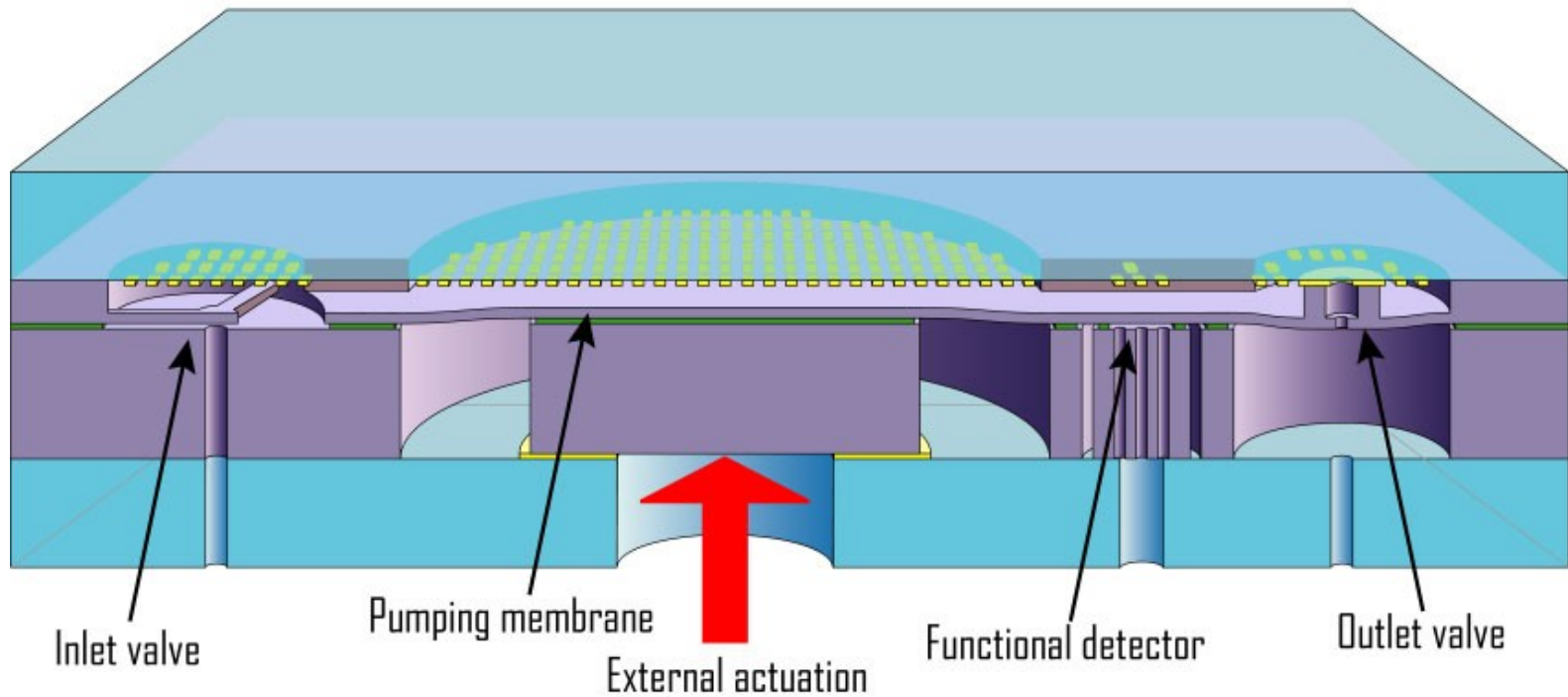
Coclea implantat

CLARION[®] Multi-Strategy[™] Cochlear Implant

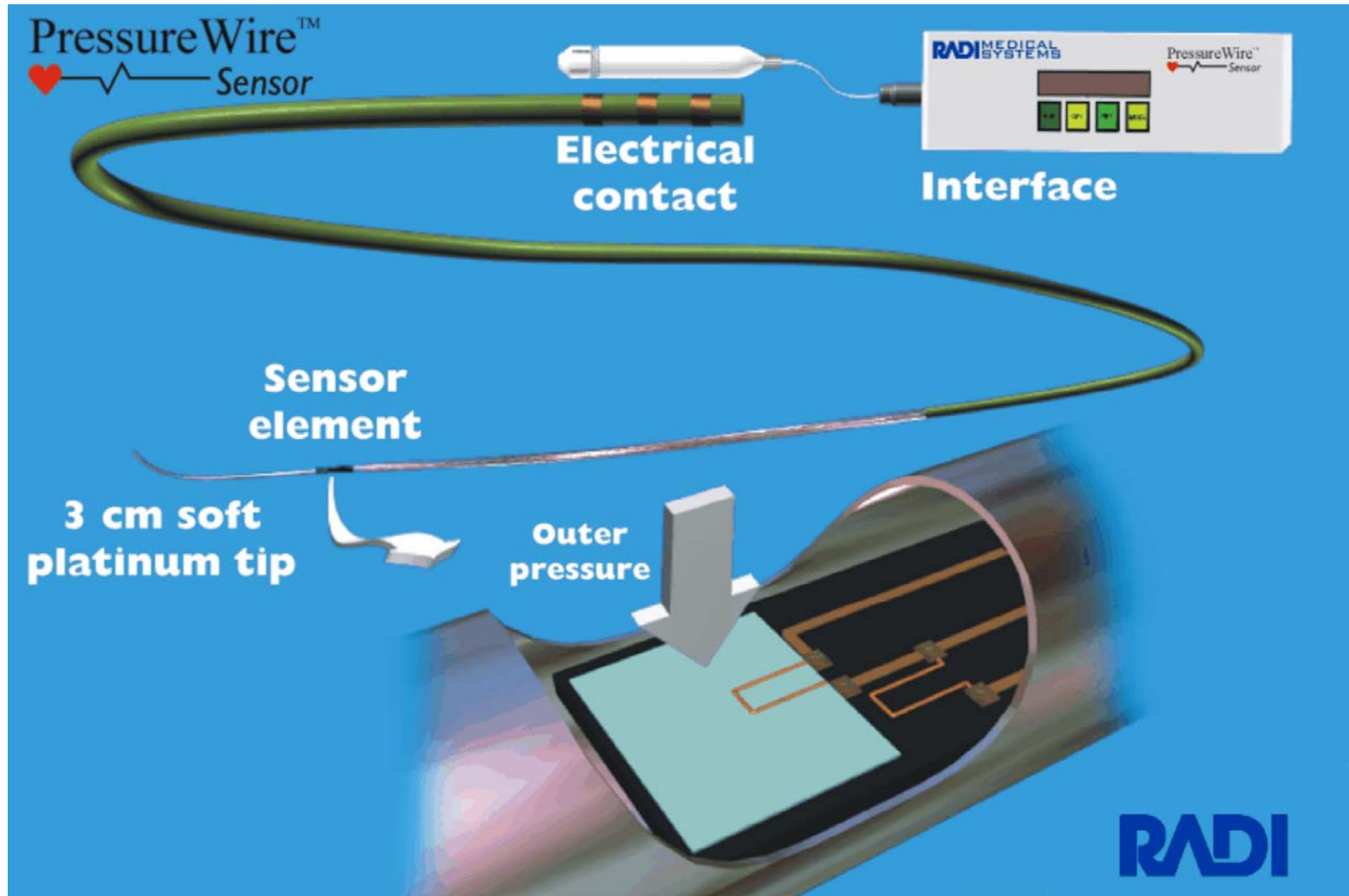


Technology Analysis: Drug Delivery

Debiotech Chip



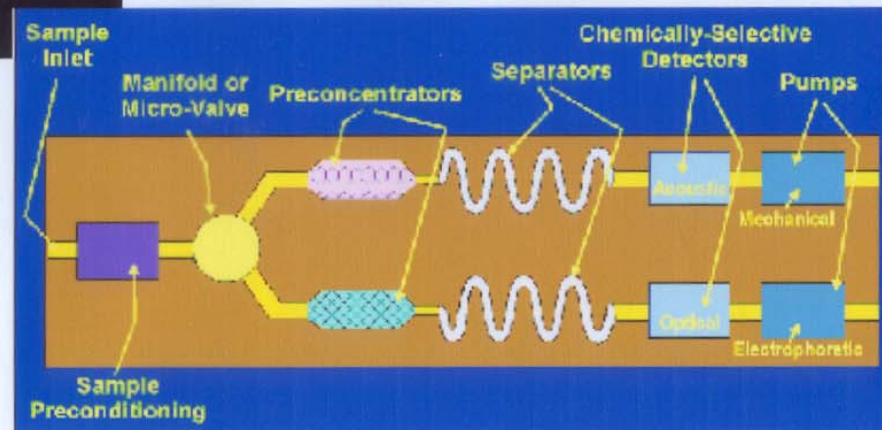
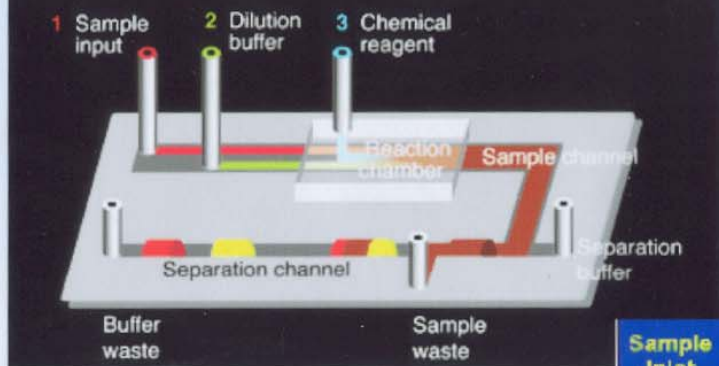
Radi Catheter



Biotechnology MEMS

“Lab-on-a-Chip”

Lab-on-a-chip concept for capillary electrophoresis



iSTAT

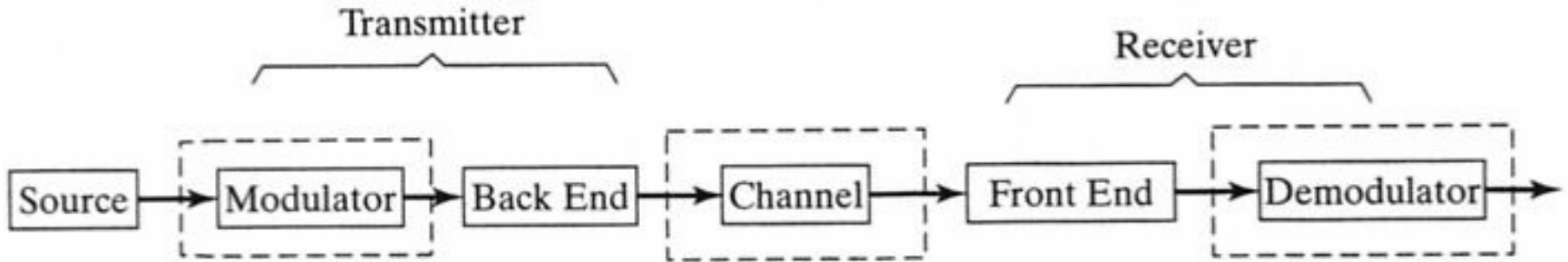


- blood analysis
glucose, urea, pH, blood gases,
- portable POC device
- analyser + disposable cartridges
- microfluidic channels
- micro-fabricated thin-film electrodes

RF-systemer

- Sentralt i trådløs kommunikasjon
 - Radiobølger benyttes for transmisjon/mottak
 - Elektromagnetiske bølger (Maxwells ligninger)
 - "Mobile systemer" gir stor frihet
- Radio **"tranceiver"**
 - Transmitter + Receiver
- Signalkvalitet i radiokanalen avhengig av
 - Posisjon
 - Omgivelser, refleksjon
 - Multipath
 - Støy (S/N-forholdet, BER= bit error rate)

Generelt kommunikasjonssystem



Bitstrøm moduleres på **bærebølge** (carrier)

Radiokanalen introduserer støy, interferens, forstyrrelser

Mottaker former signalet for demodulasjon

RF-systemer

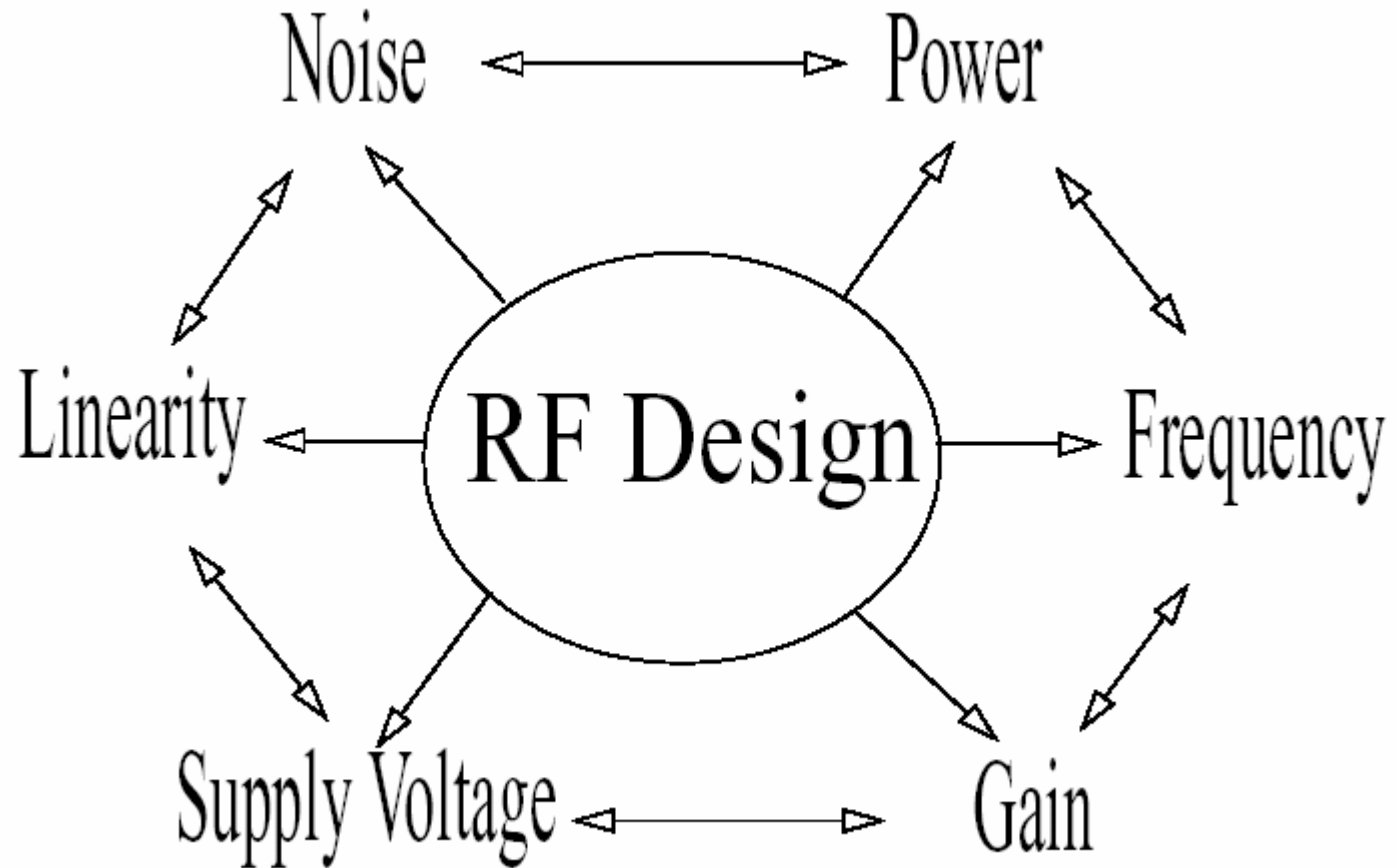
- RF-systemers effektivitet/ytelse
 - Evne til å overføre **effekt**
 - Benytte en begrenset **båndbredde**
- Systemene kjemper om frekvensbånd
 - Filtrering trengs for å skille kanaler
 - Skille når enheten sender og mottar
 - TDMA (Time Division Multiplexing Access)
 - FDMA (Frequency D M A)

RF design

- **= en utfordring for konstruktøren!**
- Mange ulike krav og føringer ved RF design
 - Dabrowski 2004 ->
- CMOS er en sterk kandidat!

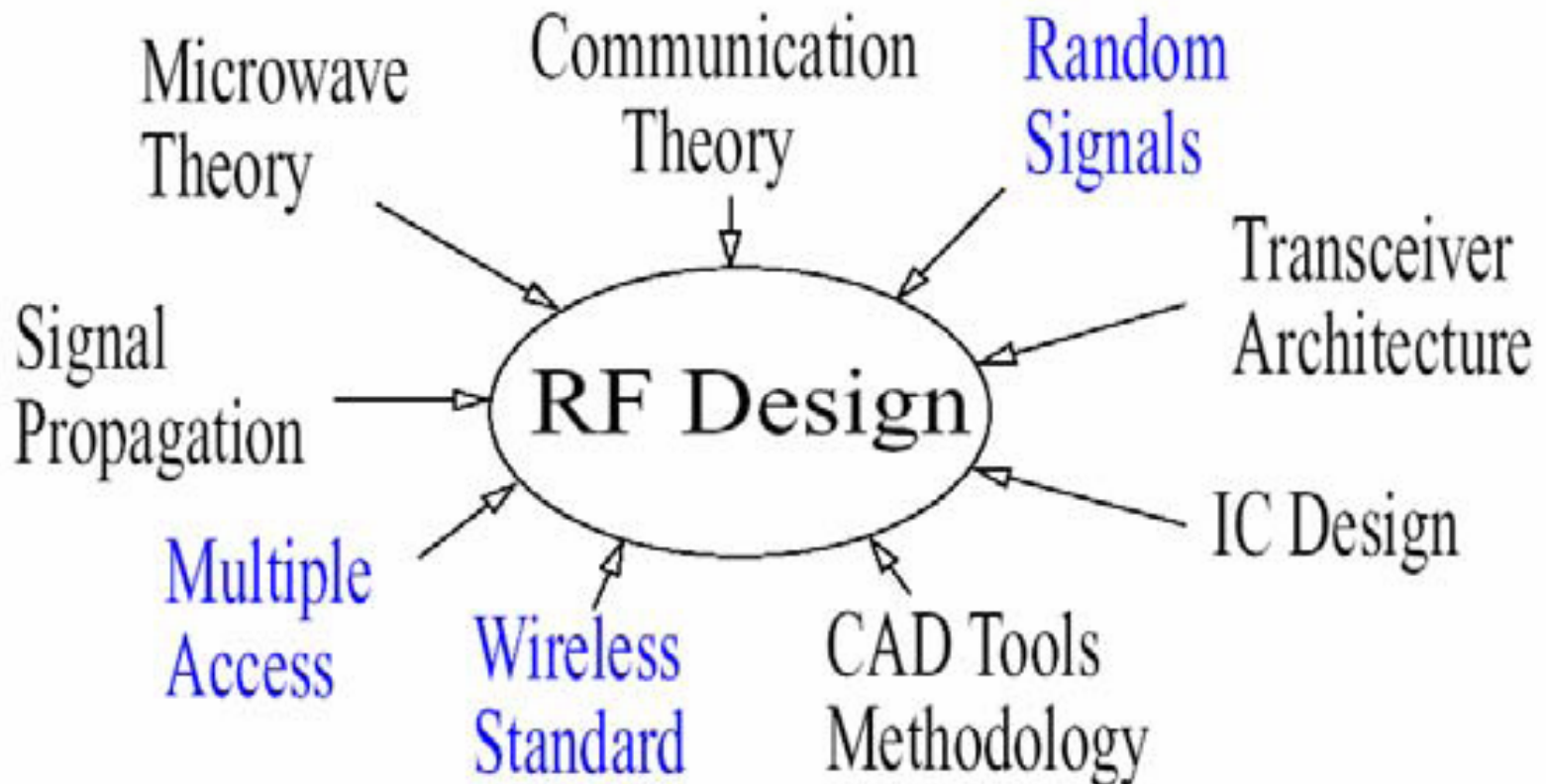
RF Design Hexagon

Multi-objective approach



Disipliner som kreves i RF design

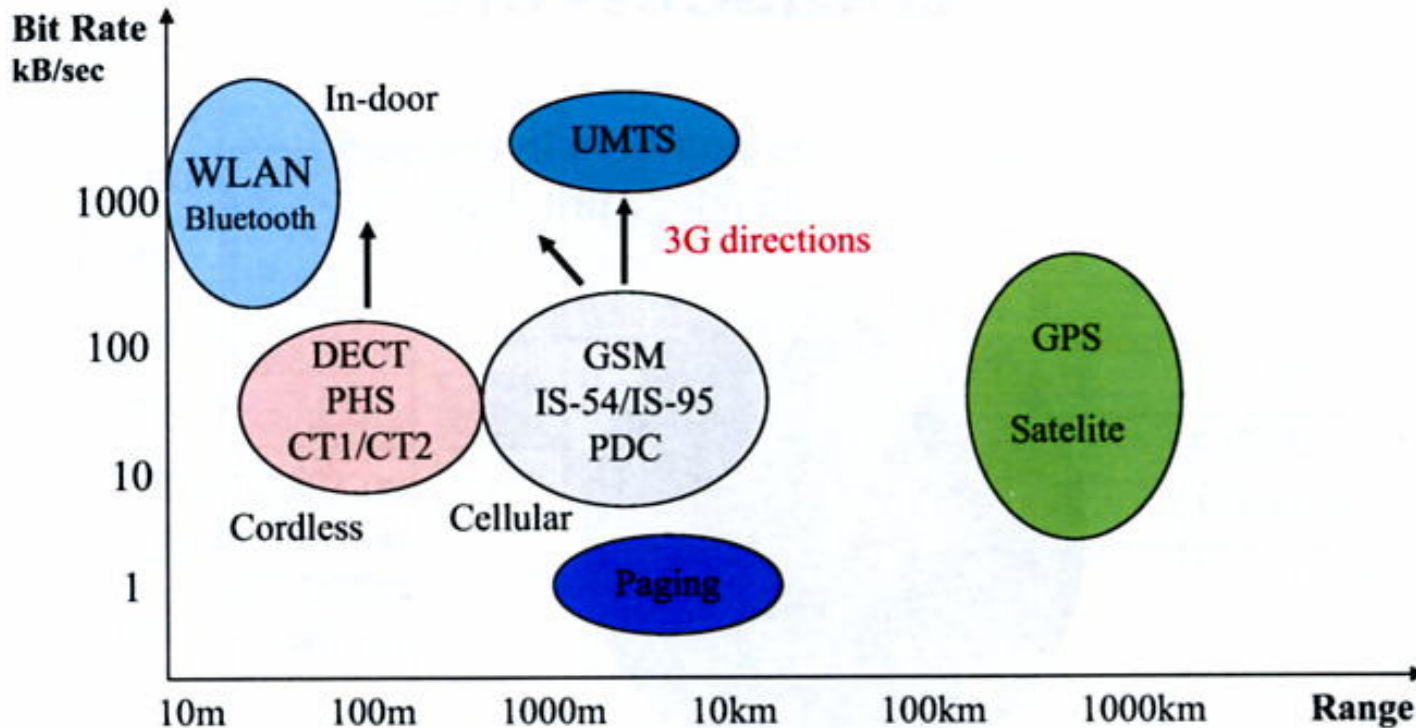
- Dabrowski 2004



Kommunikasjonsstandarder

- Går ikke inn på standarder i INF5490
 - DECT (Digital Enhanced Cordless Telecomm)
 - 1.88 – 1.9 GHz, 50 – 400 m rekkevidde
 - GSM
- Kort oversikt:
 - Slide 5 og 6 fra Dabrowski ->

Wireless Communication Systems Today



Many wireless applications and gadgets !

Overview of Standards

Standard	Access Scheme	Frequency band (MHz)	Channel Spacing	Frequency Accuracy	Modulation Technique	Data Rate (kb/s)	Peak Power
GSM	TDMA/ FDMA/ TDD	890-915 (Tx) 935-960 (Rx)	200 kHz	90 Hz	GMSK	270.8	0.8, 2, 5, 8 W
DCS-1800	TDMA/ FDMA/ TDD	1710-1785 (Tx) 1805-1850 (Rx)	200 kHz	90 Hz	GMSK	270.8	0.8, 2, 5, 8 W
DECT	TDMA/ FDMA/ TDD	1880-1900	1728 kHz	50 Hz	GMSK	1152	250 mW
IS-54	TDMA/ FDMA	824-849 (Tx) 869-894 (Rx)	30 kHz	200 Hz	$\pi/4$ QPSK	48	0.8, 1, 2, 3 W
IS-95	CDMA/ FDMA	824-849 (Tx) 869-894 (Rx)	1250 kHz	N/A	OQPSK	1228	N/A
Bluetooth	CDMA/ FDMA/FH	2400-2483	1000 kHz	20 ppm	GFSK	1000	1,4,100 mW
WCDMA (UMTS)	W-CDMA/ TD-CDMA	1920-1980 (Tx) 2110-2170 (Rx)	5000 kHz	N/A	QPSK	3840 (max)	125,250 500mW, 2W

Table 1-1 IEEE Frequency Spectrum

Frequency Band	Frequency	Wavelength
ELF (Extreme Low Frequency)	30–300 Hz	10,000–1000 km
VF (Voice Frequency)	300–3000 Hz	1000–100 km
VLF (Very Low Frequency)	3–30 kHz	100–10 km
LF (Low Frequency)	30–300 kHz	10–1 km
MF (Medium Frequency)	300–3000 kHz	1–0.1 km
HF (High Frequency)	3–30 MHz	100–10 m
VHF (Very High Frequency)	30–300 MHz	10–1 m
UHF (Ultrahigh Frequency)	300–3000 MHz	100–10 cm
SHF (Superhigh Frequency)	3–30 GHz	10–1 cm
EHF (Extreme High Frequency)	30–300 GHz	1–0.1 cm
Decimillimeter	300–3000 GHz	1–0.1 mm
P Band	0.23–1 GHz	130–30 cm
L Band	1–2 GHz	30–15 cm
S Band	2–4 GHz	15–7.5 cm
C Band	4–8 GHz	7.5–3.75 cm
X Band	8–12.5 GHz	3.75–2.4 cm
Ku Band	12.5–18 GHz	2.4–1.67 cm
K Band	18–26.5 GHz	1.67–1.13 cm
Ka Band	26.5–40 GHz	1.13–0.75 cm
Millimeter wave	40–300 GHz	7.5–1 mm
Submillimeter wave	300–3000 GHz	1–0.1 mm

Overgang til RF medfører

- Økt frekvens:
 - → kortere bølgelengde
 - i vakuum: $\lambda \cdot f = c$
 - → signalene varierer over korte avstander
 - spenning V, strøm I
 - → krav om mindre komponent-dimensjoner
 - høypresisjons-fabrikering
 - mikromaskinering

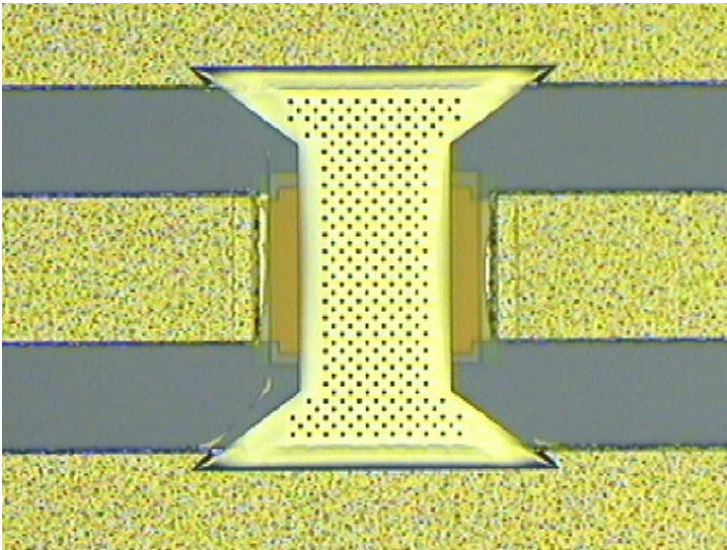
Det er begrensninger ved dagens RF teknologi

- Off-chip løsninger må benyttes
 - Krav om høy ytelse, stor nøyaktighet, gode egenskaper
 - Krystaller, spoler
 - Passive, diskrete komponenter benyttes: R, C, L
 - Systemene tar stor plass
 - Monteres på kretskort
 - Integreerte løsninger er ikke mulig
- Aktive komponenter: forsterkere, svitsjer
 - GaAs, bipolar Si, CMOS Si, PIN-dioder
- Komponentene har begrenset ytelse
 - Konvensjonell PIN-diode er ineffektiv ved høye frekvenser
 - RF filtre er krevende å implementere (kostbart)
 - krav til høy Q-faktor!

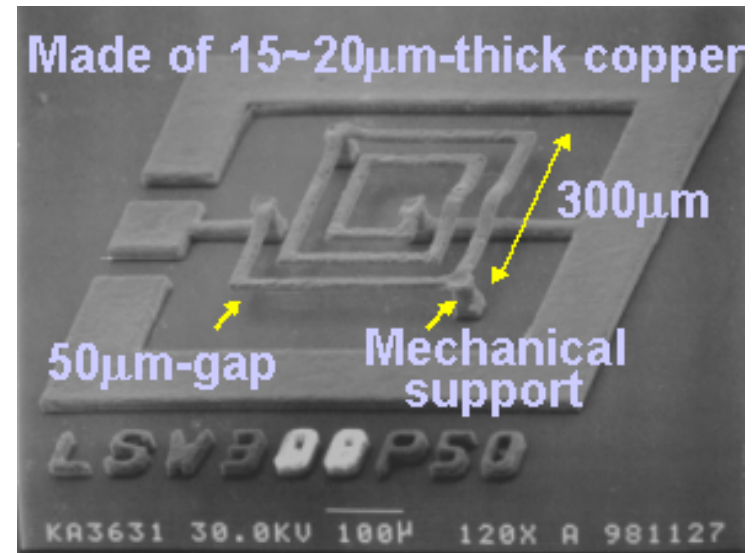
MEMS i RF-systemer

- RF MEMS ble utviklet på 90-tallet
 - 1990: første MEMS mikrobølge-svitsj bedre enn GaAs (Hughes Res Lab)
 - 1995: RF MEMS svitsjer fra Rockwell Science & TI
 - Fra 1998: en rekke universiteter
 - Univ of Michigan, Univ of Calif Berkeley, Northeastern Univ, MIT, Columbia Univ, IMEC, LETI, Fraunhofer
 - Noen bedrifter:
 - Analog Devices, Motorola, Samsung, ST Microelectronics

Eksempler

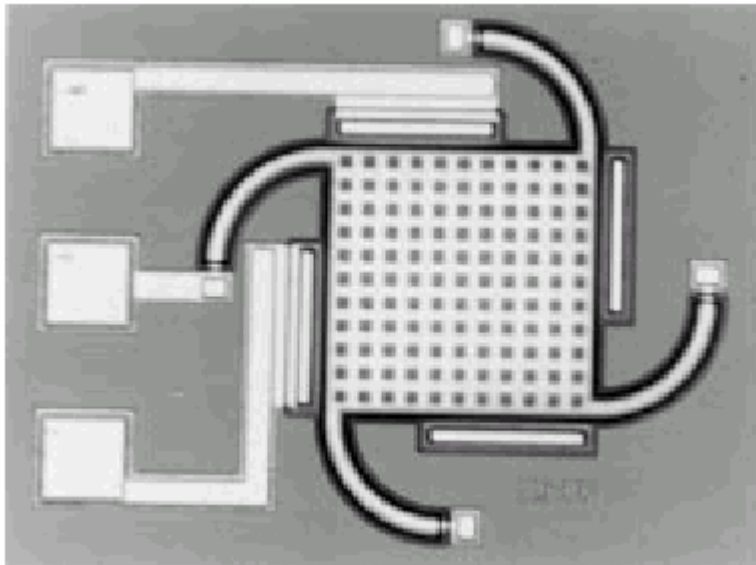


MEMS RF switch

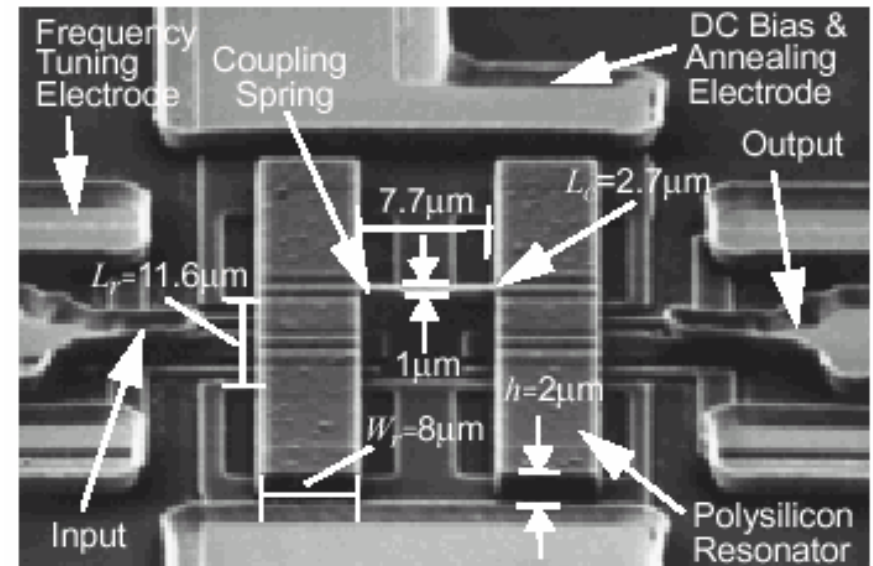


MEMS inductor

Eksempler



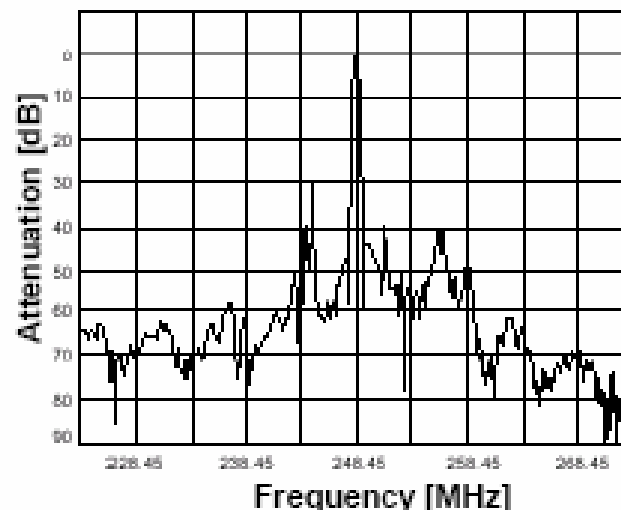
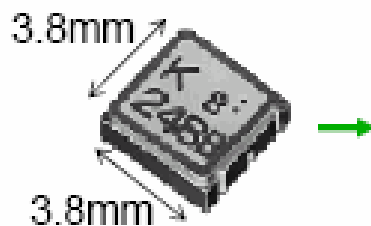
MEMS tunable capacitor



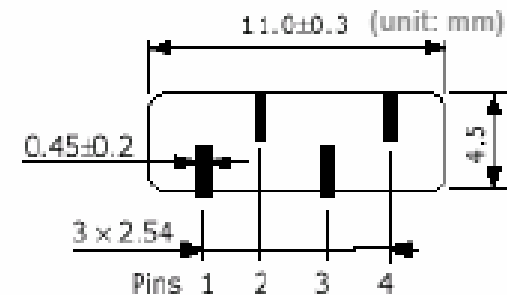
MEMS filter

Bottlenecks in Current Microwave/MM-Wave Systems – Band Selection Filters

- **High-Q** ($Q \sim 1000$'s) filters are needed in heterodyne communication receivers for frequency selection in RF and IF bands
- Current solution: Off-chip surface-acoustic wave (SAW) filter
 - Bulky



IF filter
 f_0 : 240MHz
 Δf : 260kHz
 Q : ~ 1000



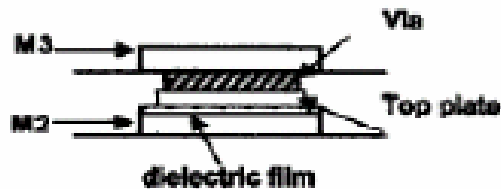
RF filter
 f_0 : 868MHz
 Δf : 600kHz
 Q : ~ 1500

Bottlenecks in Current Microwave/MM-Wave Telecommunication Systems – Passive Elements

- Lack of high-Q (~ 1000) passive elements like inductors and capacitors in matching circuit or bias-Tee, etc.

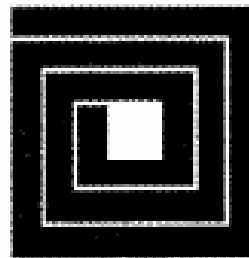
MIM Capacitor

- Low Q (< 100)



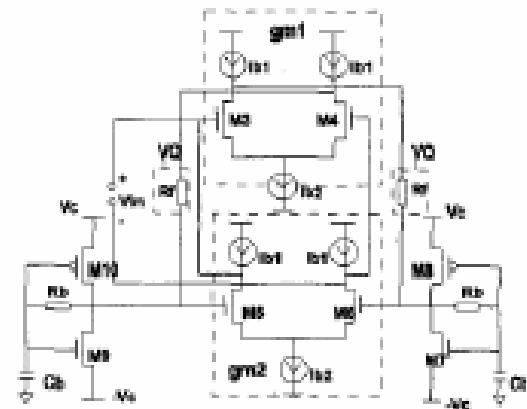
Spiral Inductor

- Low Q (~ 10)
- Low resonant frequency



Active Inductor

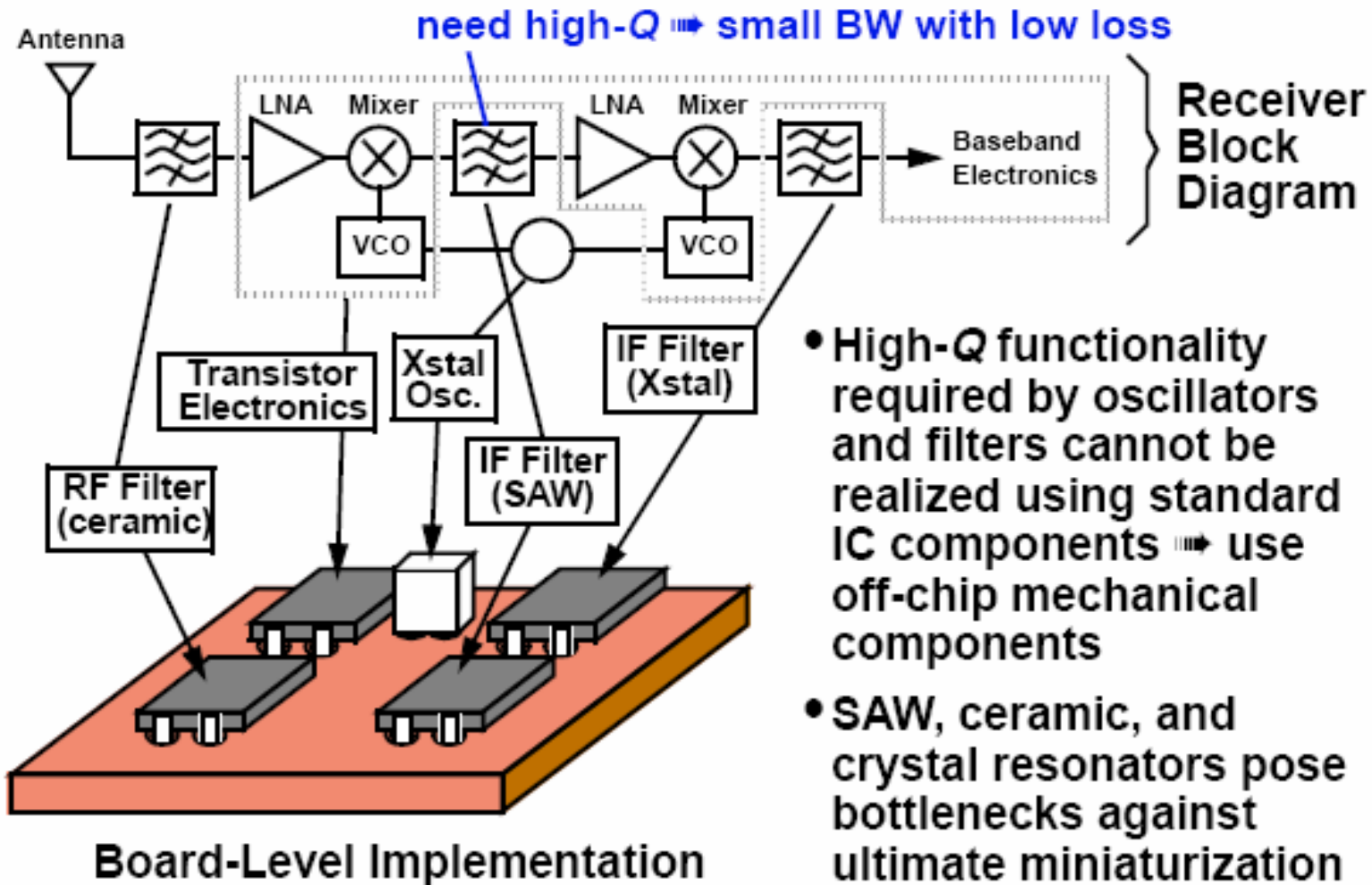
- Large Noise
- High Power consumption



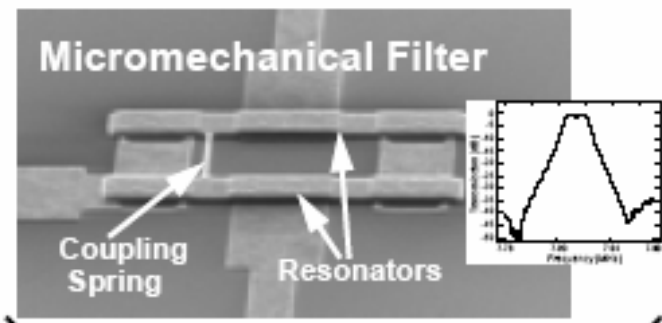
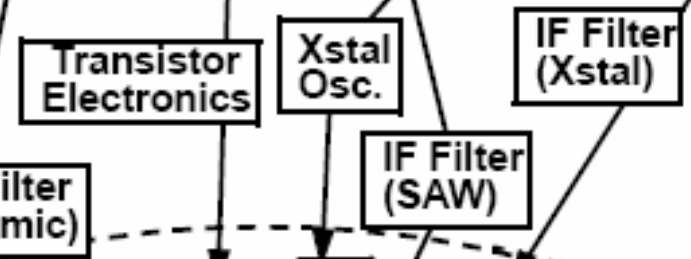
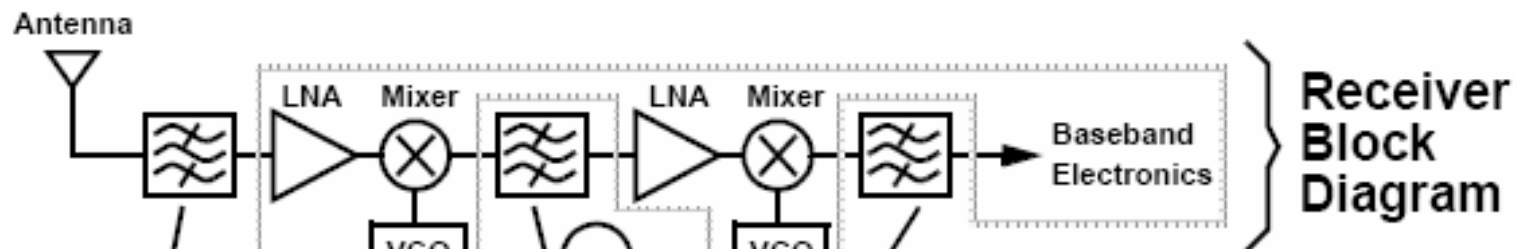
Miniatyrisering av transceiver

- Typisk transceiver med diskrete komponenter
 - Prof. C. T-C. Nguyen, Univ of Michigan
- Hvilke deler som med fordel kan erstattes med MEMS
- 3 slides fra Nguyen ->

Miniaturization of Transceivers



Target Application: Integrated Transceivers



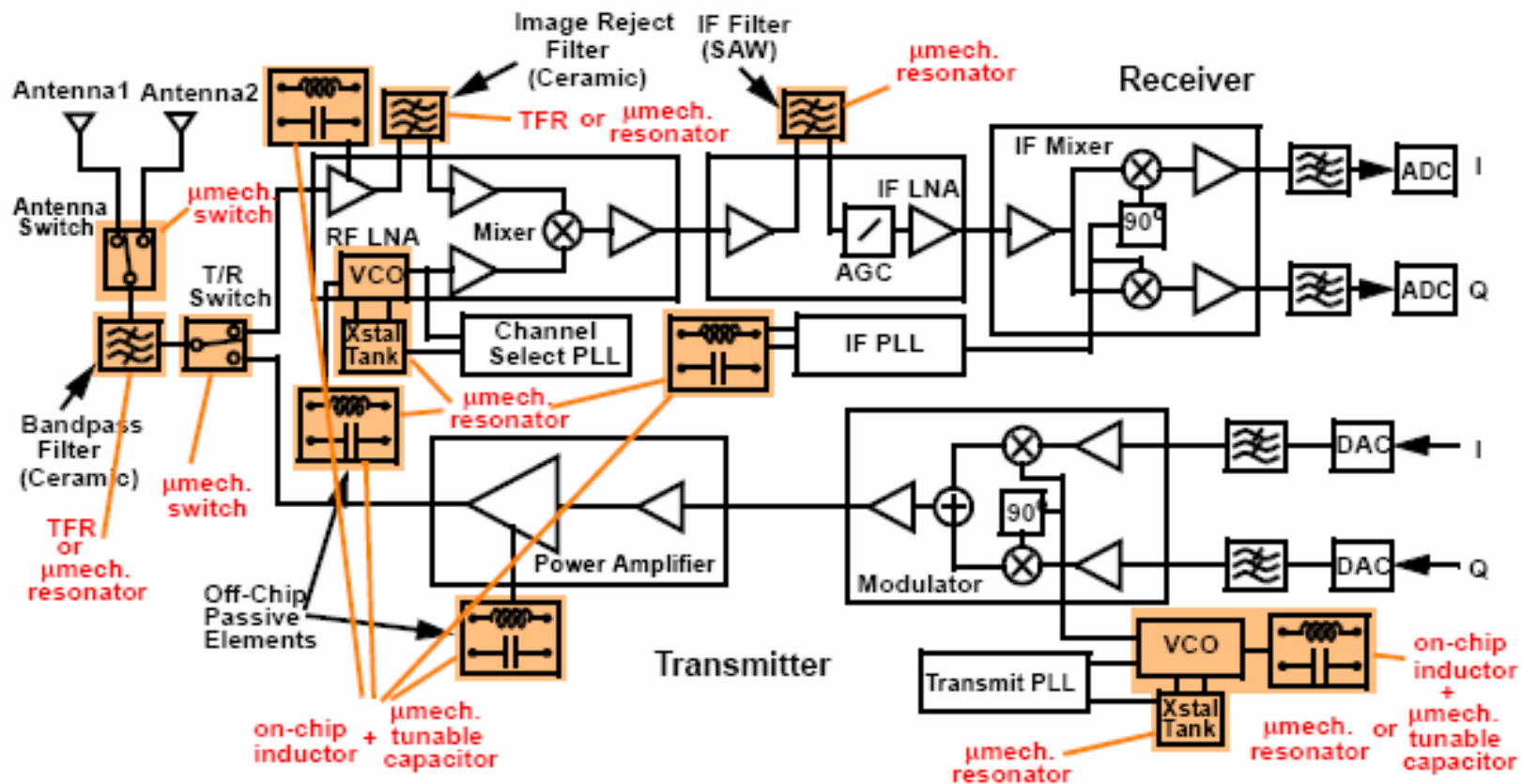
MEMS

↓



- Off-chip high-Q mechanical components present bottlenecks to miniaturization ⇒ replace them with μ mechanical versions

MEMS-Replaceable Transceiver Components

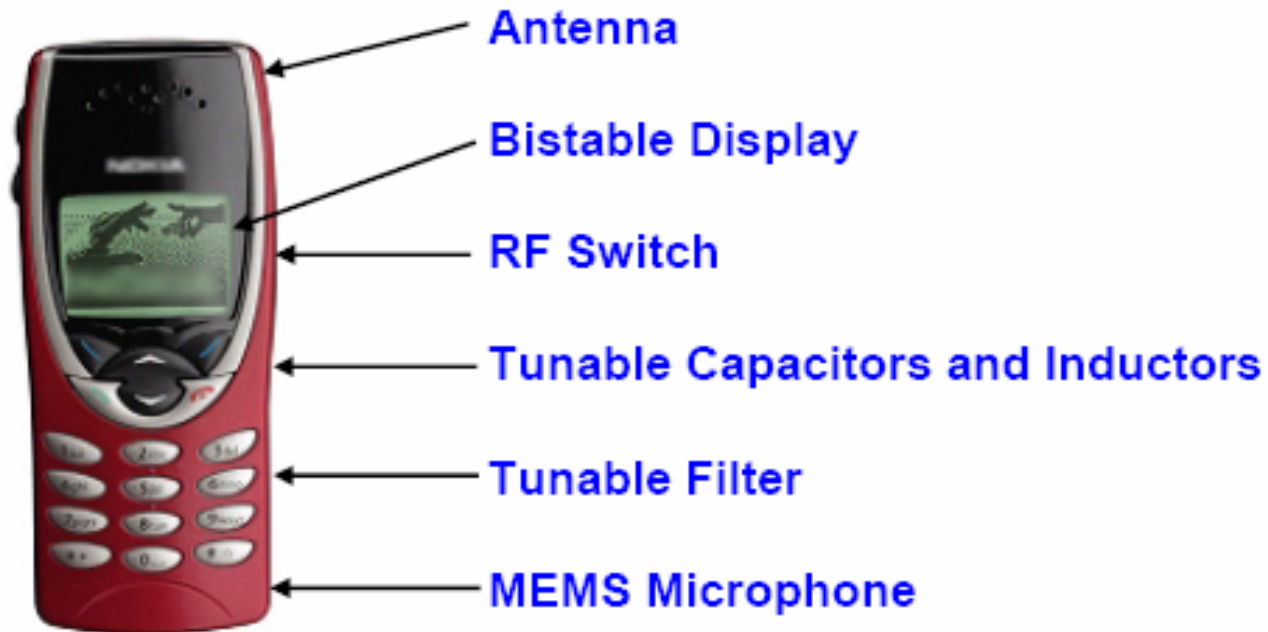


- A large number of off-chip high-Q components replaceable with μ machined versions; e.g., using μ machined resonators, switches, capacitors, and inductors

Perspektiv

- Trådløs (personlig) kommunikasjon ekspanderer
 - 3G systemer og mobile terminaler
 - ”ambient intelligence”
- Ulike teknologier smelter sammen
 - Mikromekanikk og mikroelektronikk
 - Optikk og elektronikk
 - Passive komponenter og ICs

Potential Applications of RF MEMS



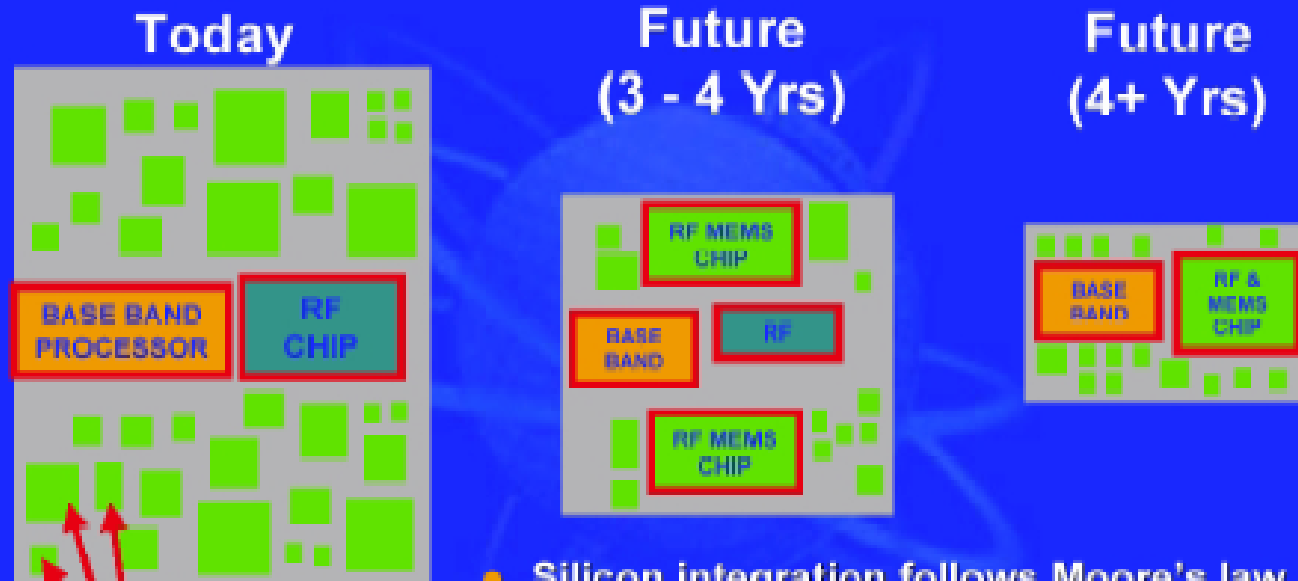
Utbredelse av RF MEMS

- Økt interesse for RF MEMS i industrien
 - Halvlederindustri i USA og Europa har investeringsplaner for RF MEMS
 - (MEMS generelt har ikke tatt av!)
- RF MEMS er tema på ledende internasjonale konferanser
 - ISSCC, IEDM (Int. Electron Devices Meeting)
 - Egne MEMS-konferanser og tidsskrifter
 - Se web-siden

Integrerte løsninger

- Integrerte løsninger i Si
 - Fremstilling av mikroelektronikk og MEMS har mange fellestrekk
 - SoC, System-on-Chip
 - → "Radio-on-a-chip"!
- MEMS som pre eller post prosessering av CMOS?
 - MEMS **etter** CMOS: Temperaturfølsomhet!
 - Høye temp etter CMOS prosesseringen er ødeleggende
 - MEMS **før** CMOS: store terrengvariasjoner!
 - Trenger egne "lag" for å jevne ut flaten

MEMS for wireless integration



100s of passive components

- Silicon integration follows Moore's law
- MEMS research to enable:
 - "High Value" passives (Filters, Switches etc) to be built from Silicon and integrated together

Nye RF arkitekturer

- MEMS muliggjør nye måter å konstruere RF systemer på
- MEMS teknologi kan brukes til å lage mange, billige eksemplarer av grunn-komponenter
 - Svitsjer kan brukes til å velge mellom grunnmodulene (rekonfigurere)
- Mikromaskinerte "lumped components" kan erstatte distribuerte
 - Gir fleksibilitet i integrasjon (enklere modularisering)