

INF5490 RF MEMS

F1: Introduksjon. MEMS i RF

V2007, Oddvar Søråsen
Institutt for informatikk, UiO

Dagens forelesning

- Bakgrunn – motivasjon
- Opplegg for emnet INF5490
- Introduksjon til temaet
 - MEMS generelt
 - RF-systemer generelt
 - **MEMS i RF-systemer**
- Perspektiv

INF5490 RF MEMS

- Nytt Master-emne ved Ifi V05
 - 3. versjon V07
 - ca 10-15 kandidater/år
- **MEMS** (Mikro Elektro Mekaniske Systemer) er en forholdsvis ny aktivitet ved MES (Mikroelektronikksystemer), NANO-gruppen
- Inspirert av:
 - Nasjonal satsing på mikroteknologi (NFR)
 - MiNaLab (Mikro Nano Teknologi-lab) i nabobygg
 - SINTEF lab
 - UiO lab

Hvorfor MEMS ved Nano-gruppen?

- En ny mulighet til å realisere **integreerte, miniatyriserte systemer**
 - Kan inkludere også mikromekaniske komponenter i systemene: "øyne, ører, hender"
 - Elektroniske systemer med MEMS gir en ny **frihetsgrad** for designeren
 - MEMS –komponenter trenger typisk et **rammeverk** i form av elektronikk!
- 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 → datamaskinarkitektur/multiprosessorer → **MEMS/mikroelektronikk**
- 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
- Egen forskningsaktivitet

Avgrensning –definisjon av interessefelt

- MEMS er et bredt forskningsfelt
 - Fokusering er 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 NANO-grp

- Nær sammenheng med grunnkompetanse i kretsteknikk
- Aktuelt tema
 - Økende interesse internasjonalt for MEMS brukt innen RF
 - **Wireless Sensor Nets (WSNs)**
- Lovende felt
 - Synes å ha stort potensiale
 - Gryende kommersiell interesse
- Stort marked: sentralt i **trådløse anvendelser**
 - Telekom
 - Mobilbransjen
 - Distribuert intelligens (observasjon, aktivering)
 - Miljøovervåkning - sensornoder
 - "Ambient Intelligence"
 - Pasientovervåkning - implantater
- Utfordrende, spennende!
- Grunnlag for etablering av ny virksomhet
- Emnet passer inn i MES-utdanningen

Typiske RF MEMS komponenter

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

Fordeler gitt av RF MEMS

- Subsystemer med høy **ytelse**
 - Økt selektivitet: skarpe filtre
 - Høyere Q-faktor: stabil "tank" frekvens
 - Redusert tap
 - Bedre isolasjon, mindre overhøring
 - Lavere signalforvrengning
 - Økt båndbredde
- Krets og system **miniatyrisering**
 - Systemintegrasjon (μ elektronikk + MEMS)
 - SoC (System-on-Chip) eller ved pakking
- **Kostnadsreduksjon**
 - Batch prosessering \rightarrow lavere kostnader
- Lavere **effektforbruk**

Eks.: mikrobølge svitsj

- En tidlig anvendelse av RF MEMS
 - Mye aktivitet, mange eksempler finnes
 - Fordeler
 - Elektrostatisk styring: enkelt prinsipp
 - El spenning → ladning → tiltrekningskrefter → mekanisk bevegelse
 - Høy linearitet ved signalgjennomgang
 - Lav DC "standby power"
 - Lavt tap ("insertion loss")
 - Ulemper
 - Lav hastighet (noen μs)
 - Pålitelighet i mekaniske kontakter (slitasje)

Dagens forelesning

- Bakgrunn – motivasjon
- Opplegg for emnet INF5490
- Introduksjon til temaet
 - MEMS generelt
 - RF-systemer generelt
 - **MEMS i RF-systemer**
- Perspektiv

Opplegg for emnet INF5490

- Ukentlige **forelesninger**
 - Torsdager 10:15 – 12 i 3A
 - Unntak uke 8 + helligdager
- **Fellesgruppe** enkelte uker
 - Tirsdager 14:15 – 15 i 3B
 - Første gang 30/1
 - Presentere opplegg og tema for obliger
 - Gjennomgang av støttestoff
 - Øvingsoppgaver
 - Praktiske aspekter ved emnet
 - Spørsmål, diskusjon

Obliger

- **2 obliger** skal leveres og godkjennes
 - Betingelse for å få gå opp til eksamen
 - Levering av 2 rapporter innen gitte frister (retningslinjer!)
 - Samarbeid i grupper av 2 studenter
- Tema: studium av mikromekaniske svingekretser (resonator, filter)
 - Simuleringer med **CoventorWare**
 - 3-dim modellering, FEM-analyse (Finite-Element-Methods)
 - Høynivå-modellering (nytt 2007)
- 3 timers avsluttende **eksamen**
 - muntlig (evnt. skriftlig, - avhengig av antall kandidater)

Tematisk inndeling av emnet

- RF MEMS er et **tverrfaglig** felt
- Hovedinndeling av stoffet
 - Mikromaskinering
 - Modellering
 - RF kretsdesign

 - RF MEMS kretselementer
 - Prinsipper for operasjon, modeller/analyse og eksempler
 - Svitsjer, faseskiftere, resonatorer, filtre, passive kapasitanser (C) og spoler (L)
 - Pakking
 - Systemdesign

Forelesningsplan V07

- **Dato Tema**
- 25.01.2007 Introduksjon. MEMS i RF
- 01.02.2007 MEMS: fremstilling og virkemåte
- 08.02.2007 Modellering, design og analyse
- 15.02.2007 Utfordringer ved RF kretsdesign
- 22.02.2007 Ingen forelesning
- 01.03.2007 RF MEMS svitsjer I
- 08.03.2007 RF MEMS svitsjer II
- 15.03.2007 RF MEMS faseskifttere. Resonatorer I
- 22.03.2007 RF MEMS resonatorer II
- 29.03.2007 RF MEMS resonatorer III
- 05.04.2007 Ingen forelesning, påske
- 12.04.2007 RF MEMS filtre
- 19.04.2007 RF MEMS kapasitanser
- 26.04.2007 RF MEMS induktanser (evnt. bortreist)
- 03.05.2007 Integrasjon og pakking
- 10.05.2007 Trådløse systemer med RF MEMS
- 17.05.2007 Ingen forelesning
- 24.05.2007 Oppsummering, repetisjon
- 31.05.2007 Reserve

[fra kurshjemmeside på web](#)

Litteratur

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

Praktisk

- Kontaktinfo emneansvarlig
 - Oddvar Søråsen, rom 3411, tlf.: 22 85 24 56
 - oddvar@ifi.uio.no
- Kontaktinfo grupper/obliger
 - Jan Erik Ramstad
 - janera@student.matnat.uio.no
- Kontaktperson CoventorWare
 - Hans K. Otnes Berge, rom 3408, tlf.: 22 85 29 28
 - hansbe@student.matnat.uio.no
- web-sider
 - <http://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF5490/v07/>

Kvalitetssikring

- Tilsynssensor
 - Geir Uri Jensen, SINTEF, MiNaLab
- Underveisevaluering

Institutt for informatikk ønsker en kontinuerlig evaluering av både form og innhold i undervisningen. Evalueringen skal gi studentene ved et emne mulighet til å komme med tilbakemeldinger underveis, slik at eventuelle forbedringer kan gjøres umiddelbart. I tillegg skal underveisevalueringen hjelpe faglærer og instituttet til å fange opp god og mindre god undervisningspraksis og heve kvaliteten på emnet/undervisningen. Emneansvarlig lærer utformer evalueringssopplegget i samråd med studentene som følger emnet og er ansvarlig for kunngjøring av tidspunkt og gjennomføring. Omfang og evalueringsmetode tilpasses hvert enkelt emne og avgjøres av faglærer. Faglærer utfører eventuelle forbedringer og kommuniserer resultatet til studentene.

Dagens forelesning

- Bakgrunn – motivasjon
- Opplegg for emnet INF5490
- Introduksjon til temaet
 - MEMS generelt
 - RF-systemer generelt
 - **MEMS i RF-systemer**
- Perspektiv

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**
 - Eget kurs (Tor Fjeldly), anbefalt
 - **INF5480 RF-kretser, teori og design**
 - Sentrale punkter tas i INF5490

Teknologien er: MEMS

- MEMS – Micro Electro Mechanical Systems (Microsystems, MST – Micro System Technology etc.)
- **Mikromaskinering er sentralt!**
 - Vokste ut av IC fabrikasjons-prosesser (Silisium)
 - I dag finnes en rekke ulike fremstillingsprosesser
 - Ofte proprietære, spesialtilpassede
 - Forskjell fra CMOS ("second source")
- MEMS er en lovende teknologi også for RF-anvendelser
 - Eget kurs ved Fys inst. i høstsemesteret (Liv Furuberg), anbefalt
 - FYS4230 Mikro- og nanosystem modellering og design
 - Sentrale punkter tas i INF5490

Litt om MEMS, generelt

- 2 typer: Aktuatorer og sensorer kan realiseres
 - **Aktuator:** (output)
 - Bevegelig struktur kontrollert ved elektrisk mikrokrets
 - Eks. mikromotor
 - Eks. kondensator med bevegelige plater
 - **Sensor:** (input)
 - Kan "føle"/påvirkes av omgivelsene
 - Bevegelse omformes til elektriske signaler
 - Mange eksempler (trykk, aksellerasjon)
 - De tidligste anvendelsene


Aktiveringsmekanismer

- MEMS strukturer er bevegelige **horisontalt** ("lateralt") eller **vertikalt**
- Aktiveringsmekanismer (mer i senere forelesning)
 - **Elektrostatisk**
 - Kapasitans-strukturer
 - Gir lite energi, nok for RF-anvendelser
 - **Termisk**
 - **Magnetisk**
 - **Piezoelektrisk**
 - Trykk eller tøyning ("stress") produserer et elektrisk felt, - og motsatt!

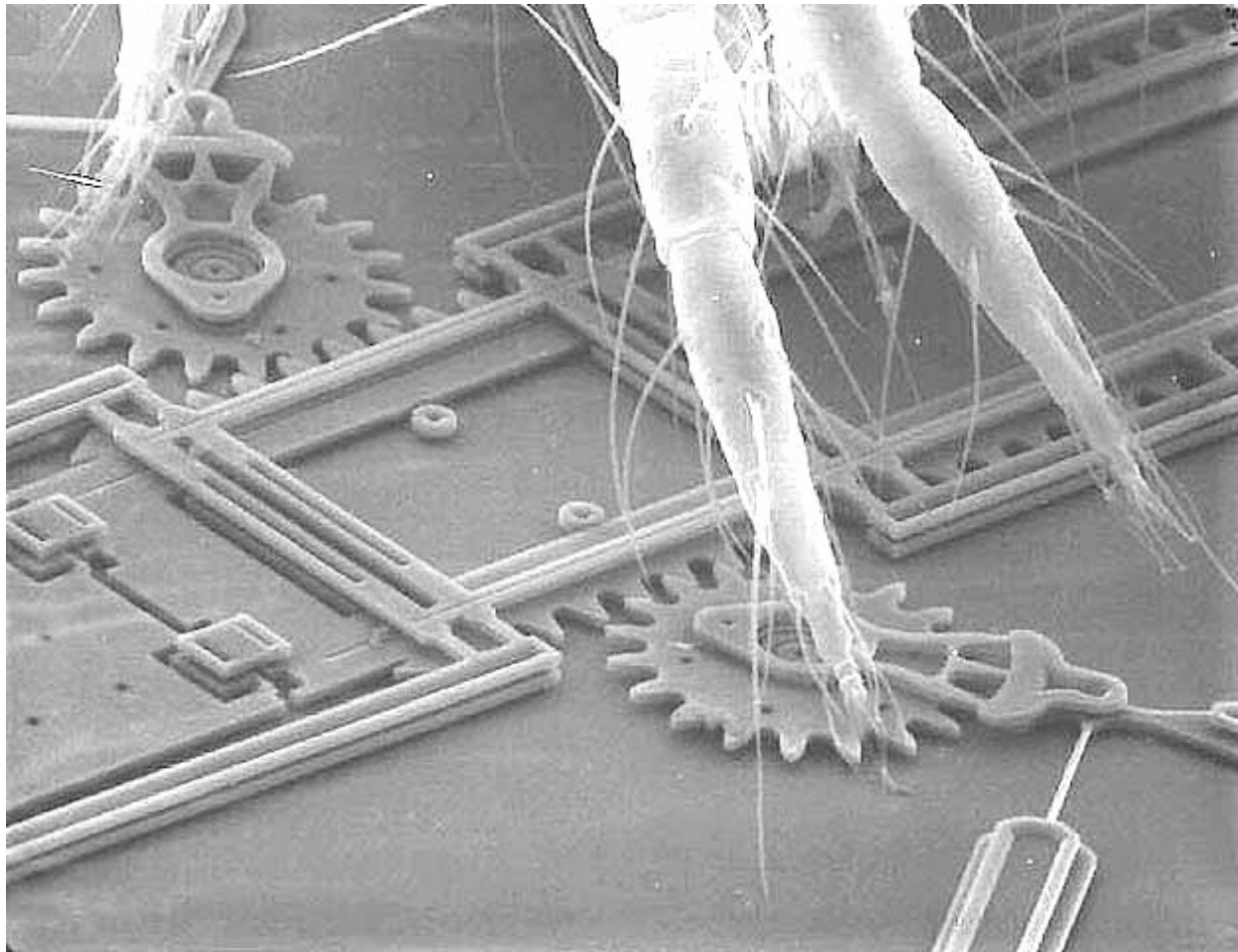
Andre prinsipper

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

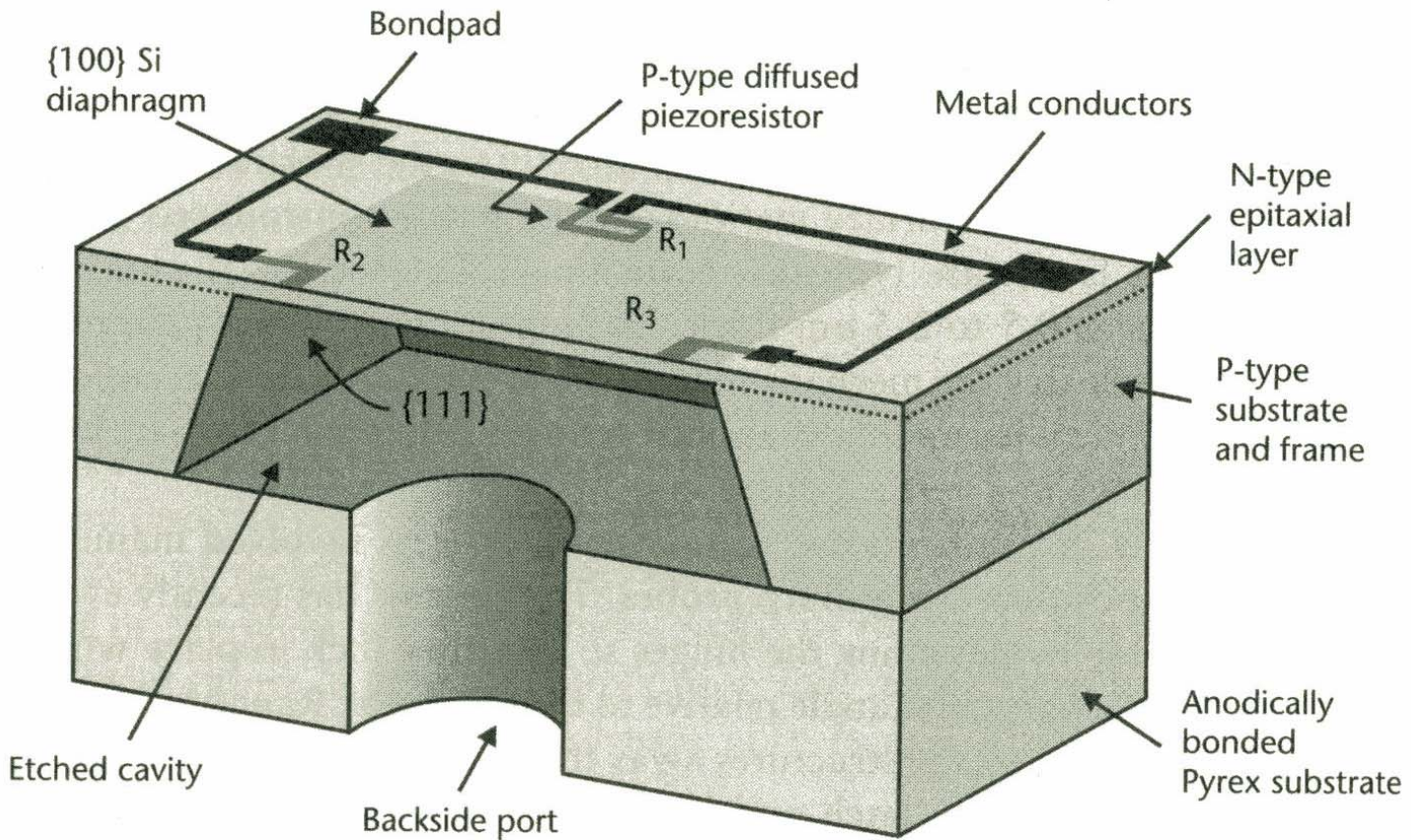
Noen eksempler på MEMS

- Generelle anvendelser av MEMS innen
 - Mikrofluidikk, kjemisk analyse
 - Biomedisin
 - Bilindustrien
 - Navigasjon
 - Trådløs kommunikasjon, RF
 - Optikk
- Eksempler 
 - Mikroaksellerometer
 - Airbag-utløser (SensoNor)
 - Trykklølere (bildekk, oljerør)
 - Blekkskriver-hoder
 - Mikrospeil for projektor
 - Gyroskop

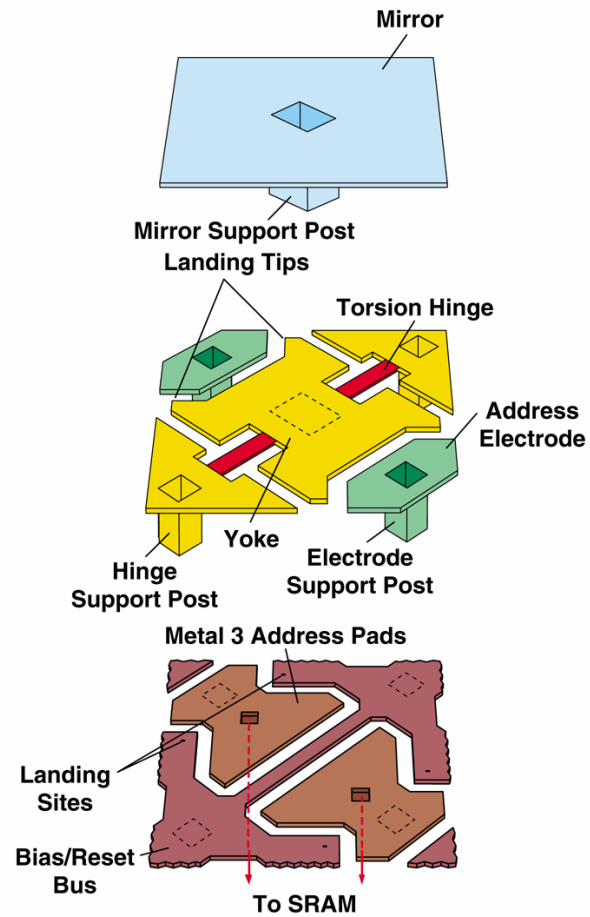
Mikromotor fra Sandia



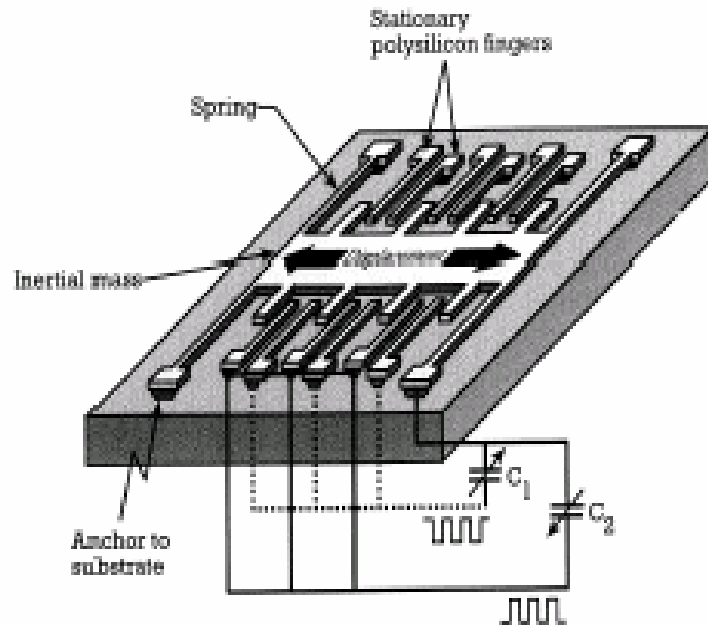
Trykksensor



Mikrospeil

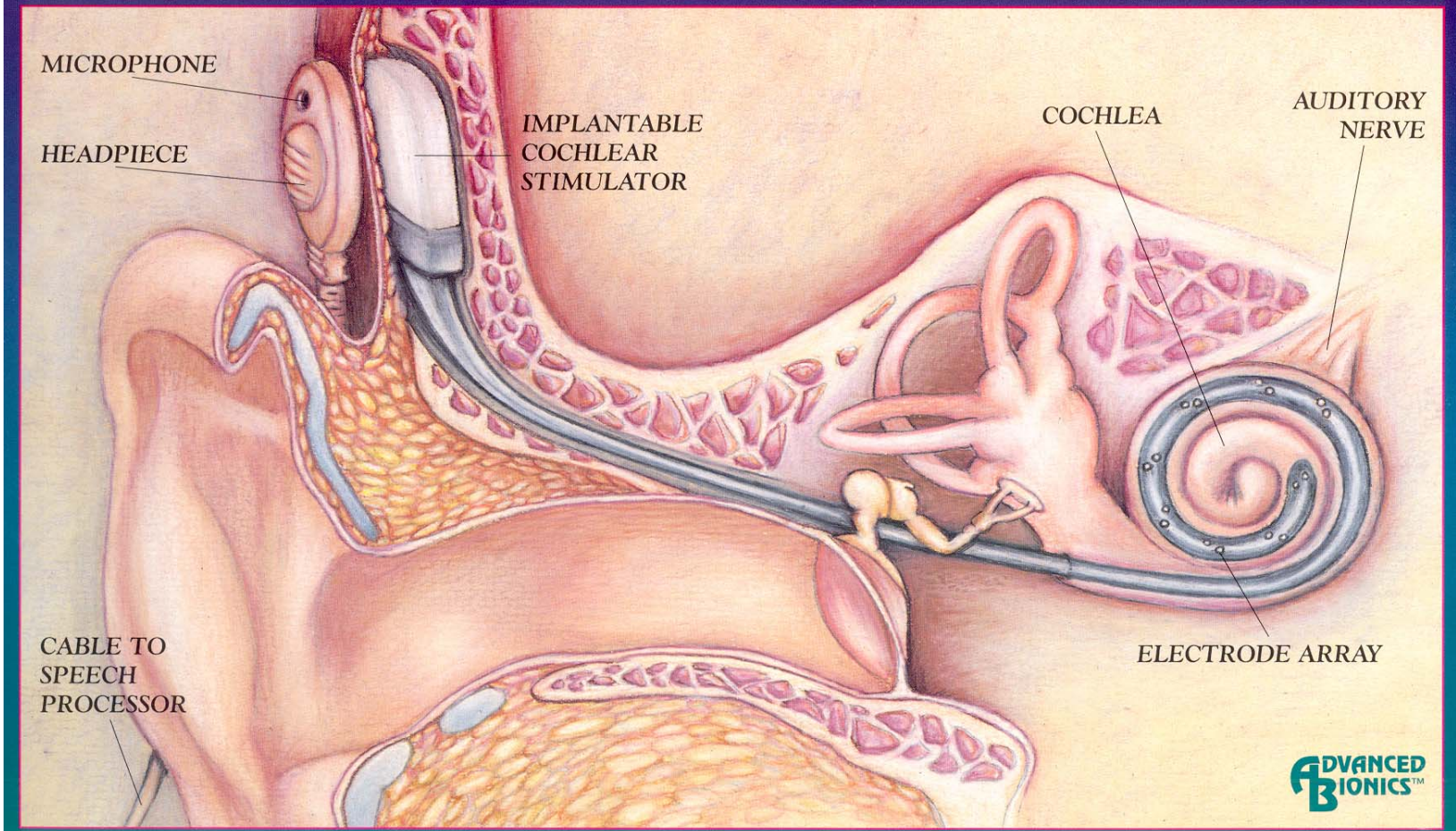


A Capacitive Accelerometer



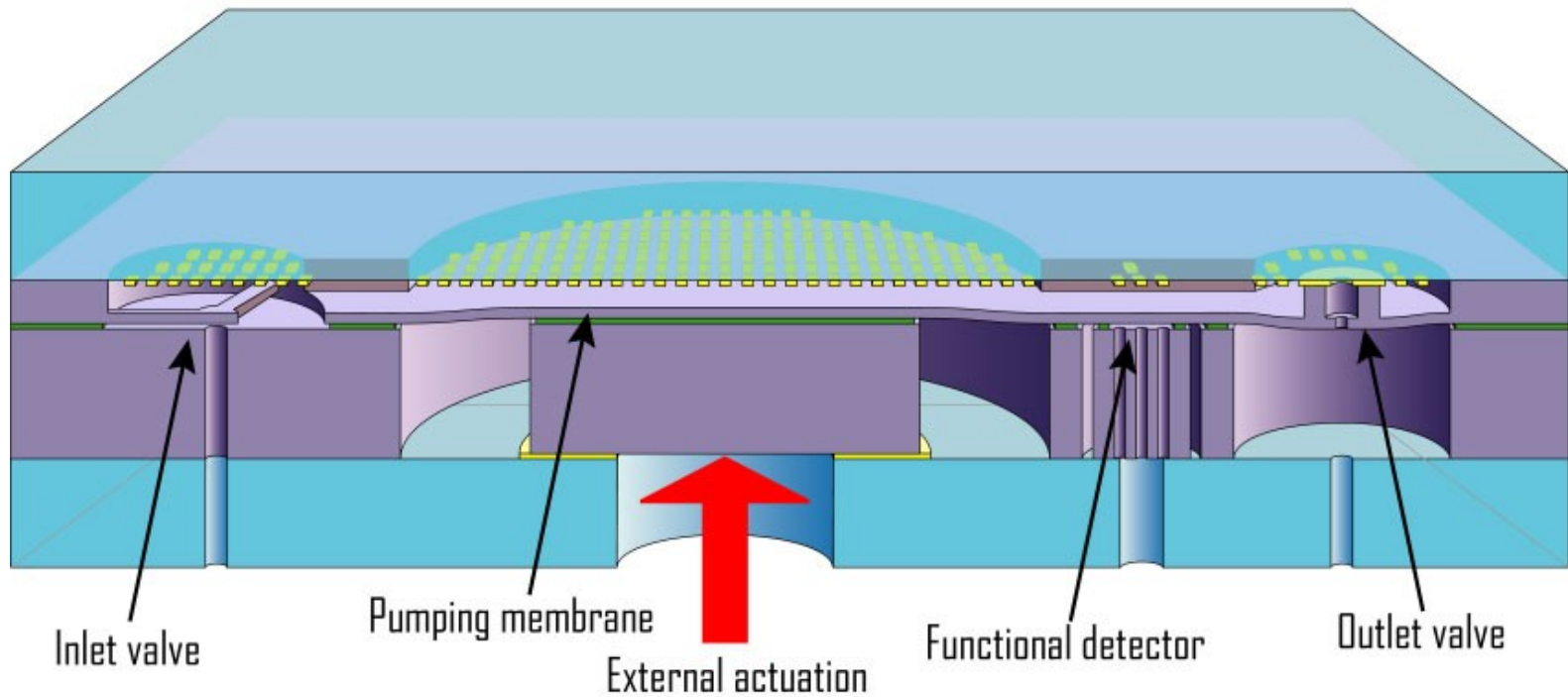
Coclea implantat

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

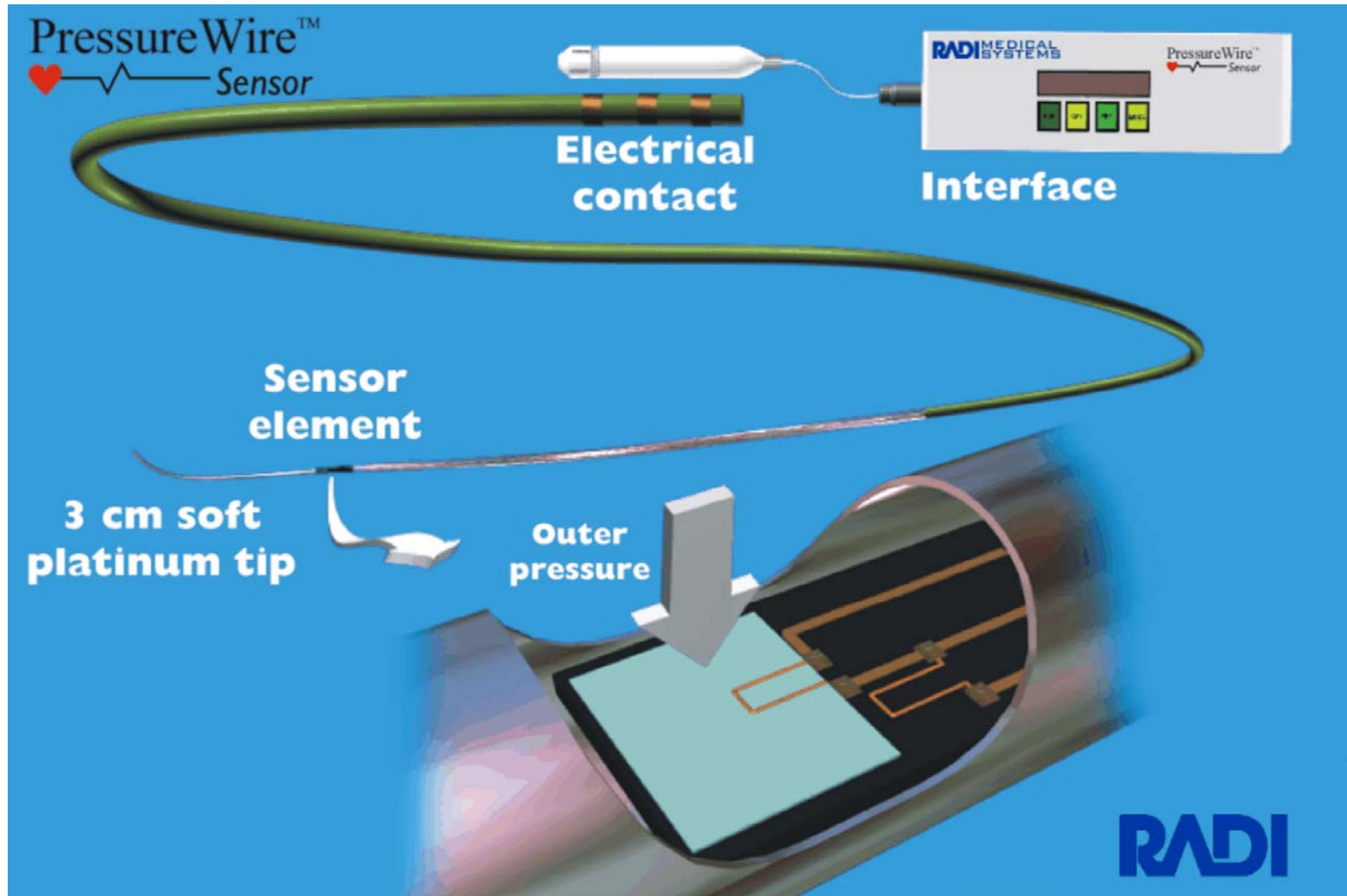


Technology Analysis: Drug Delivery

Debiotech Chip



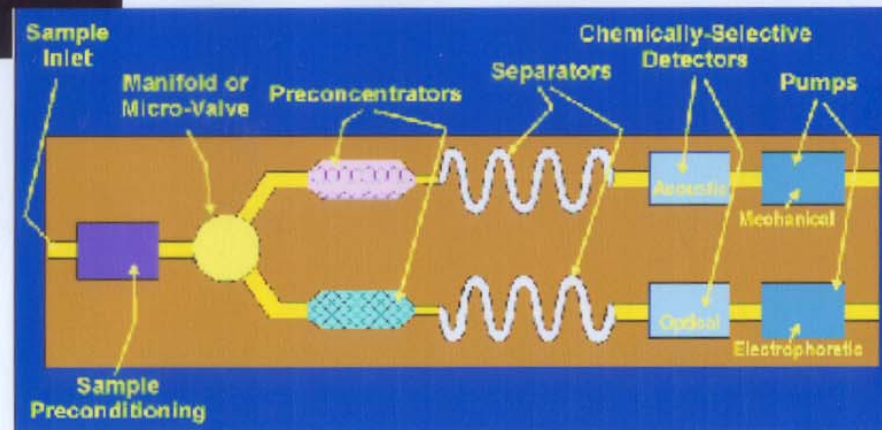
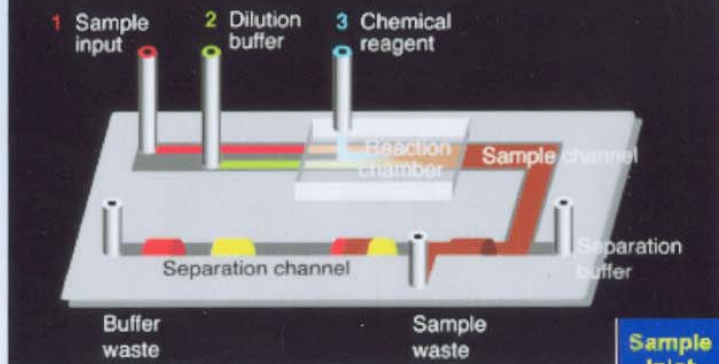
Radi Catheter



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

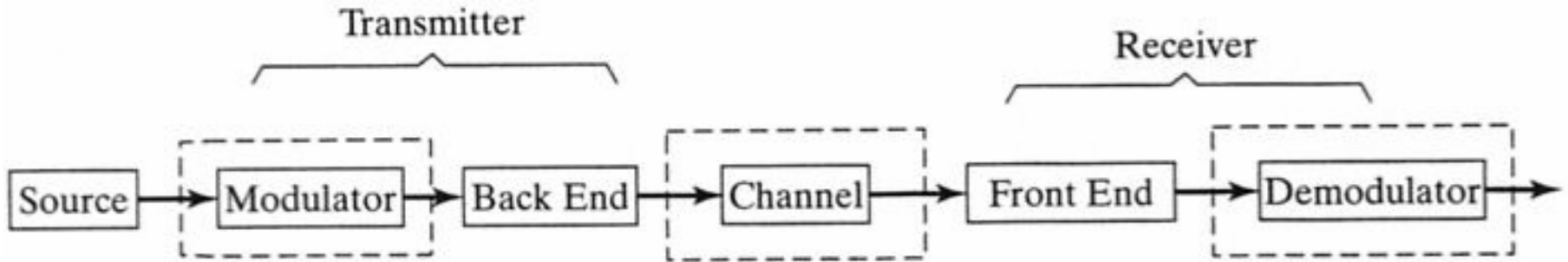
Dagens forelesning

- Bakgrunn – motivasjon
- Opplegg for emnet INF5490
- Introduksjon til temaet
 - MEMS generelt
 - RF-systemer generelt
 - **MEMS i RF-systemer**
- Perspektiv

RF-systemer generelt

- RF-komponenter er sentrale i trådløs kommunikasjon
 - "Mobile systemer" gir stor frihet
 - Radiobølger benyttes for transmisjon/mottak
 - Elektromagnetiske bølger (Maxwells ligninger)
- Grunnleggende komponent: radio **"transceiver"**
 - 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

→ **Høye krav til komponent-ytelse!**

RF-systemer

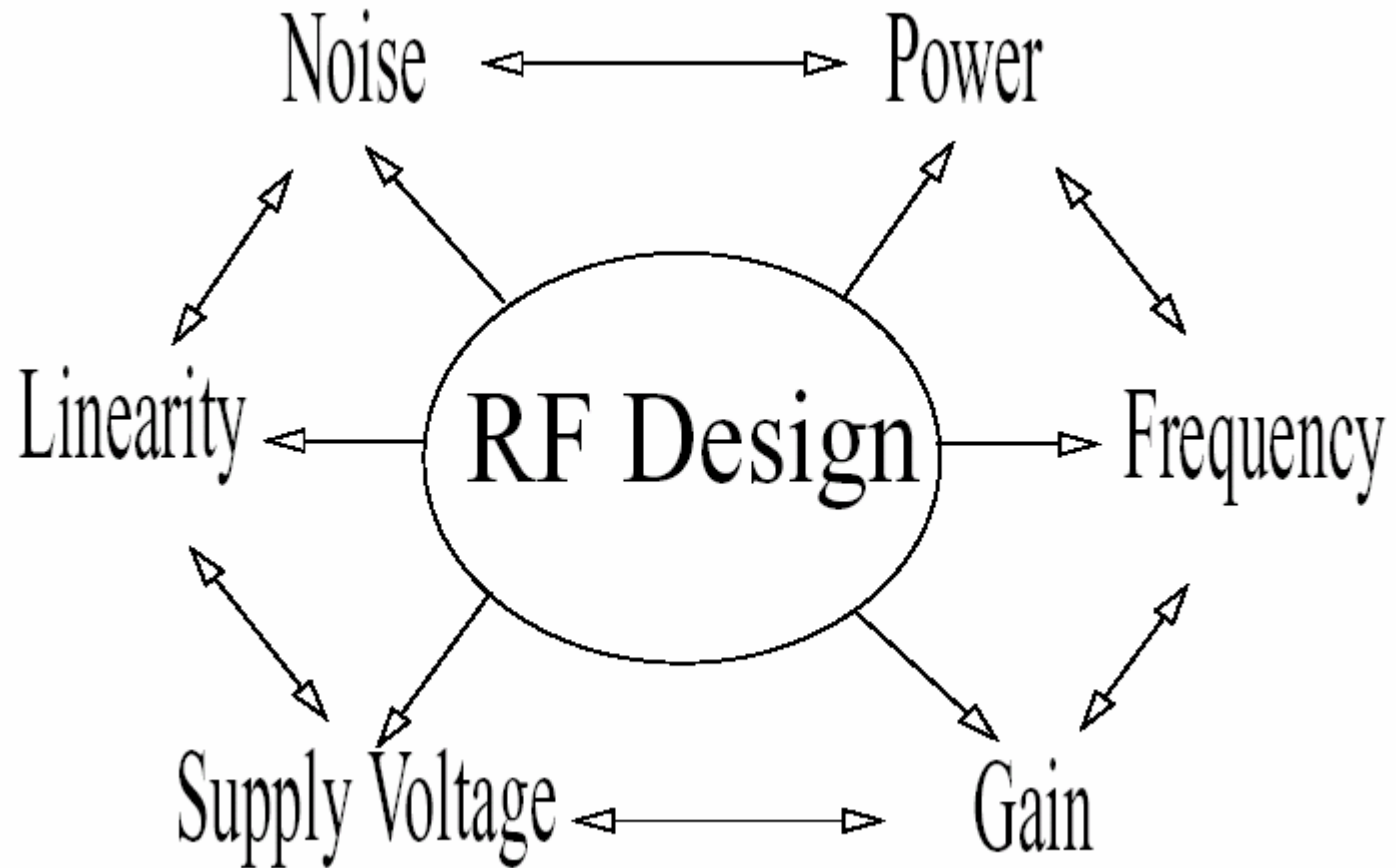
- RF-systemers effektivitet/ytelse
 - Evne til å overføre **effekt**
 - Samtidig benytte en begrenset **båndbredde**
- Systemene kjemper om frekvensbånd
 - RF-filtrering trengs for å skille kanaler
 - Metoder for å skille når enheten sender og mottar
 - TDMA (Time Division Multiplexing Access)
 - FDMA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

RF design

- → **En stor utfordring for konstruktøren!**
- Mange ulike krav og føringer ved RF design
 - Dabrowski 2004 →
- CMOS er en sterk kandidat for implementasjon av sentrale deler i en transceiver!

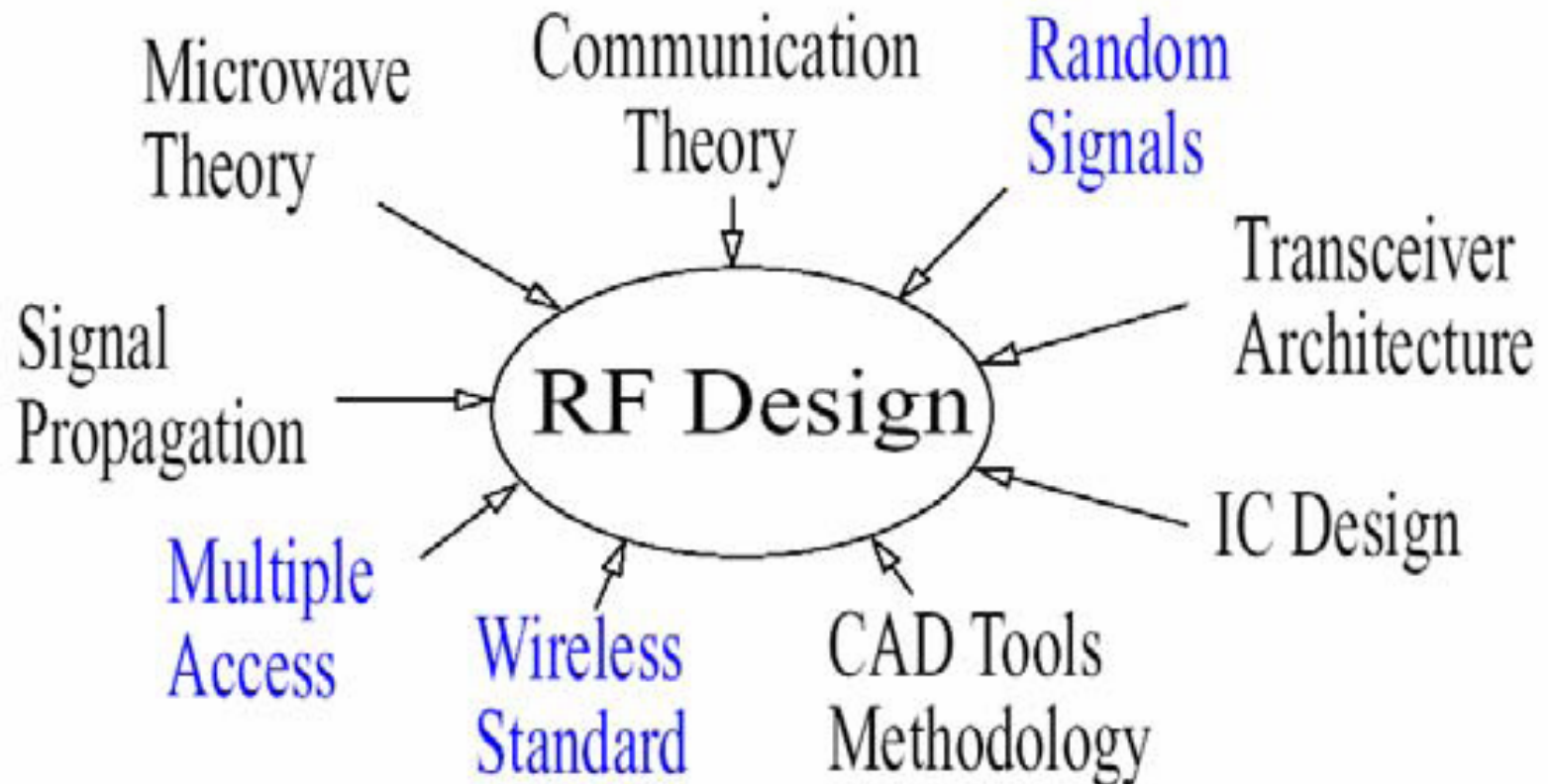
RF Design Hexagon

Multi-objective approach



Disipliner som kreves i RF design

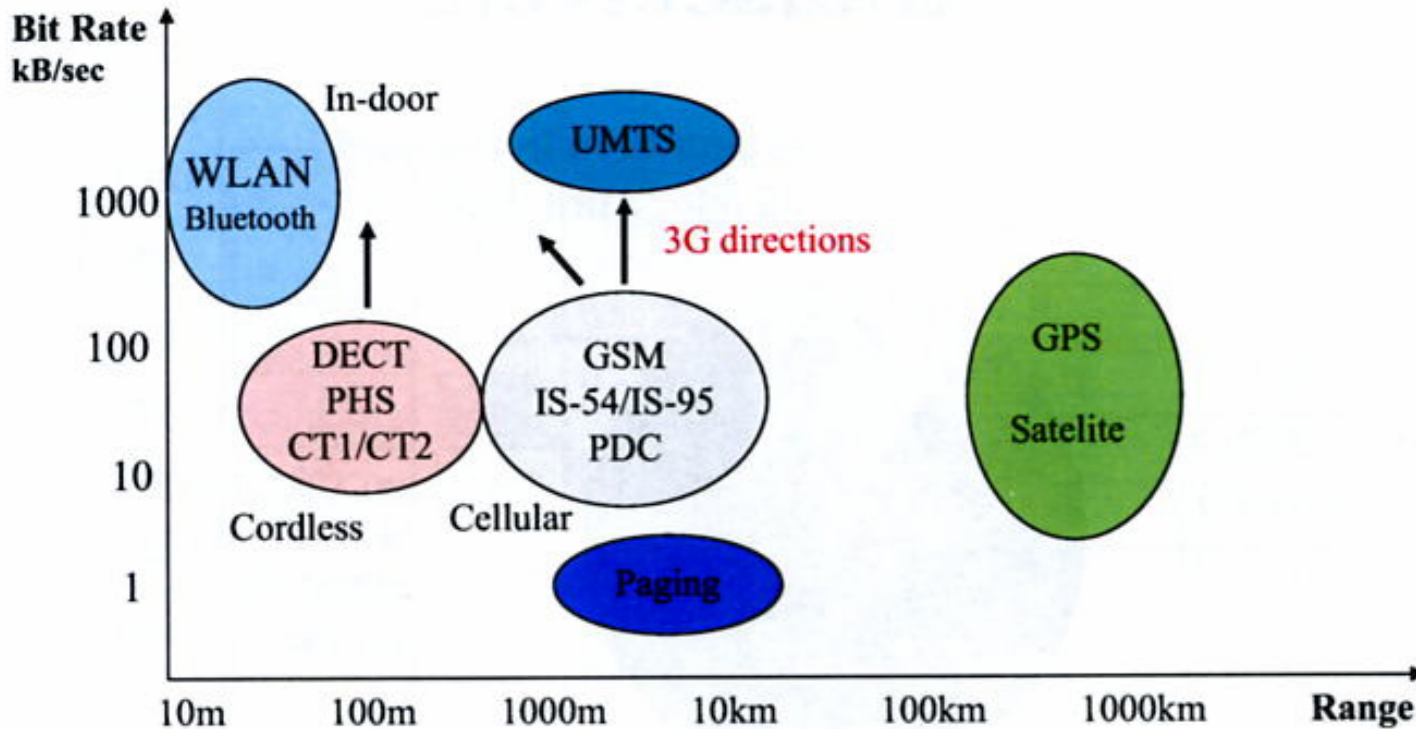
- Dabrowski 2004



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 medførere

- Økt frekvens:

- → kortere bølgelengde

- i vakuum:

$$\lambda \cdot f = c$$

- → signalene varierer over korte fysiske avstander

- spenning V , strøm I er ikke lenger konstante over komponentene

- → fører til krav om mindre komponent-dimensjoner

- høypresisjons-fabrikering

- mikromaskinering

Det er begrensninger ved dagens RF teknologi

- **Dagens RF systemer trenger off-chip komponenter for å oppnå ønskede egenskaper**
 - Filtre
 - Matche-nettverk
 - Oscillatorer for miksing
 - Spoler
 - Variable kondensatorer

Realisering ved dagens metoder

- Aktive komponenter
 - Forsterkere, svitsjer
 - GaAs, bipolar Si, CMOS Si, PIN-dioder
- Passive komponenter
 - R, C, L
- Integrerte komponenter har begrenset ytelse
 - Konvensjonell PIN-diode er ineffektiv ved høye frekvenser
 - RF filtre er vanskelig å implementere (kostbart)
 - krav til høy Q-faktor!
- → I praksis er resultatet **"off-chip" løsninger**
 - Krav om gode komponent-egenskaper: høy ytelse, stor nøyaktighet
 - **Diskrete** krystaller, spoler og kondensatorer må benyttes
 - Systemene tar stor plass
 - Montasje på kretskort
 - Integrerte løsninger er ikke mulig

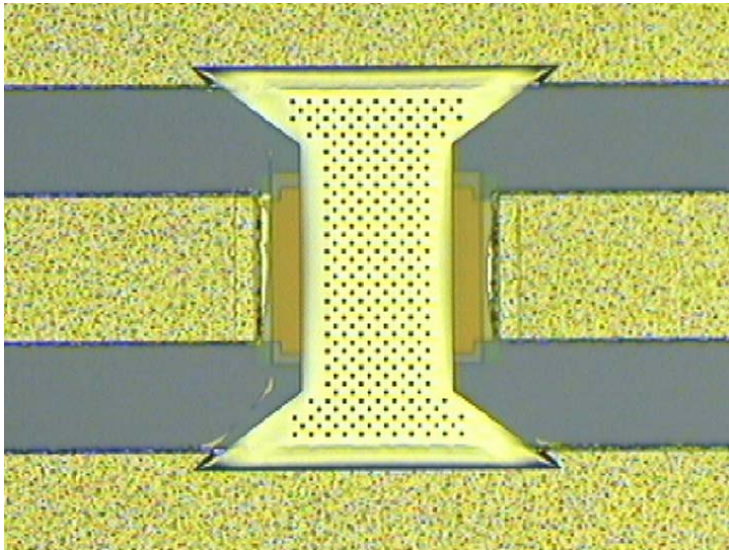
Dagens forelesning

- Bakgrunn – motivasjon
- Opplegg for emnet INF5490
- Introduksjon til temaet
 - MEMS generelt
 - RF-systemer generelt
 - **MEMS i RF-systemer**
- Perspektiv

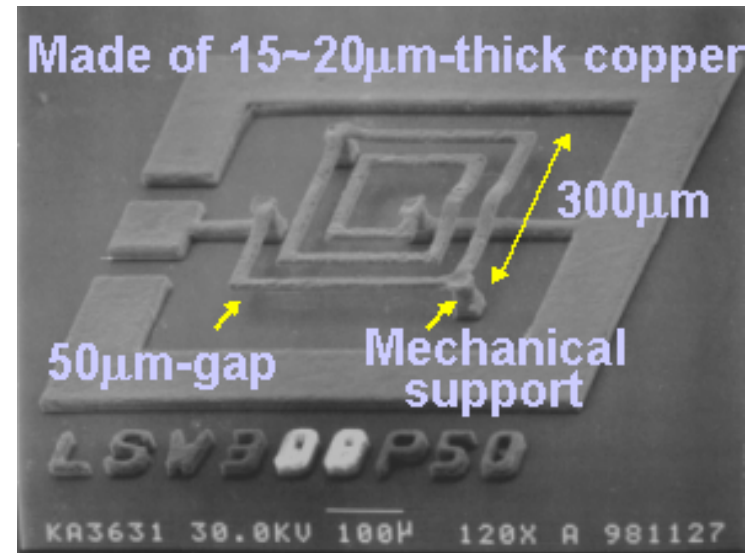
MEMS i RF-systemer

- 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 forsker på RF MEMS
 - Univ of Michigan, Univ of Calif Berkeley, Northeastern Univ, MIT, Columbia Univ, IMEC, LETI
 - Noen bedrifter:
 - Analog Devices, Motorola, Samsung, ST Microelectronics
 - Institutt
 - Sandia, Fraunhofer

Eksempler

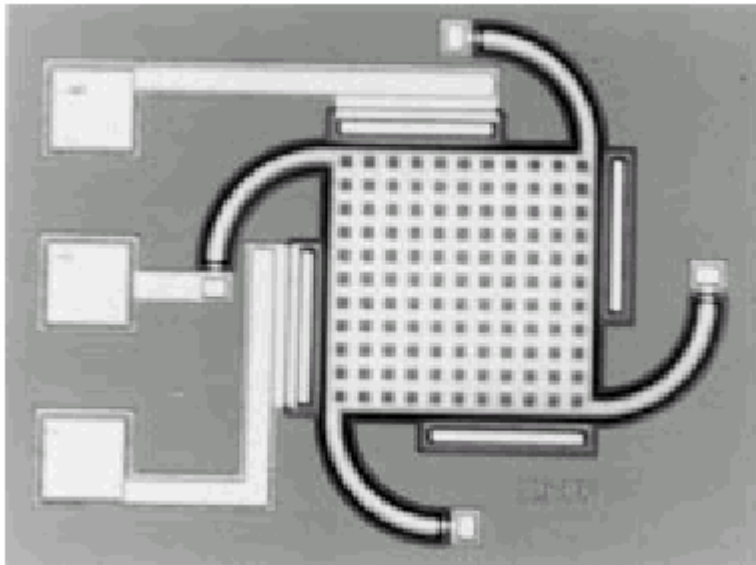


MEMS RF switch

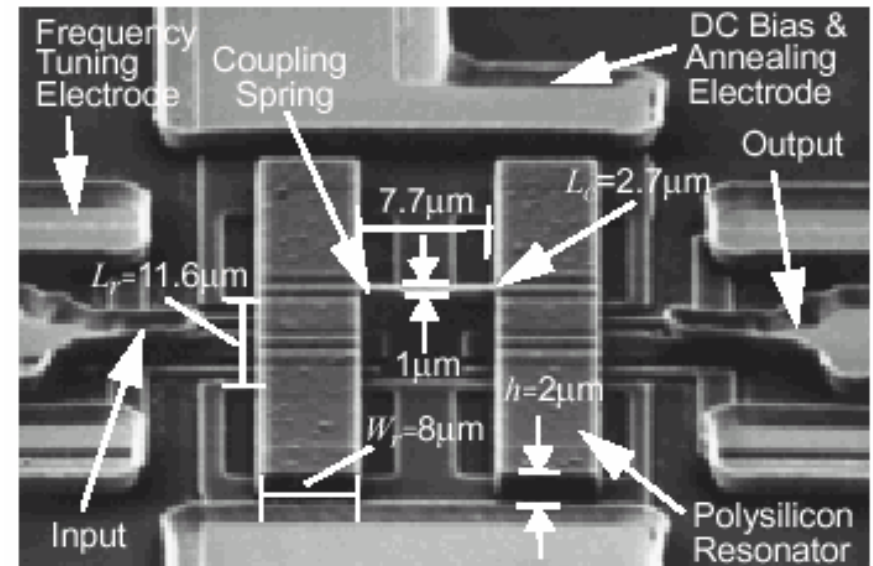


MEMS inductor

Eksempler



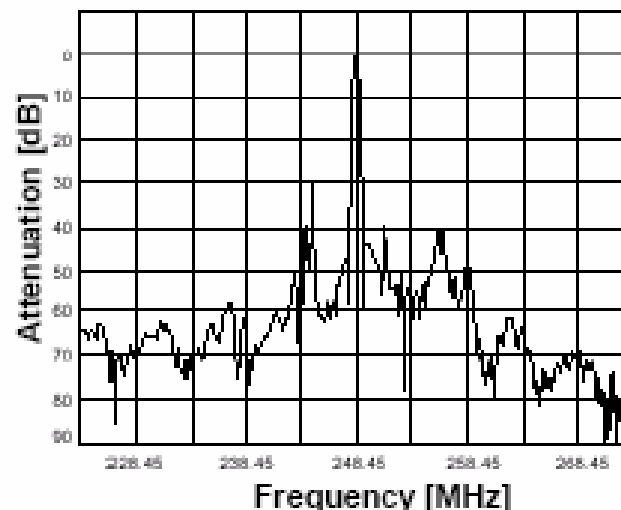
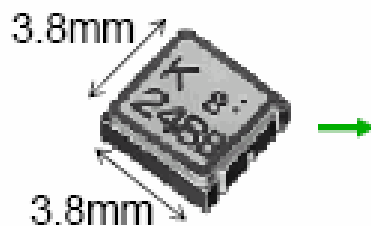
MEMS tunable capacitor



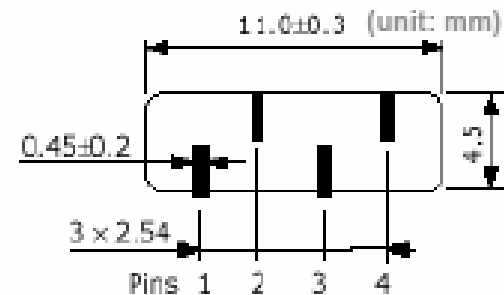
MEMS filter

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



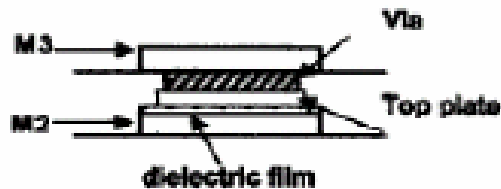
RF filter
 f_0 : 868MHz
 Δf : 600kHz
 Q : ~ 1500

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.

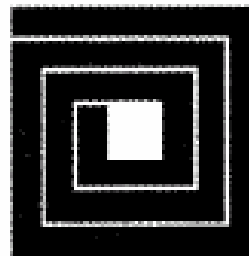
MIM Capacitor

- Low Q (< 100)



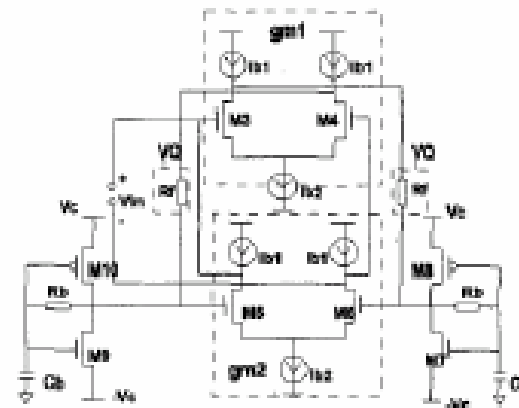
Spiral Inductor

- Low Q (~ 10)
- Low resonant frequency



Active Inductor

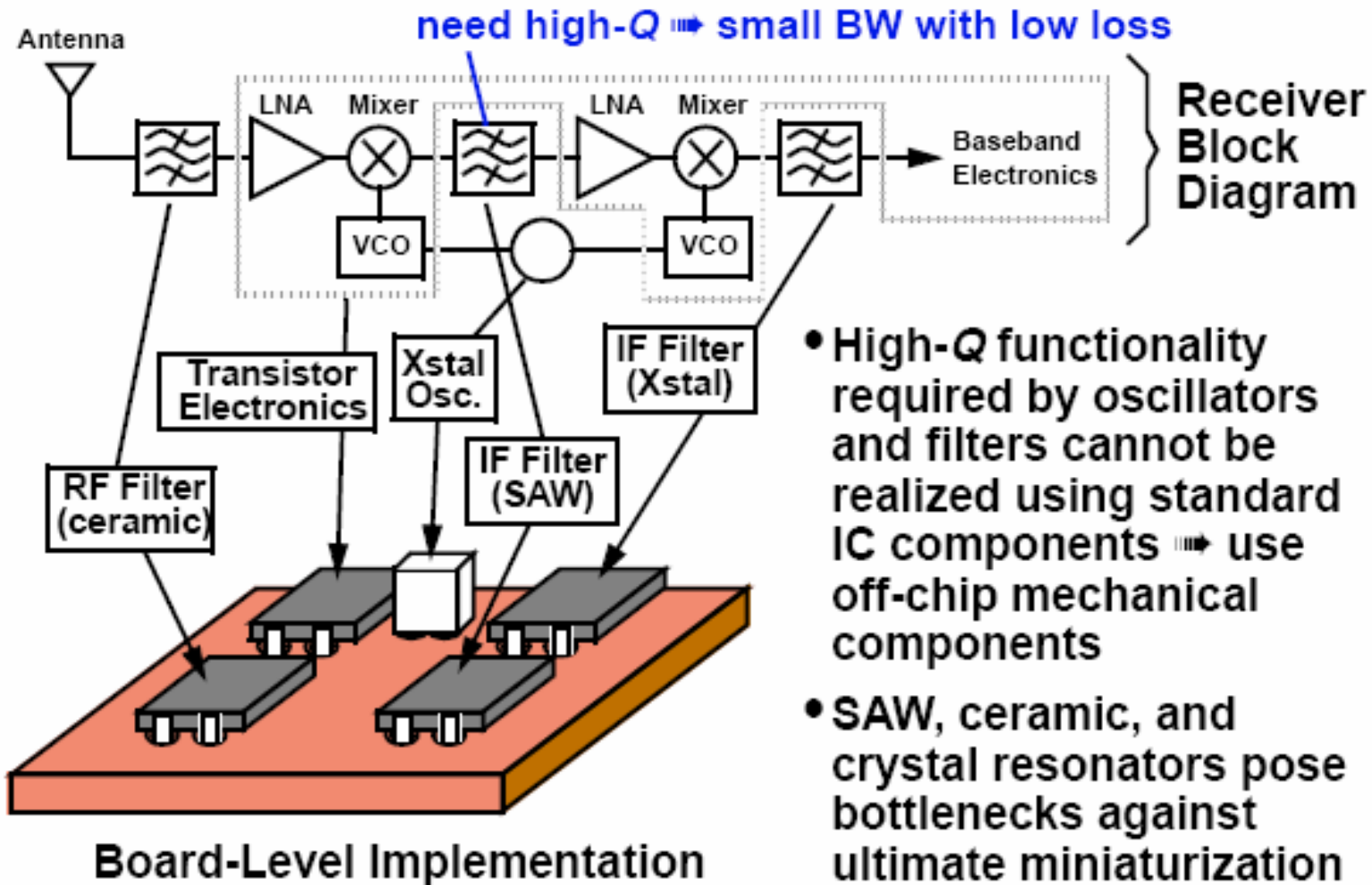
- Large Noise
- High Power consumption



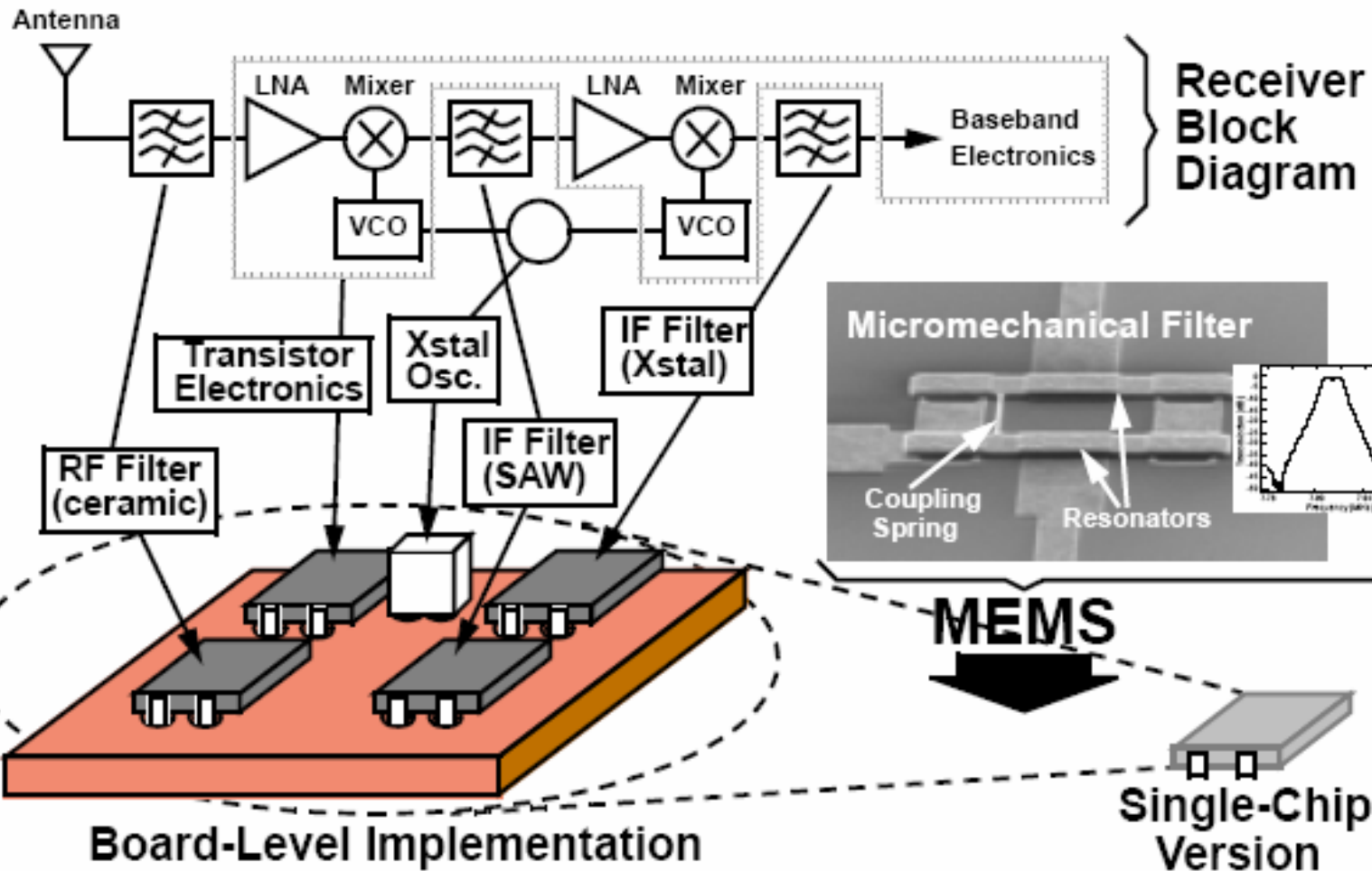
Miniatyrisering av transceiver

- Typisk RF transceiver med diskrete komponenter
 - Prof. Clark T.-C. Nguyen, Univ of Michigan → UC Berkeley
- Hvilke deler kan med fordel erstattes av MEMS?
- 3 slides fra Nguyen →

Miniaturization of Transceivers

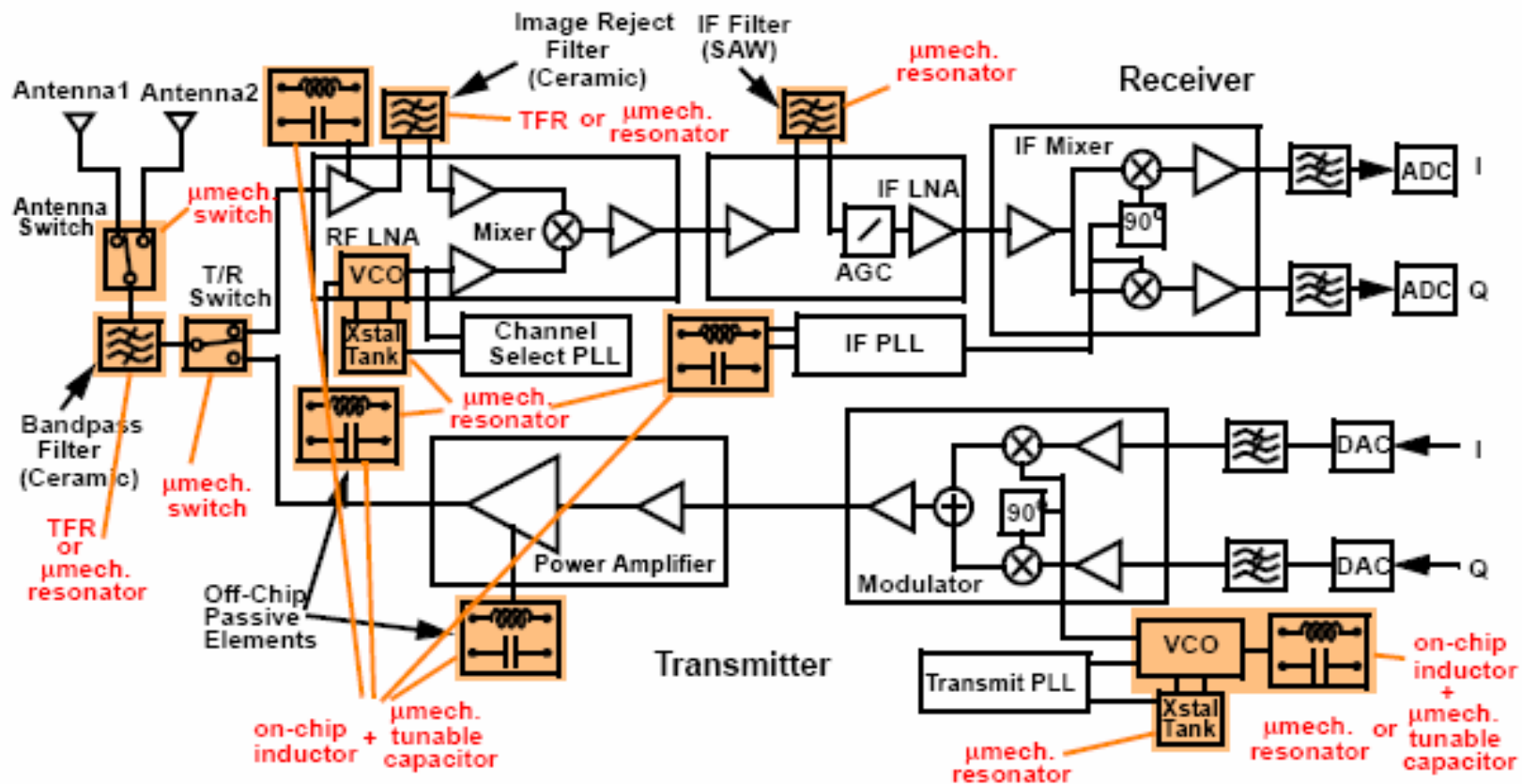


Target Application: Integrated Transceivers



- 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

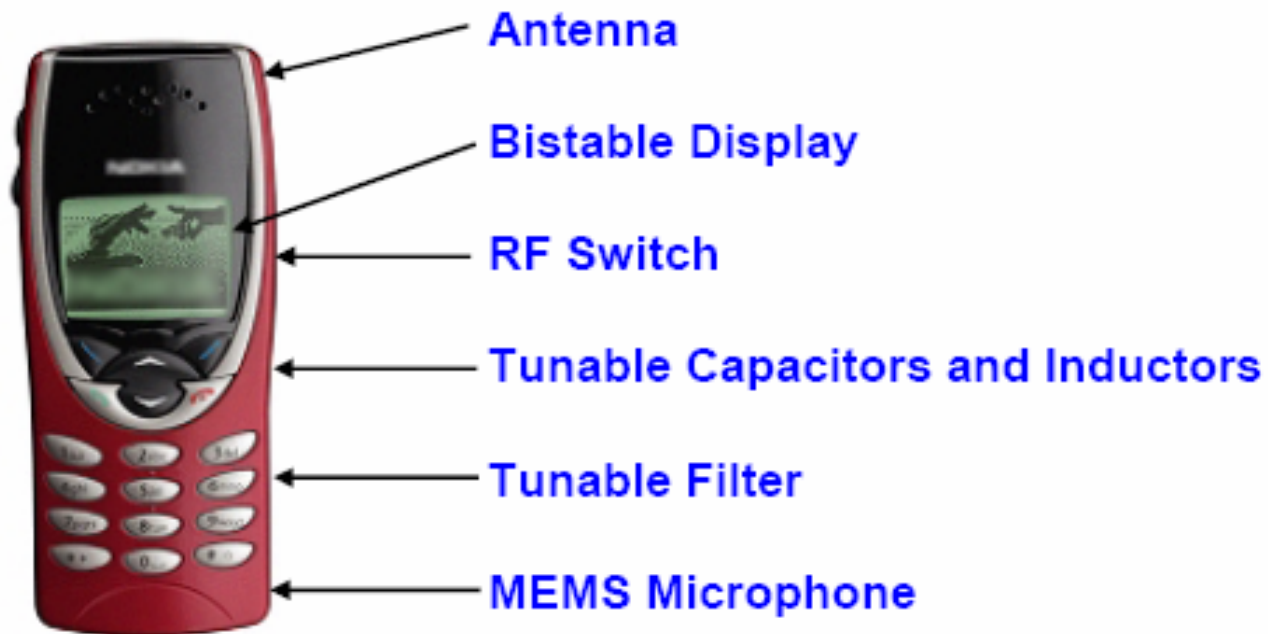
Dagens forelesning

- Bakgrunn – motivasjon
- Opplegg for emnet INF5490
- Introduksjon til temaet
 - MEMS generelt
 - RF-systemer generelt
 - **MEMS i RF-systemer**
- Perspektiv

Perspektiv

- Trådløs (personlig) kommunikasjon ekspanderer
 - 3G systemer og mobile terminaler
 - Multistandard enheter
 - "15 radiosystemer i hver enhet?"
- Trådløse sensor nettverk (WSN)
 - Sensorer overalt
 - kompakte, intelligente
 - "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

- RF MEMS er tema på ledende internasjonale konferanser
 - ISSCC, IEDM (Int. Electron Devices Meeting)
 - Egne MEMS-konferanser og tidsskrifter
 - Se web-siden
- Økt interesse for RF MEMS i industrien
 - Ser store muligheter
 - Miniaturisering, ytelsesøkning
 - MEMS generelt har ikke tatt av!
 - Noen få suksesshistorier: airbagutløser, projektor, skriverhoder

Bruk av RF MEMS

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

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)
- Modularisering av design
 - Mikromaskinerte "lumped components" kan erstatte distribuerte
 - Gir fleksibilitet i integrasjon (enklere modularisering)

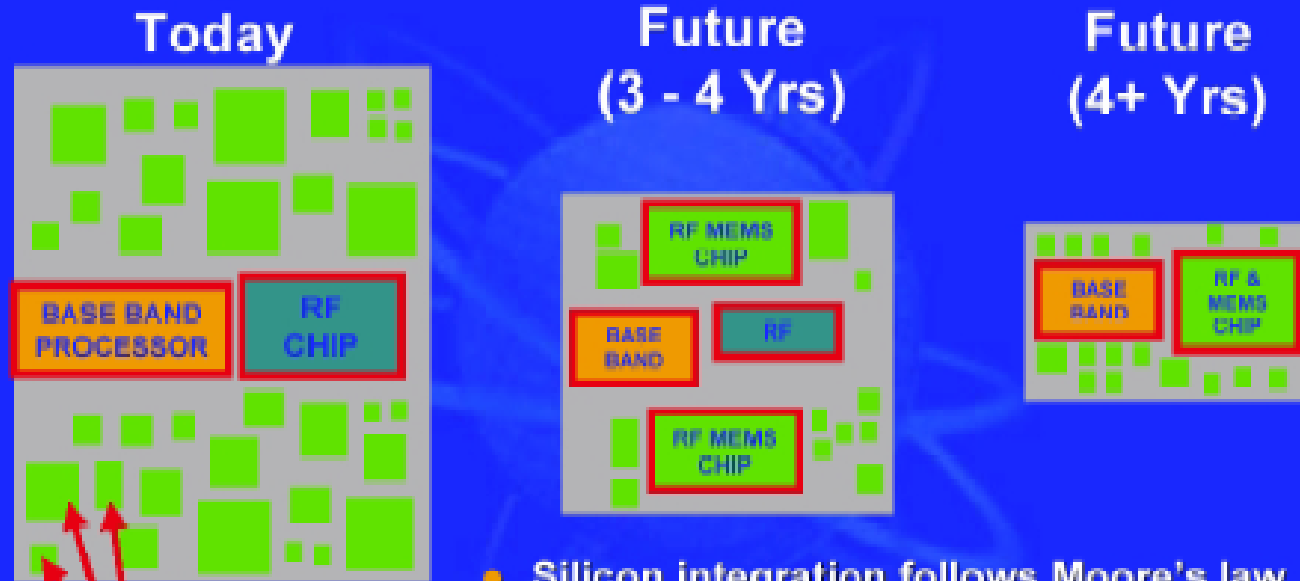
Noen utfordringer for RF MEMS

- Aktiveringshastighet bør økes
 - Svitsjer
- Oppnåelig RF frekvens bør heves
 - Opp til noen få GHz i dag
- RF filterbanker for båndseleksjon
- Pålitelighet
- Pakking
 - Vakuum
 - Moduler av ulike materialer og teknologi
 - SoP – System-on-Package
- **Monolittisk integrasjon**
 - SoC – System-on-Chip

Integrerte løsninger?

- Fremstilling av mikroelektronikk og MEMS har mange fellestrekk
- Kombinasjon av elektronikk og mikromekanikk
 - Integrerte løsninger på Si-skive
 - 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 for metallet
 - MEMS **før** CMOS: store terrengvariasjoner oppstår ved MEMS!
 - Trenger egne "lag" for å jevne ut flaten
 - "planarization"

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