

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

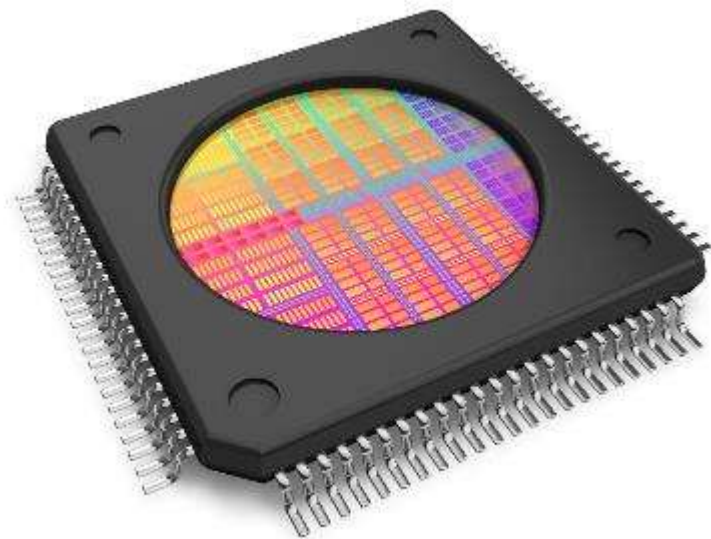
reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



***Polovodičové materiály
a technologie
KET/PMAT***



MEMS technologie

Přednáška 11



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MSMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Co se v přednášce dozvíte?

- DOZVÍTE SE, JAKÝ JE ROZDÍL MEZI MAKRO-, MIKRO- A NANOSYSTÉMEM.
- DOZVÍTE SE, CO OBSAHUJE MIKROSYSTEM A JAK SE MIKROSYSTEMY ROZDĚLUJÍ.
- ZJISTÍTE, CO SE SKRÝVÁ POD ZKRATKOU MEMS.
- DOZVÍTE SE, KDE SE UPLATŇUJÍ SYSTÉMY MEMS.
- ZJISTÍTE, JAKÉ VÝROBNÍ TECHNOLOGIE SE VYUŽÍVAJÍ PRO SYSTÉMY MEMS.
- DOZVÍTE SE, JAK FUNGUJÍ MEMS AKCELEROMETRY A GYROSKOPY.
- ZJISTÍTE, JAK SE SYSTÉMY MEMS POUZDŘÍ.
- DOZVÍTE SE, CO JE BIOMEMS A MOEMS SYSTÉMY.

Mikrosystém

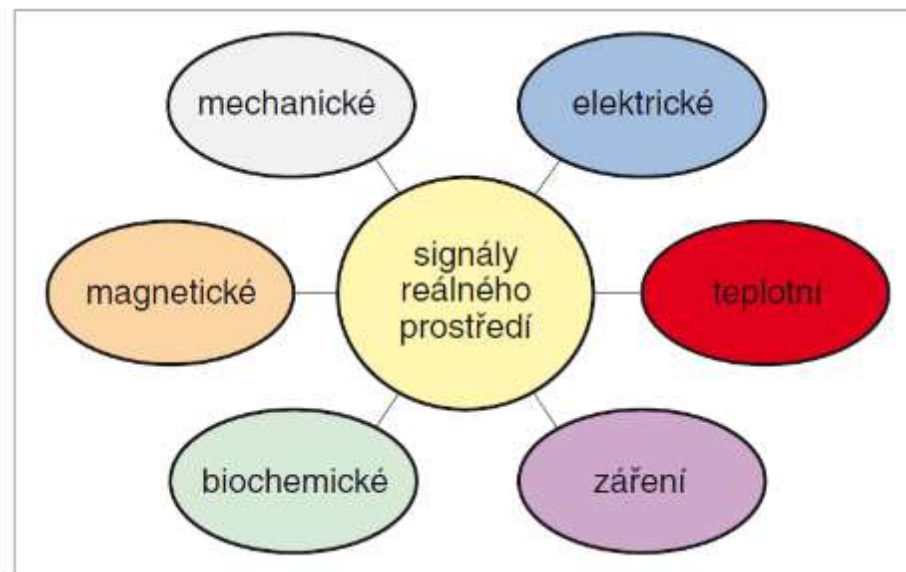
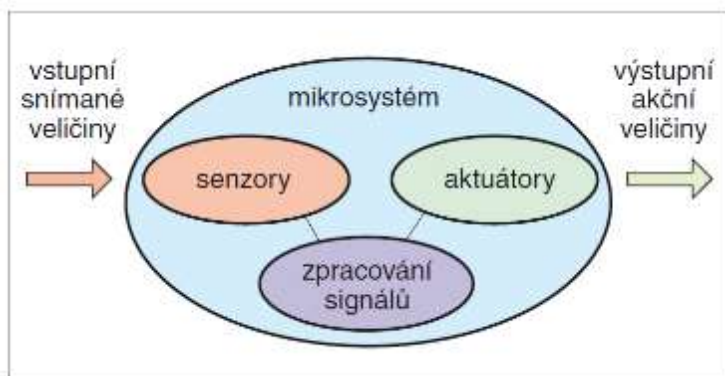
Úvod

- **Makro- a mikrosystém – hranice dána technologickými procesy**
- **Mikro- a nanosystém – kvantově mechanická hranice, hraniční rozměr 100 nm**
- Zmenšování struktur – práh realizovatelnosti, vývoj nových technologií
- Moorův zákon
- Počet prvků na čipu - 4x větší za 3 roky
- Zmenšení rozměrů na polovinu za 3 roky
- Zvětšení plochy čipu 1,5x za 3 roky
- Rozměry systému pod 10 nm
 - Přestávají platit fyzikální zákony
 - Principy fungování nutné řešit na úrovni kvantové fyziky



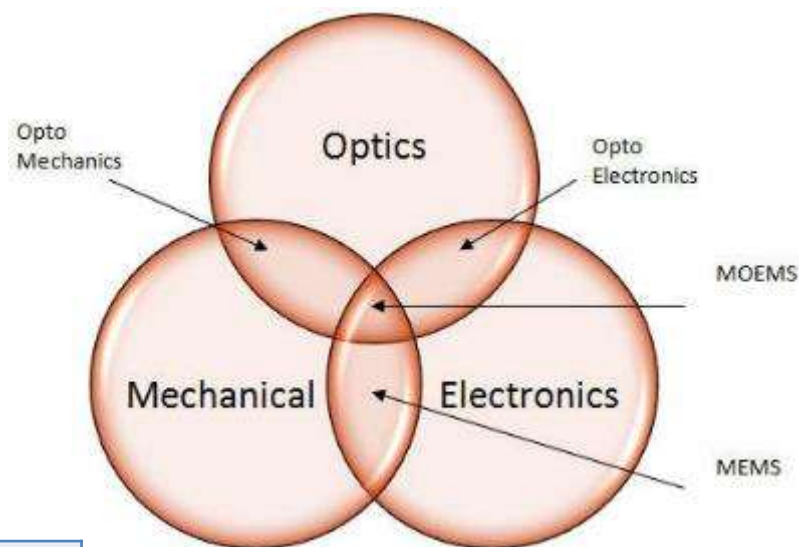
Co je mikrosystém

- **Mikrosystém** – propojení elektrických, mechanických, optických, biochemických, magnetických a dalších signálových prvků na jednom čipu
- Mezioborové uplatnění polovodičových struktur
- **Integrované obvody s fyzikálními nebo biochemickými převodníky** – zpracování neelektrických veličin
- Uspořádání mikrosystému
 - **Snímací část (senzor)**
 - **Zpracování signálů (procesor)**
 - **Akční člen (aktuátor)**



Rozdělení mikrosystémů

- **Vzájemné propojení bloků pracujících s různými signálovými doménami**
- Přednosti mikrosystému
 - Miniaturizace
 - Nízkoenergetické systémy
 - Monolitické nebo hybridní integrace
 - Nové funkce systému
 - Spolehlivost
 - Sériová výroba
 - Nízká cena



MEMS	mikroelektromechanický systém
MOES	mikrooptoelektrický systém
MOMS	mikrooptomechanický systém
MOEMS	mikrooptoelektromechanický systém
BIOMEMS	mikrobioelektromechanický systém

Historie mikrosystémů

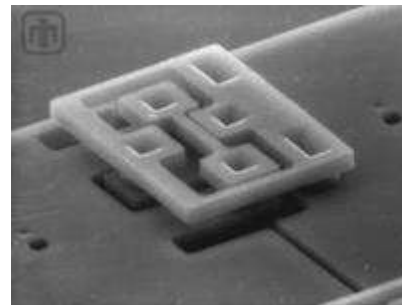
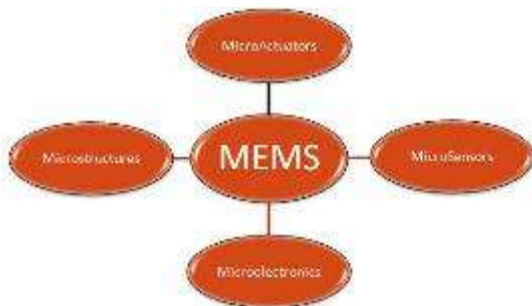
- 1958 – křemíkové tenzometry
- 1961 – křemíkový tlakový senzor
- 1970 – křemíkový akcelerometr
- 1982 – senzor krevního tlaku
- 1988 – první MEMS konference
- 1995 – vývoj BioMEMS



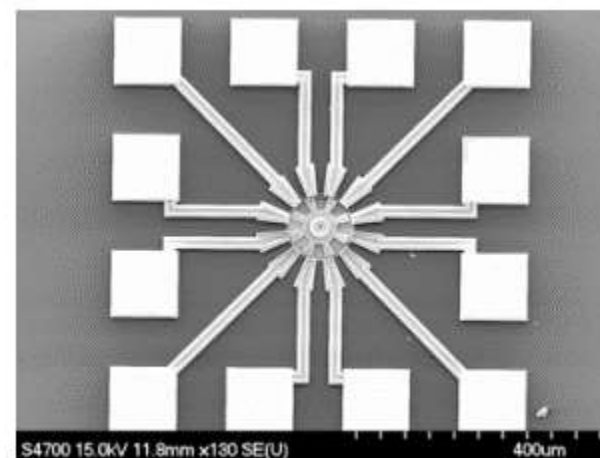
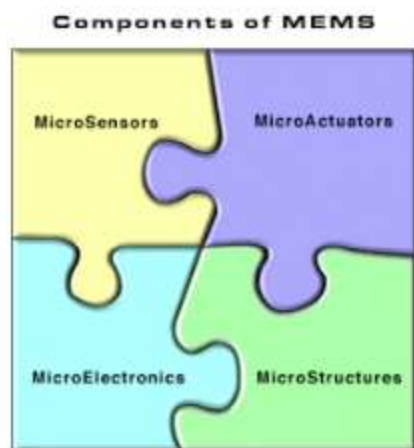
Product	Discovery	Evolution	Cost Reduction/ Application Expansion	Full Commercialisation
Pressure sensors	1954-1960	1960-1975	1975-1990	1990-present
Accelerometers	1974-1985	1985-1990	1990-1998	1998
Gas sensors	1986-1994	1994-1998	1998-2005	2005
Valves	1980-1988	1988-1996	1996-2002	2002
Nozzles	1972-1984	1984-1990	1990-1998	1998
Photonics/displays	1980-1986	1986-1998	1998-2004	2004
Bio/Chemical sensors	1980-1994	1994-1999	1999-2004	2004
RF switches	1994-1998	1998-2001	2001-2005	2005
Rate (rotation) sensors	1982-1990	1990-1996	1996-2002	2002
Micro relays	1977-1982	1993-1998	1998-2006	2006

MEMS technologie

- **MEMS = Micro-Electro-Mechanical Systems** (Mikro-Elektricko-Mechanické-Systémy)
- **Spojení integrovaných obvodů a mikromechanických struktur a jejich vzájemná integrace na jednom chipu**
- Uplatnění v mnoha oborech a odvětvích - elektronika, robotika, strojnictví, chemie, medicína, letectví, automobilový průmysl apod.
 - **Křemíkové mikromotorky, mikromanipulátory, mikroaktuátory, deformovatelná mikrozrcadla, atd.**
 - **Snímače tlaku, akcelerace, záření, elektromagnetického pole, chemických veličin, atd.**
- Využití v běžných přístrojích domácí potřeby, aniž o tom často tušíme



- Integrace mechanických elementů, senzorů, akčních členů, řídicí a vyhodnocovací elektroniky na jeden křemíkový substrát prostřednictvím různých výrobních technologií
- Elektronické části jsou vyráběny "tradičními" technologiemi typu CMOS, Bipolar nebo BiCMOS
- **Mikromechanické části** jsou zhotovovány prostřednictvím **technologií selektivního leptání nebo implementováním nových/dalších vrstev**
- Plně monolitická integrace MEMS s řídicí elektronikou a obvody pro zpracování signálu na substrátu CMOS, tzn. bez nutnosti přidávat/implantovat další vrstvy jiného složení

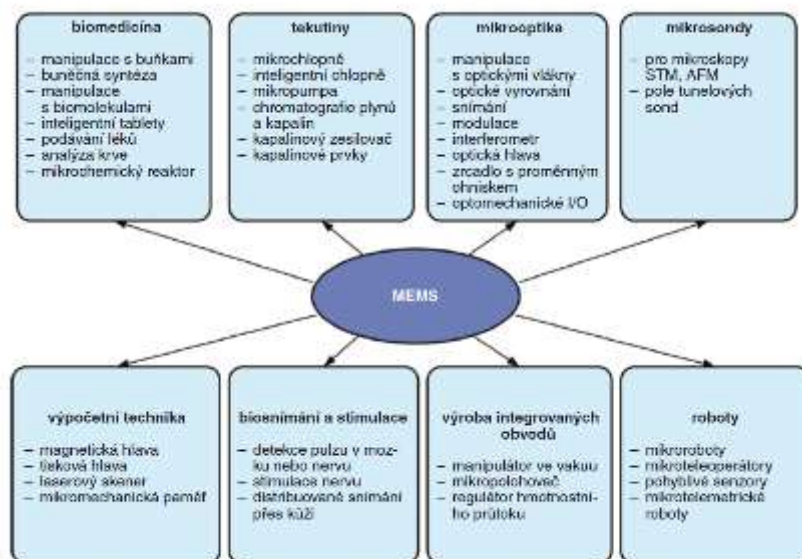


Oblasti využití MEMS

- Výhoda mikromechanických součástek
 - **Menší rozměry**
 - **Rychlejší reakce**
 - **Přesnější vyhodnocení signálů**
 - **Vyšší citlivost**
- Vznik nových výrobních technologií
- MEMS – **eliminují potřebu diskrétních součástek**

Nejčastější MEMS produkty

senzory tlaku
akcelerometry
gyroskopy
senzory průtoku
infračervené senzory
náklonoměry
senzory pro chemickou analýzu
biometrické senzory
biomedicínská diagnostika
kardiostimulátory
naslouchadla
čtecí a zapisovací hlavy
inkoustové tryskové hlavy
mikrodispleje
dávkovače léčiv
optické myši
magneto-optické hlavy
mikrospektrometry
optické mikroaktuátory (MOEMS)
mikrovlnné RF-MEMS
mikromotory

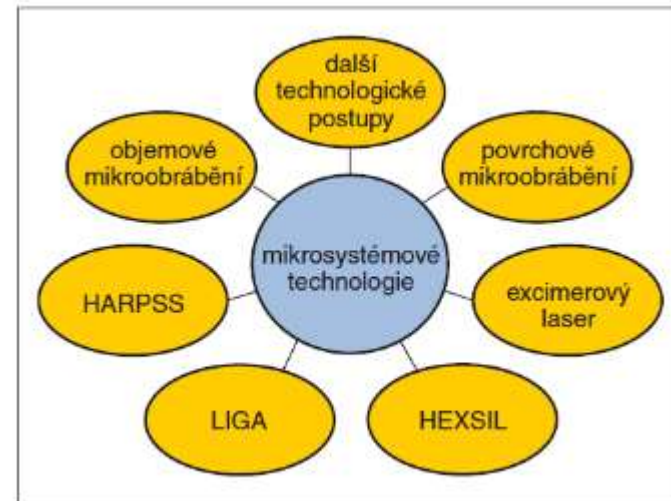


Oblasti využití
MEMS

MEMS výrobní technologie

- Technologie umožňující **vytváření prostorových struktur mikrosystémů (3D)**
- **Kompatibilita s klasickými mikroelektronickými technologiemi** – integrace mikrostruktur na jednom čipu
- Používané materiály pro **nosné substráty**: Si, GaAs, InGaAs, AlGaAs, GaN, AlGaN, LiNbO₃, sklo, polymery, keramika
- **Materiály pro výplně a tenké filmy**:
 - Monokrystalický, polykrystalický a amorfnní křemík
 - Sloučeniny křemíku – Si_xN_y, SiO₂, SiC
 - Kovy a sloučeniny kovů – Au, Cu, Al, ZnO, GaAs
 - Keramika – Al₂O₃
 - Organické materiály

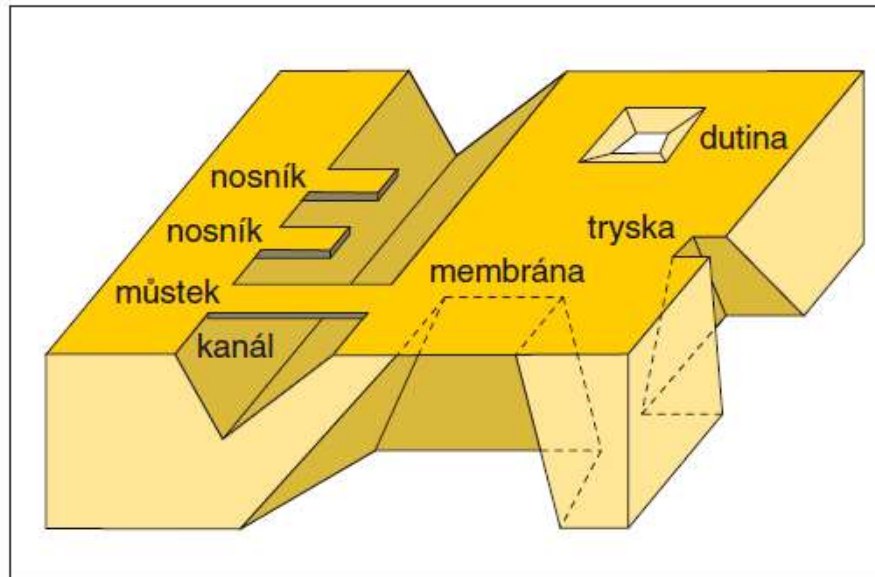
Technologie používané
pro realizaci MEMS



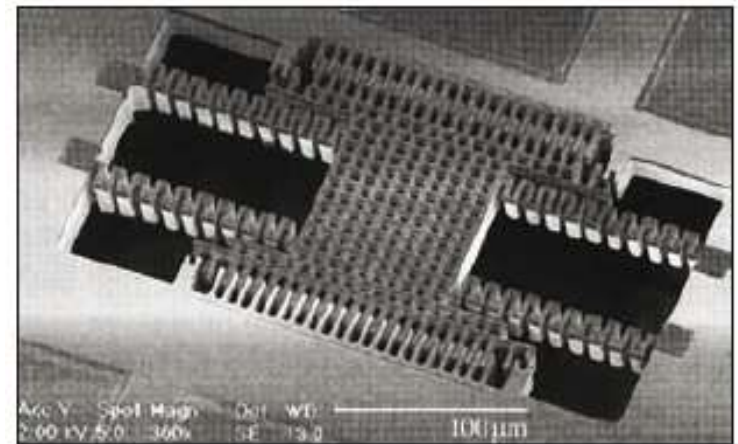
Objemové mikroobrábění

(bulk micromachining)

- **Tvarování struktury z objemu** základního materiálu **bez obráběcího nástroje**
- Různé technologické operace – **selektivní odstranění určitých částí substrátu**
- Vytváření různých komponentů MEMS: **nosníky, membrány, destičky**
- **Izotropní a anizotropní mokré leptání**
- **Suché leptání** - RIE (Reactive Ion Etching), DRIE (Deep Reactive Ion Etching), SCREAM (Single Crystal Reactive Etch and Metallization), post-CMOS



Hřebenový aktuátor – post-CMOS technologie

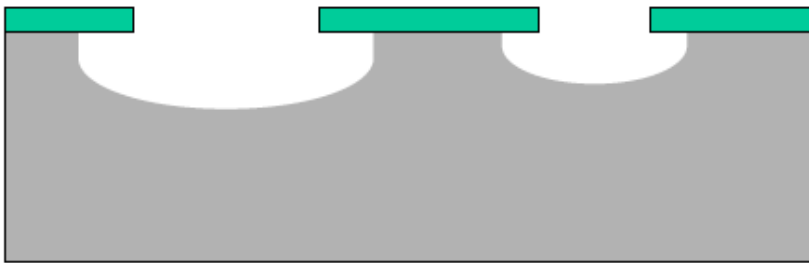


Geometrické motivy vytvořené
objemovým mikroobráběním

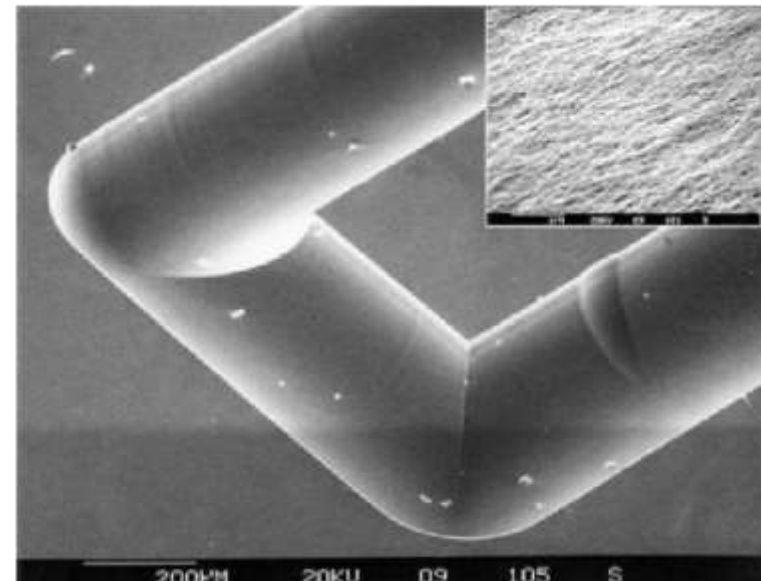
Izotropní leptání

(Isotropic Wet Etching)

- **Rychlost leptání ve všech směrech stejné** – amorfní materiály (sklo)
- Leptací činidlo závisí na typu substrátu – HF, HNO₃, CH₃COOH



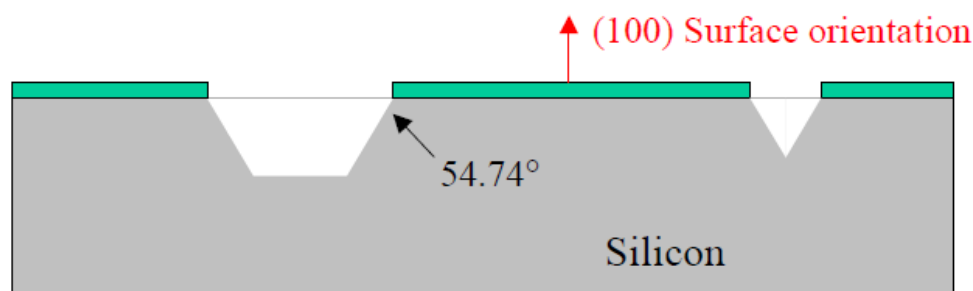
Leptání ve všech směrech



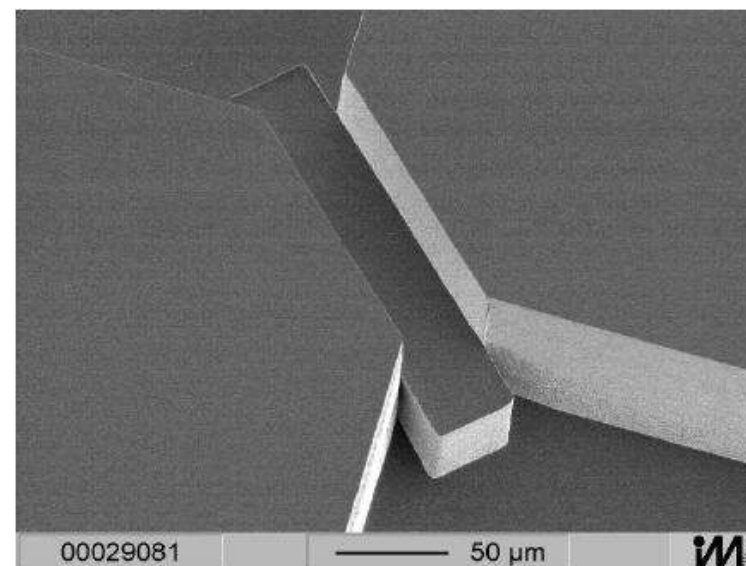
Mikrokanál vyrobený izotropním leptáním

Anizotropní mokré leptání (Anisotropic Wet Etching)

- Rychlost leptání závislá na krystalografických rovinách
 - Krystalické substráty – např. Si
 - Dutiny se vytváří podél určitých rovin
- Leptací činidla se liší podle leptaného materiálu
 - KOH – hydroxid draselný
 - EDP – etylendiaminpyrotechol
 - TMAH – terametylamonium hydroxid



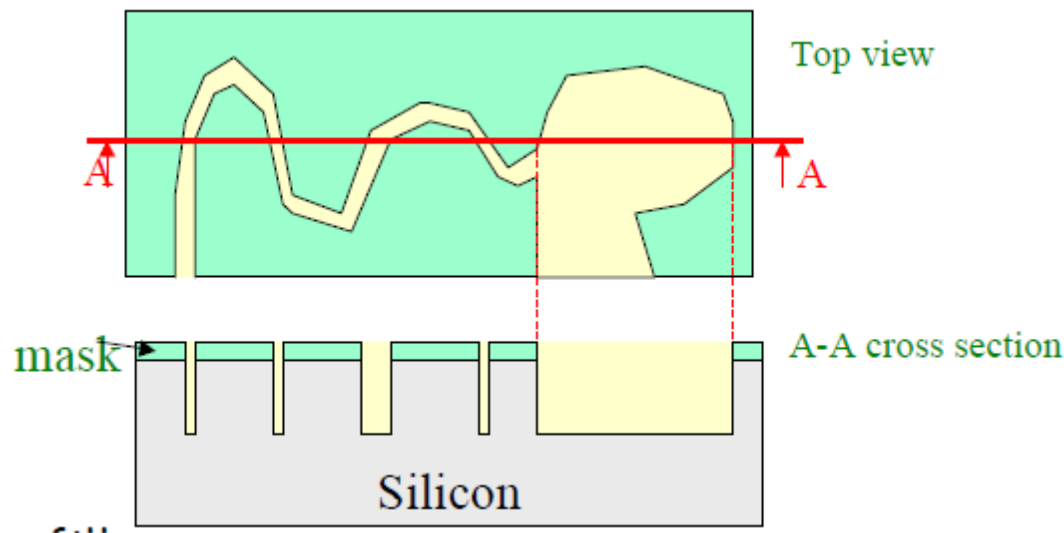
Leptání v krystalové rovině 100, v krystalové rovině 111 nedochází k leptání



Struktura vyrobená anizotropním leptáním

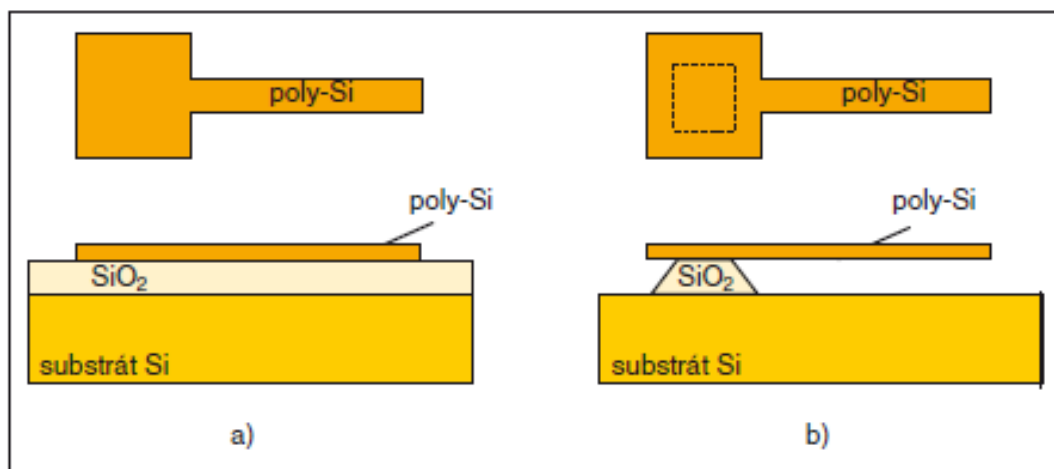
Suché leptání

- **RIE** – Reactive Ion Etching
 - **Selektivní plazmatické leptání**
 - Plazma – vysoce ionizovaný plyn
- **DRIE** – Deep Reactive Ion Etching
 - **Vytvoření většího poměru hloubka/šířka**
 - Postupné ovrstvování hran polymerem k zamezení leptání
 - Možnost vyplnění otvorů jiným materiálem

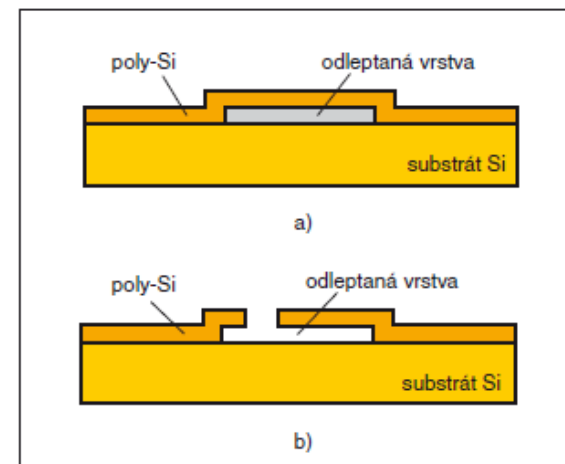


Povrchové mikroobrábění (surface micromachining)

- **Vytvoření pohyblivých struktur na povrchu substrátu** – tenké vrstvy na povrchu substrátu
 - Postupná depozice tenkých vrstev
 - Suché a mokré leptání
- **Složité struktury extrémně malých rozměrů** - akcelerometry, gyroskopy, mikrozrcátka, optické spínače, radiofrekvenční spínače
- Jednoduchá integrace struktury s elektronickými obvody



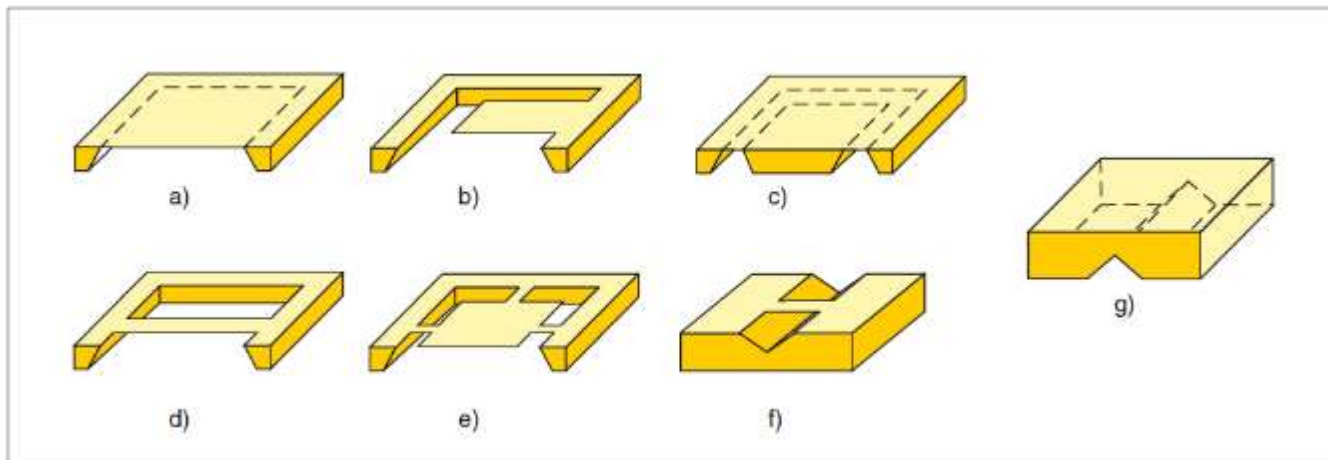
Mikronosník vytvořený povrchovým mikroobráběním



Povrchové mikroobrábění – realizace komorové struktury

Povrchové mikroobrábění (surface micromachining)

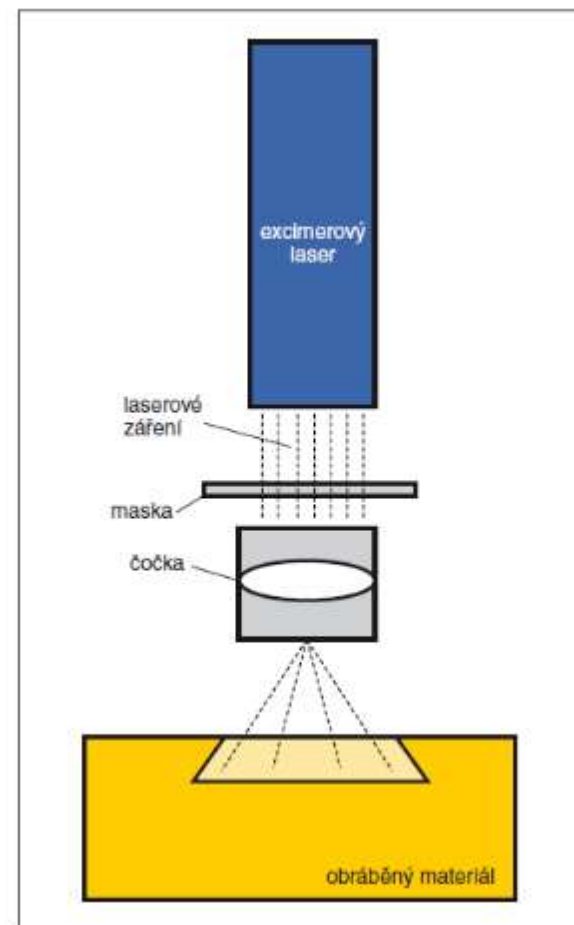
- Realizace struktur pro mikrosenzory a mikroaktuátory
- **Membrány, mikronosníky, membrána se seismickou hmotou, mikromůstky, zavěšená membrána, mikrokanálek, kryt**
- **Společná integrace s elektronickými obvody**
 - Zvýšení funkčnosti a spolehlivosti systému
 - Jen jedno pouzdro
 - Zmenšení rozměrů
 - Zvýšení využitelnosti systému



Typické struktury realizované povrchovým mikroobráběním

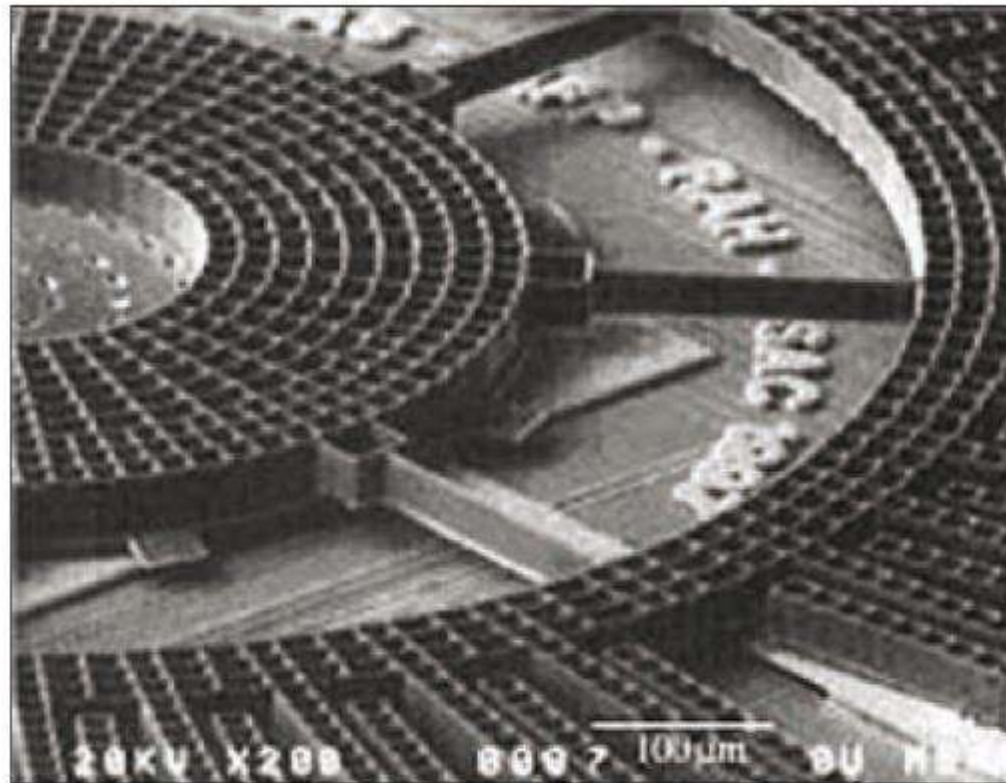
Další způsoby mikroobrábění MEMS struktur

- **Objemové a povrchové mikroobrábění**
 - Velké množství nejrůznějších geometrických tvarů
 - Nemožnost realizace struktur s velkým poměrem vertikálních a horizontálních geometrických tvarů (HARM - High Aspect Ratio Micromachining)
- **Technologie HEXSIL, HARPSS, LIGA**
- **Technologie obrábění excimerovým laserem**
 - Odstranění materiálů pomocí laserového paprsku v pulsním režimu
 - Přesné řízení množství odstraněného materiálu, hloubky (stovky μm) a geometrického tvaru
 - Zaměřování paprsku speciální optikou – vytvoření 3D struktury se šikmými hranami
 - Obrábění organických materiálů, plastů, polymerů



HEXSIL (HEXagonal honeycomb polySiLicon)

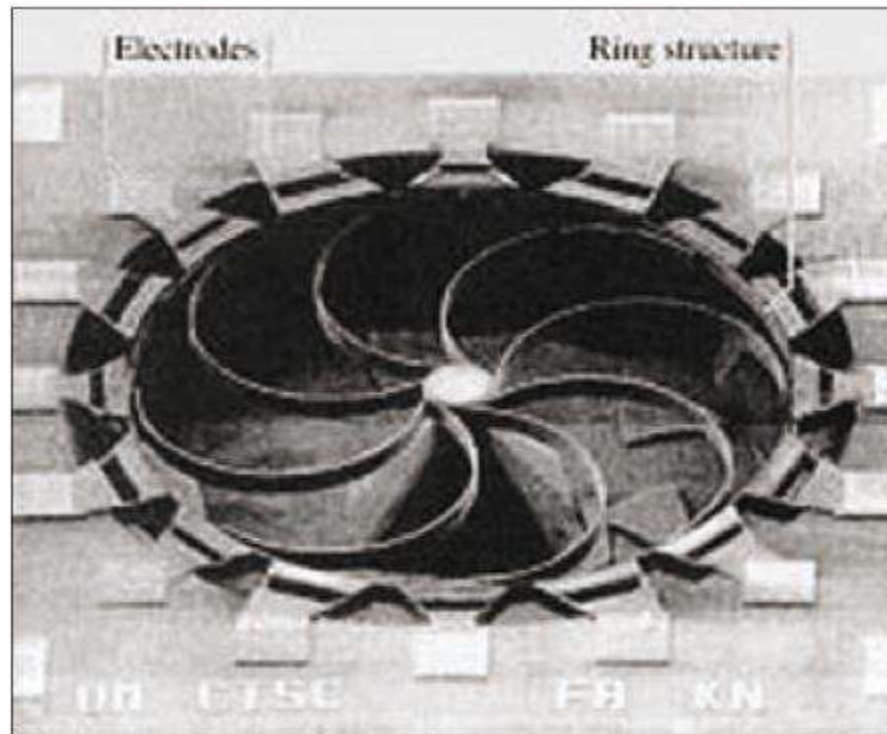
- Struktury vytvořené leptáním - DRIE, leptání fluorovodíkem
- **Velký poměr hloubka/šířka**



Úhlový mikroaktuátor vyrobený technologií HEXSIL

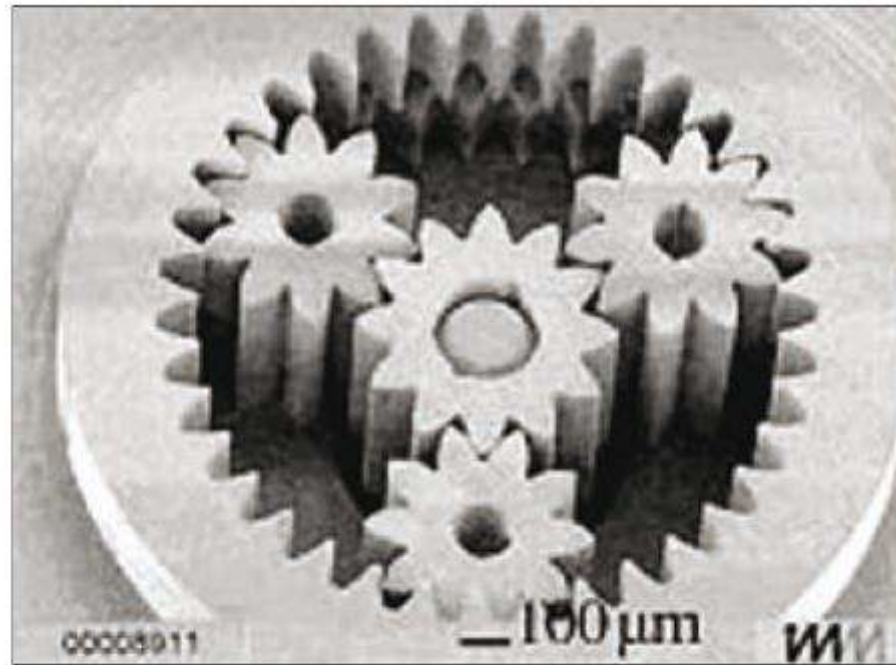
HARPSS (High Aspect Ratio combined with Poly and Single-crystal Silicon)

- Realizace elektricky izolovaných polykrystalických a monokrystalických křemíkových mikrostruktur s kapacitní vzduchovou mezerou
- **Umožňuje vyrobit struktury s malou vertikální mezerou**
- Gyroskopy, RF rezonátory



Mikrogyroskop vyrobený technologií HARPSS

- 3D tvarování kovů, plastů, keramiky a skla
- Vytváření mikrostruktur velmi jemných tvarů
- Využití litografie, elektrolytické pokovování a lisování
- **Struktury s výškou až 1000 μm**
- **Mezera 0,25 μm**

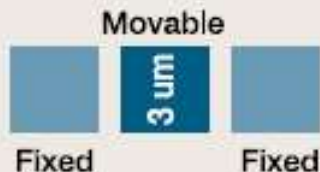


Mikropřevodovka vyrobená technologií LIGA

Porovnání výrobních technologií MEMS

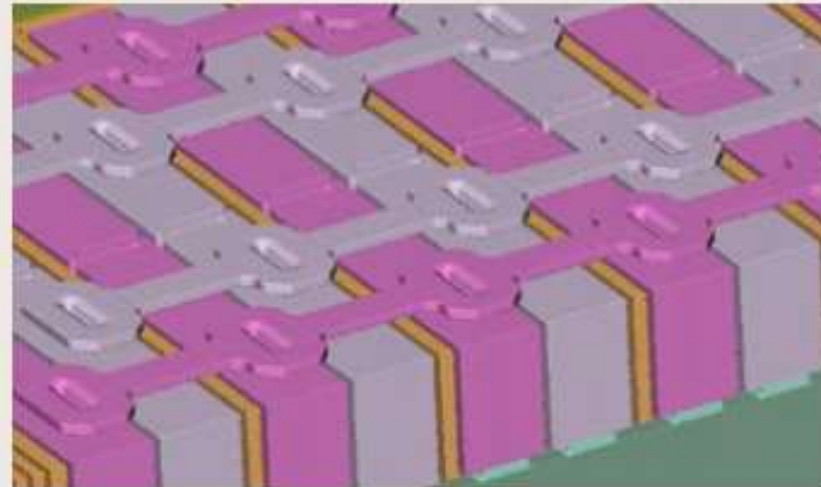
Poly-Si MEMS Technology

Finger cross section
with slight squeeze film
damping



HARMEMS Technology

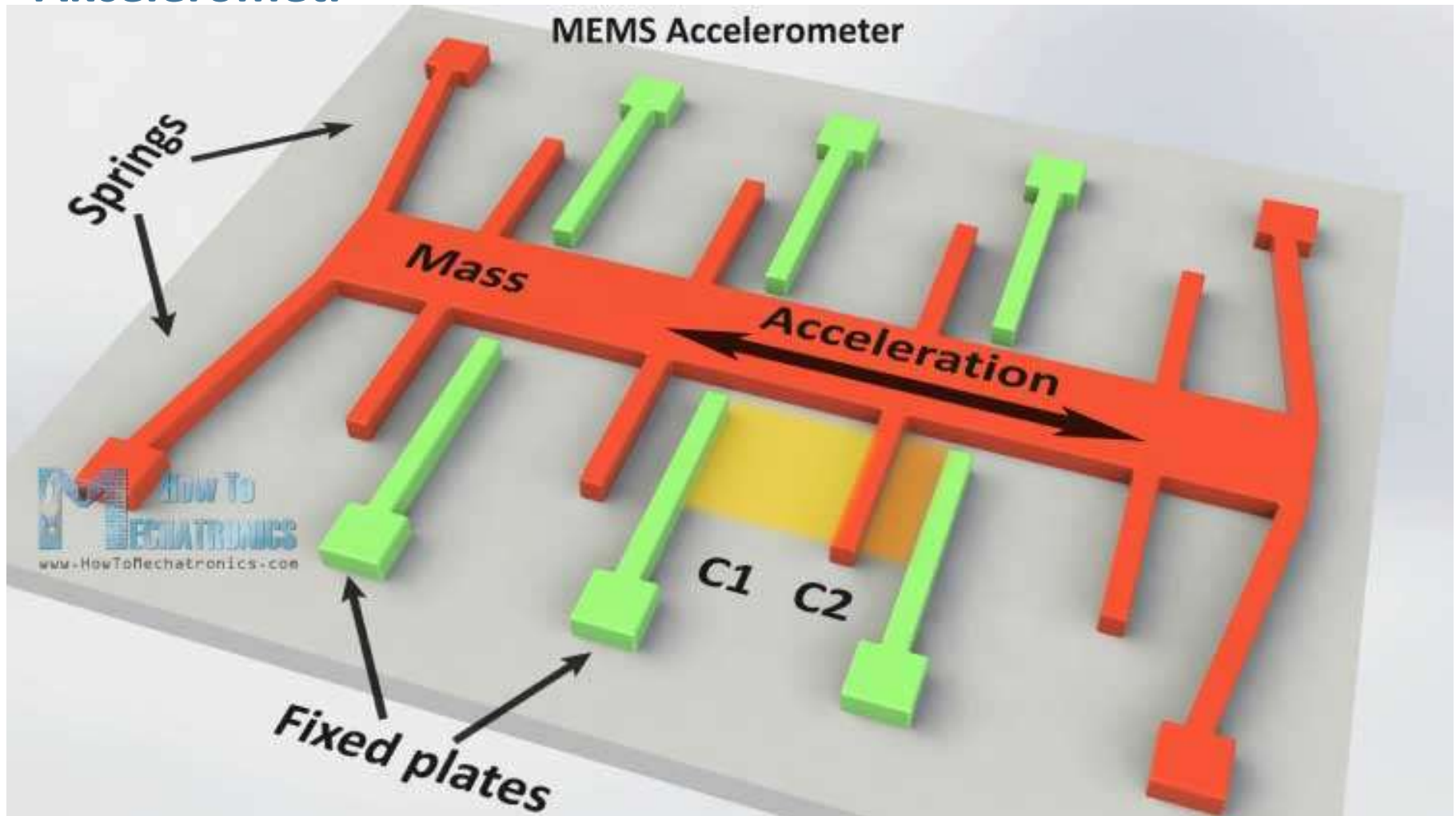
Finger cross section with squeeze film damping



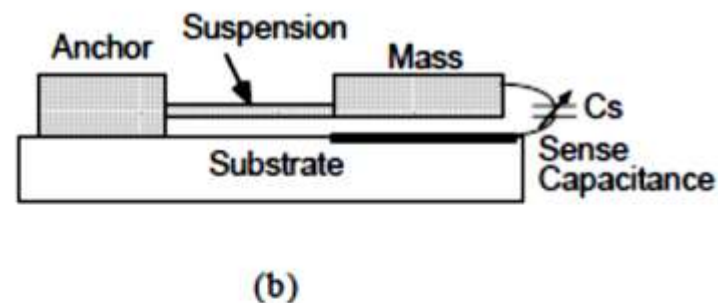
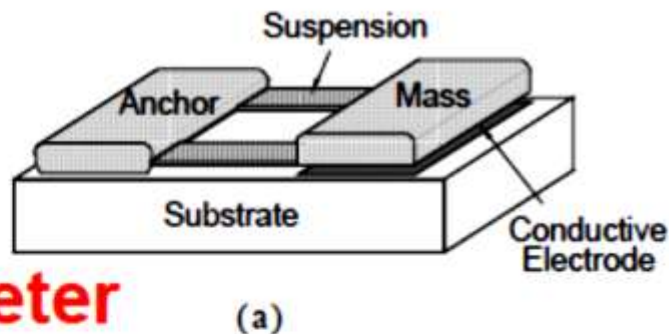
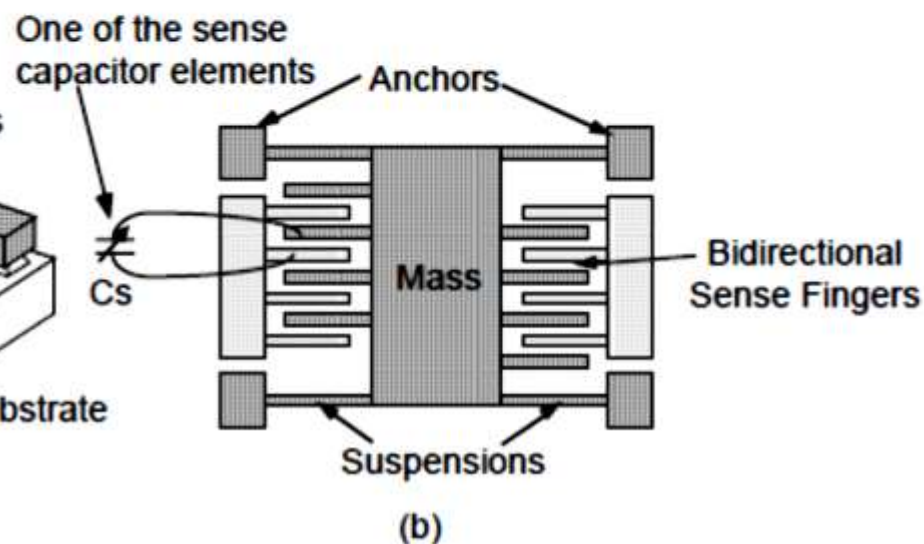
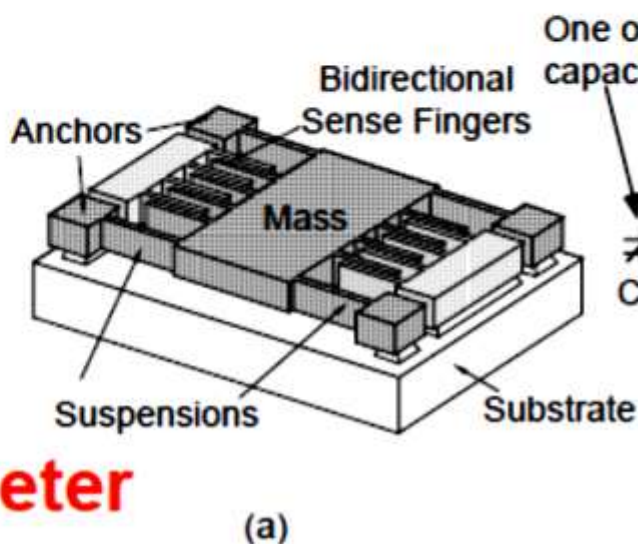
HARMEMS technology has a 25 um movable element thickness designed to attenuate sensor resonant frequency for robust accuracy in automotive safety applications

Příklady MEMS

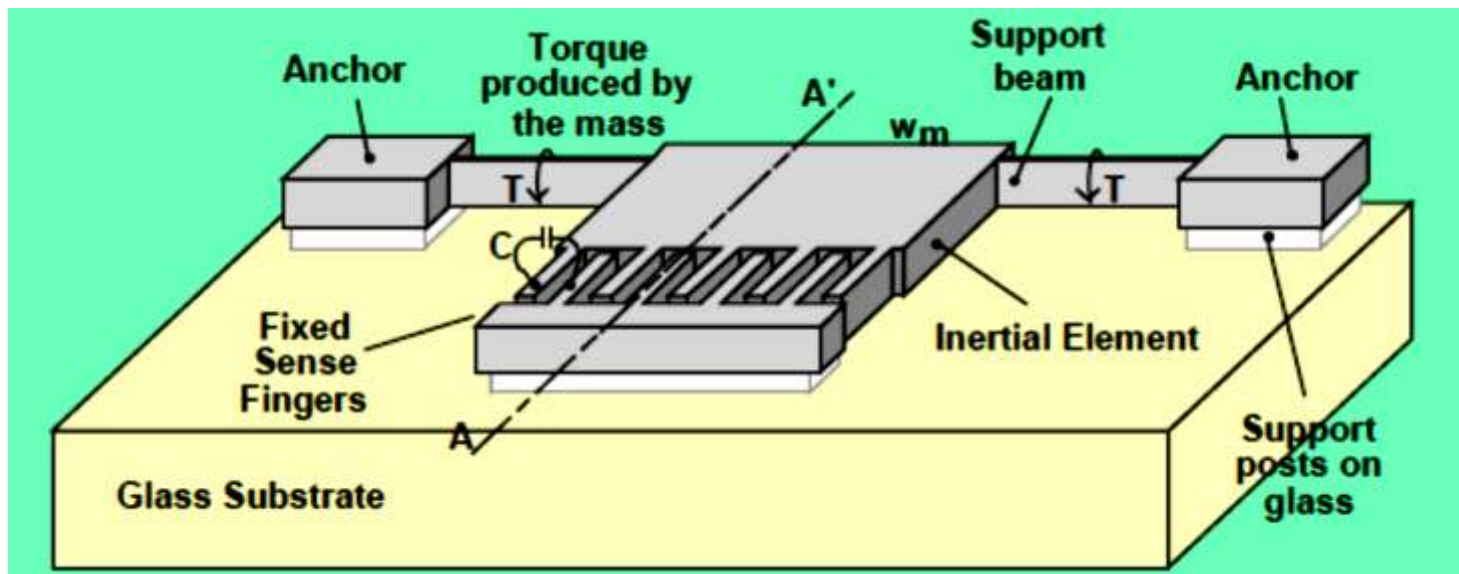
Akcelerometr



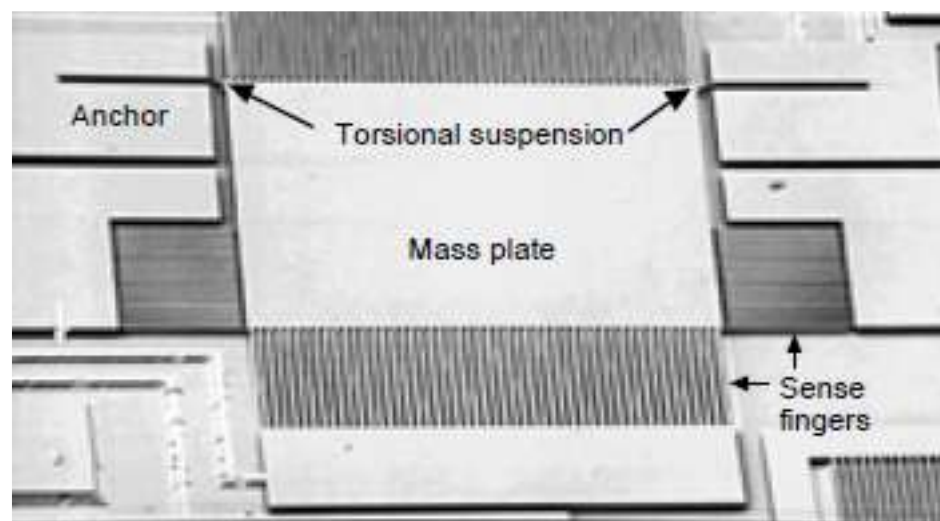
Akcelerometr

Vertical
accelerometerLateral
accelerometer

Akcelerometr

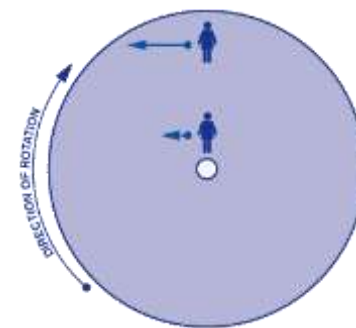
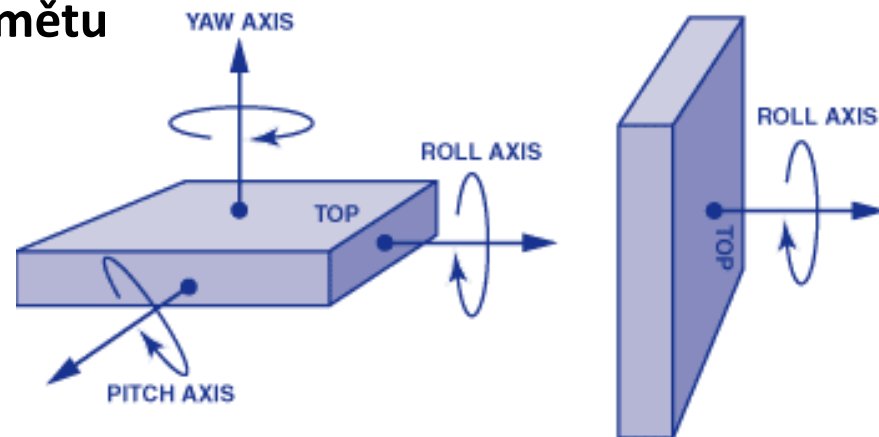


Torzní akcelerometr



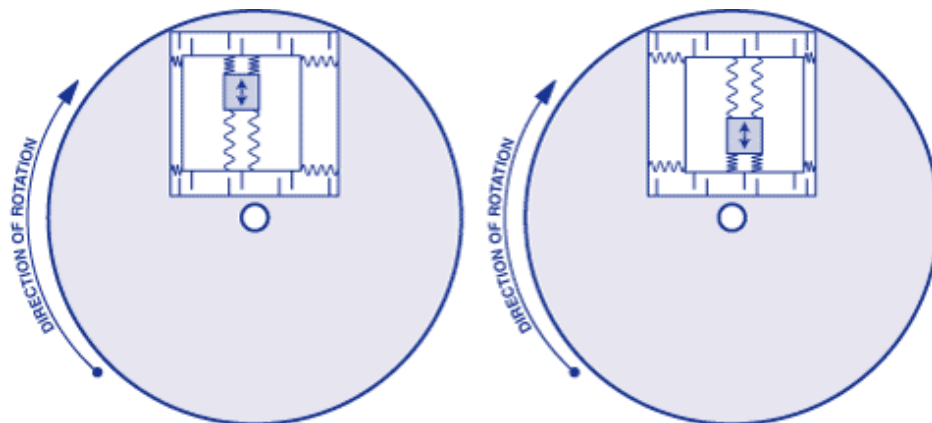
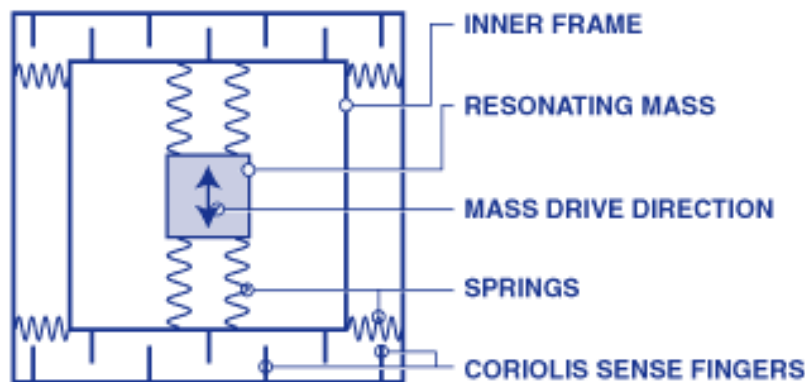
Gyroskop

- Měření úhlové rychlosti
 - **Určení změny polohy, natočení předmětu**
 - **Určení pozice předmětu**
- Rotace vzhledem k jednotlivým osám
 - Svislá (kolmá) osa – yaw axis
 - Příčná osa – pitch axis
 - Podélná osa – roll axis
- MEMS gyroskopy – **využití Coriolisovy síly**
 - Coriolisova síla je tzv. virtuální síla, která působí na libovolný hmotný předmět či objekt, který se pohybuje rychlostí $\mathbf{v}$ v soustavě rotující kolem osy rotace úhlovou rychlostí $\boldsymbol{\omega}$ ($\mathbf{F}_C = 2 \cdot \mathbf{m} \cdot \mathbf{v} \times \boldsymbol{\omega}$, kde $\times$ je vektorový součet)
 - Velikost a směr síly úměrný rychlosti a směru otáčení

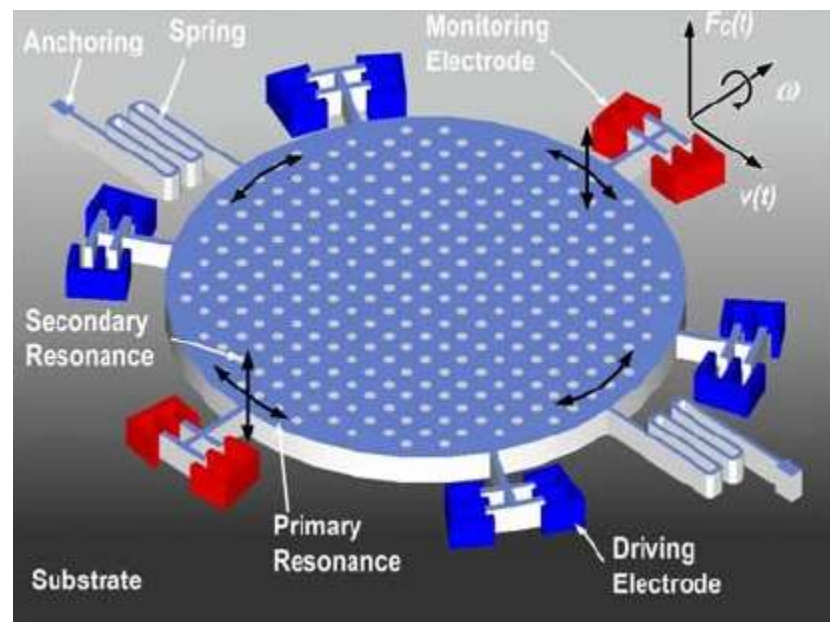
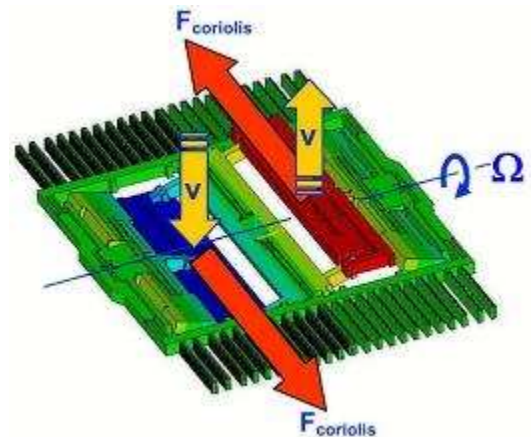
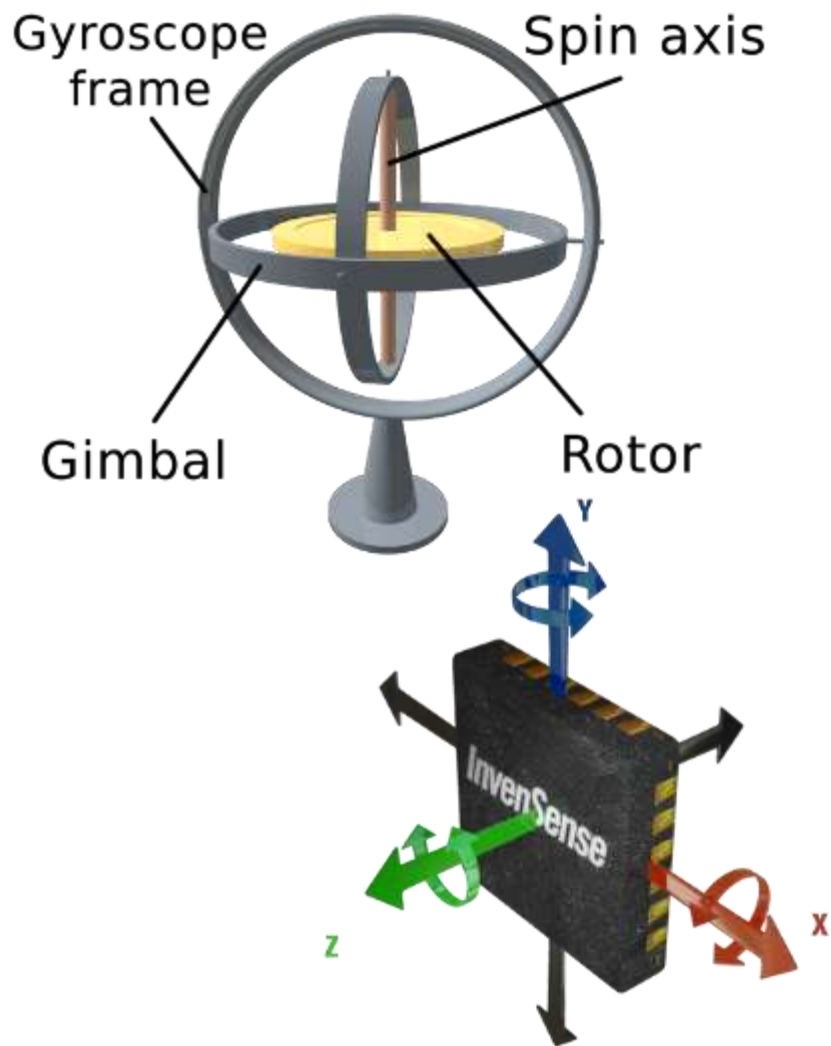


Gyroskop

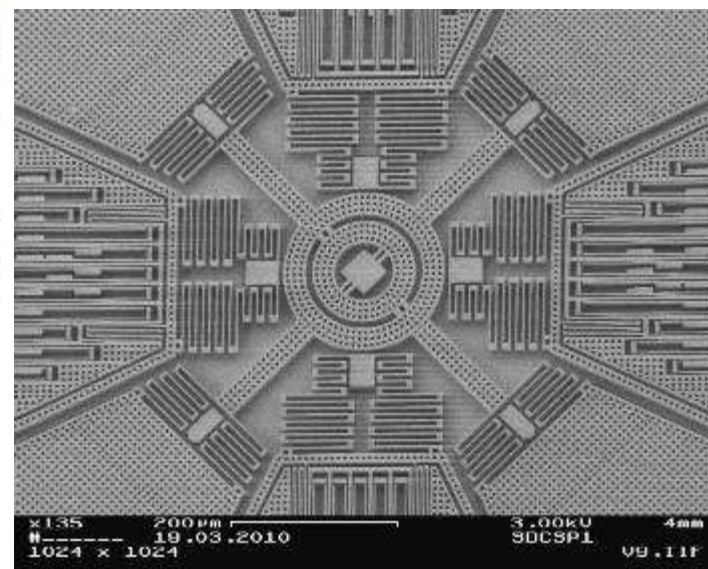
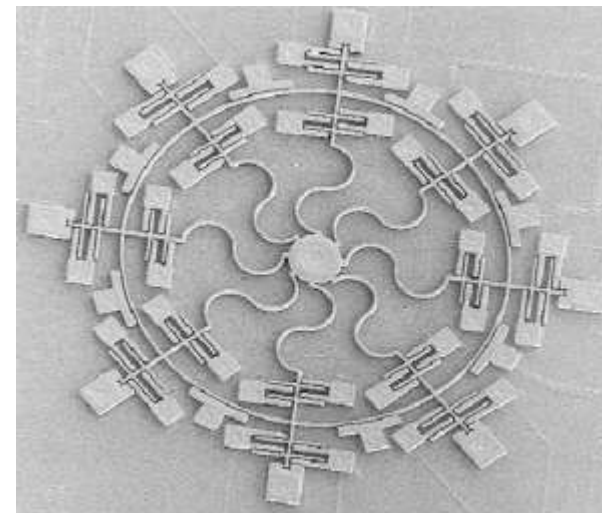
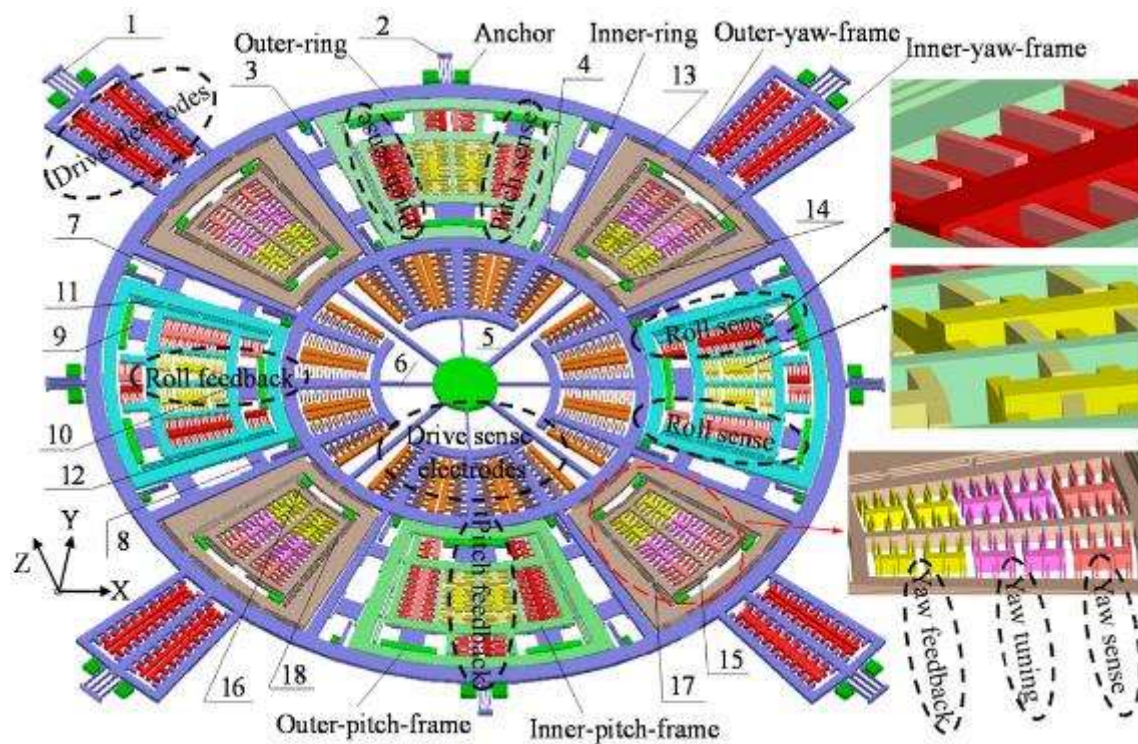
- **Mechanické části + elektrické obvody přímo na čipu**
- Různé struktury, ale stejný princip
- Základ tvoří periodicky pohybující se struktura o přesně dané hmotnosti
- **Struktura upevněná na pružinách v rámu**
- **Směr pohybu je kolmý na směr otáčení**
- Coriolisova síla úměrná úhlové rychlosti otáčení – stlačení pružin způsobí posuv měřicích plošek
- Kapacita mezi ploškami je úměrná úhlové rychlosti



Gyroskop



Gyroskop



Tlakový senzor

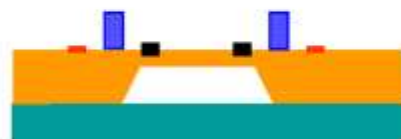
- Jedna pevná elektroda
- Pružná membrána tvořící pohyblivou se elektrodu



(a) Pressure sensor wafer



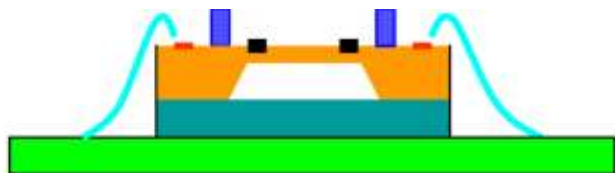
(b) Photoresist layer spin-coating



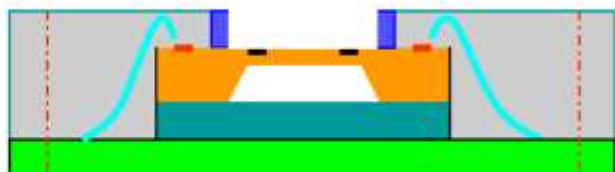
(c) Dam-ring patterning



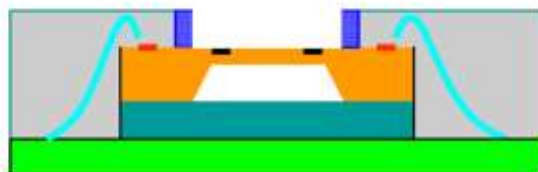
(d) Dicing saw



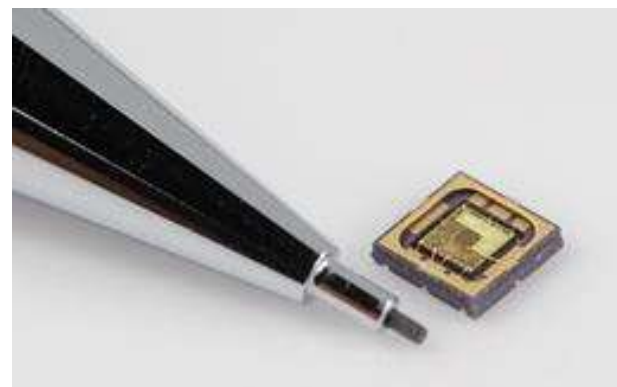
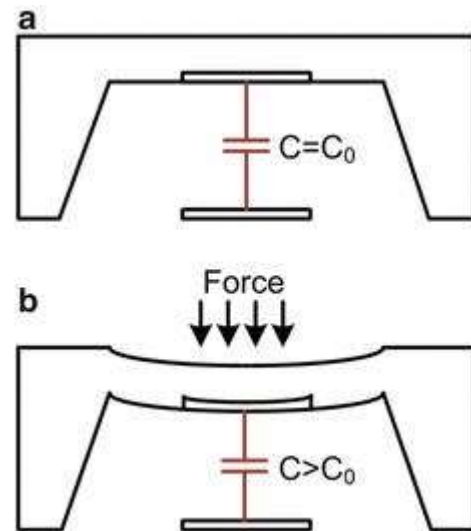
(e) Pressure sensor attachment & wire bonding



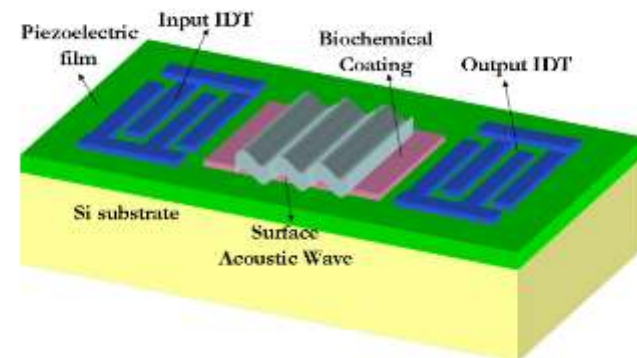
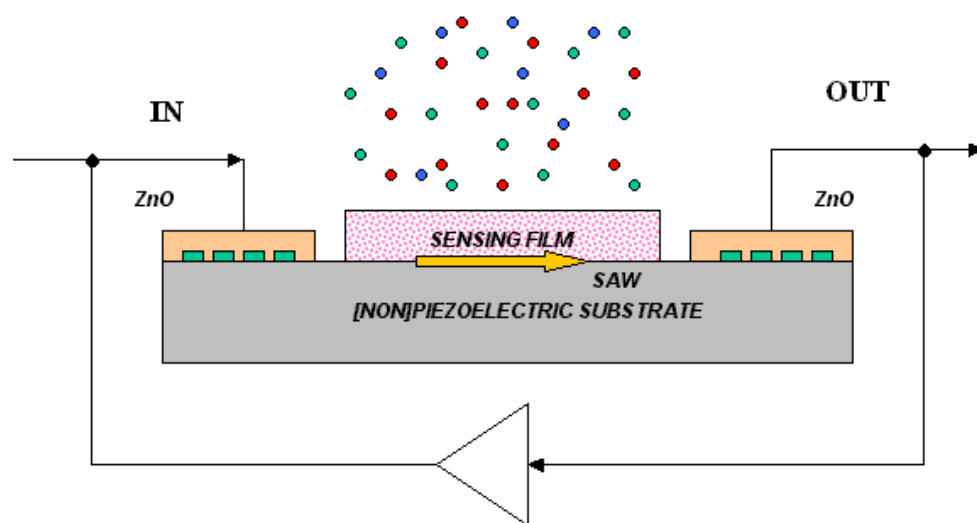
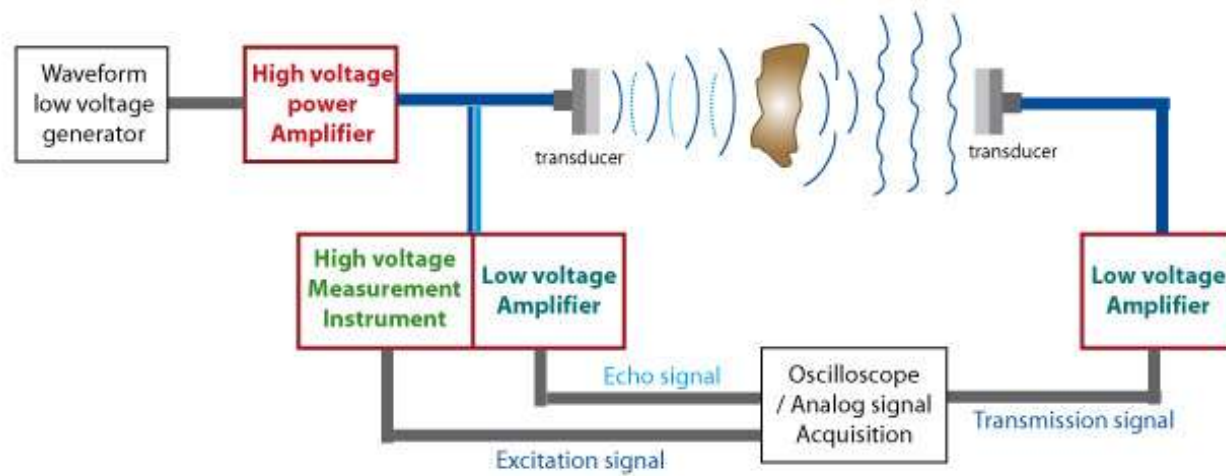
(f) Transfer molding



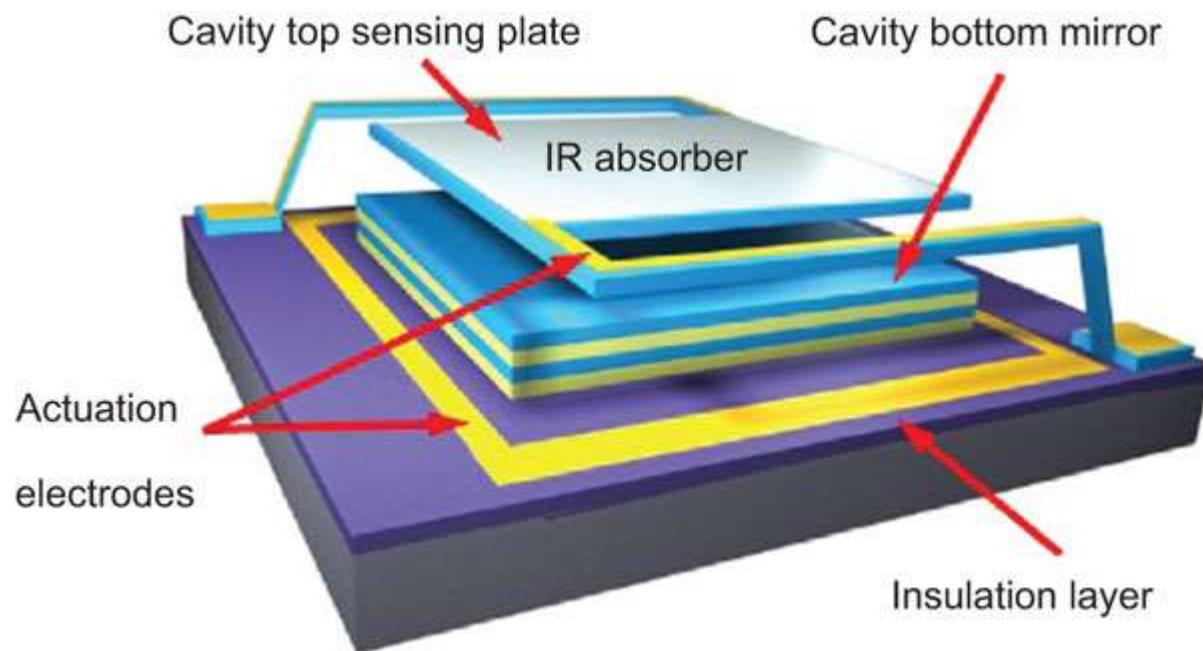
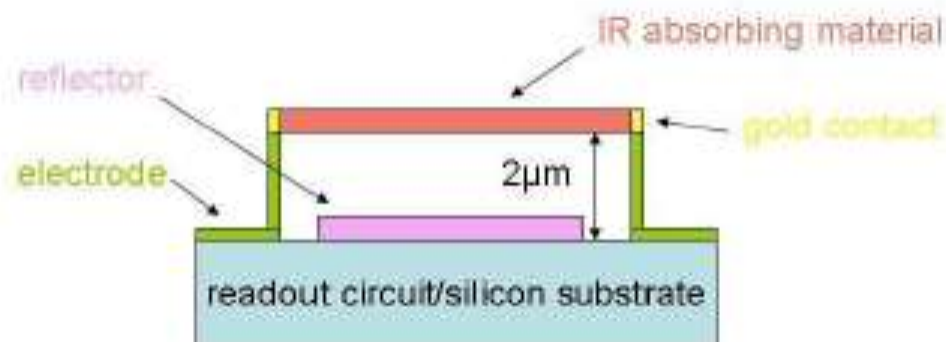
(g) Packaging saw



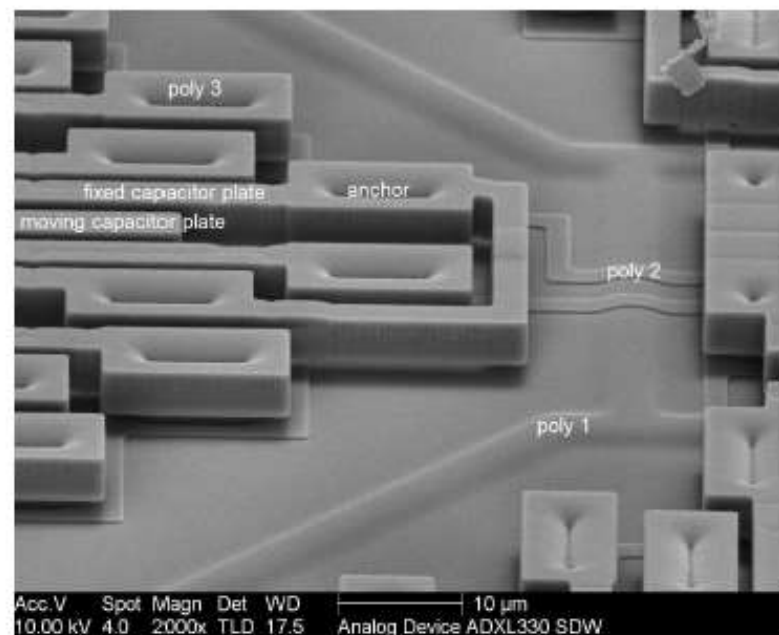
Senzory s povrchovou akustickou vlnou



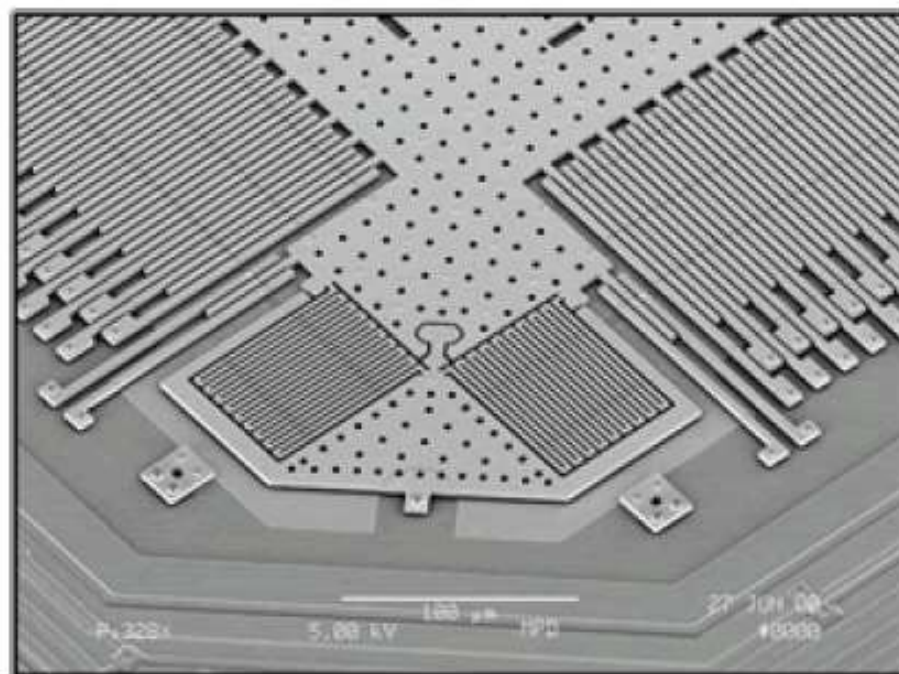
IR senzor



- **Mechanické senzory (převodníky)**
 - Piezorezistivní senzory
 - Piezoelektrické senzory
 - Kapacitní senzory
 - Rezonanční senzory
 - Příklady: tenzometry, akcelerometry, gyroskopy, tlakové senzory
- **Mechanické aktuátory**
 - Elektrostatické aktuátory
 - Piezoelektrické aktuátory
- **Senzory záření**
 - Fotodiody
 - CCD prvky
 - Pyroelektrické senzory

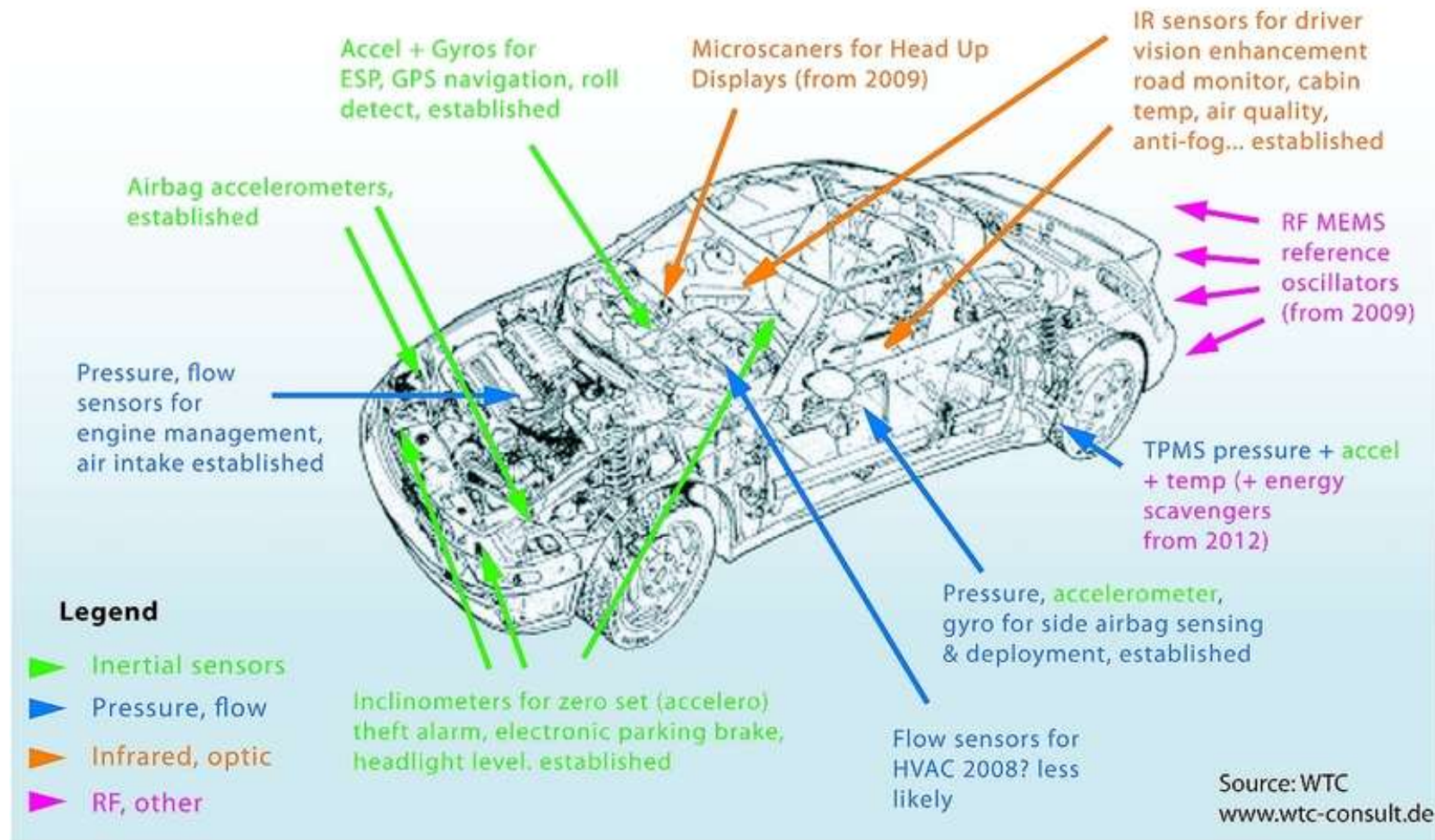


- **Optické aktuátory**
- **Teplotní senzory (převodníky)**
 - Termomechanický senzor
 - Termorezistivní senzor
 - Termočlánky
- **Teplotní aktuátory**
- **Magnetické senzory (převodníky)**
- **Magnetické aktuátory**
- **Chemické a biologické senzory**
- **Chemické aktuátory**
- **Fluidní součástky**
 - Průtokové kanály
 - Průtokové senzory
 - Ventily
 - Pumpy
 - Rotační pumpy
 - Kapičkové generátory



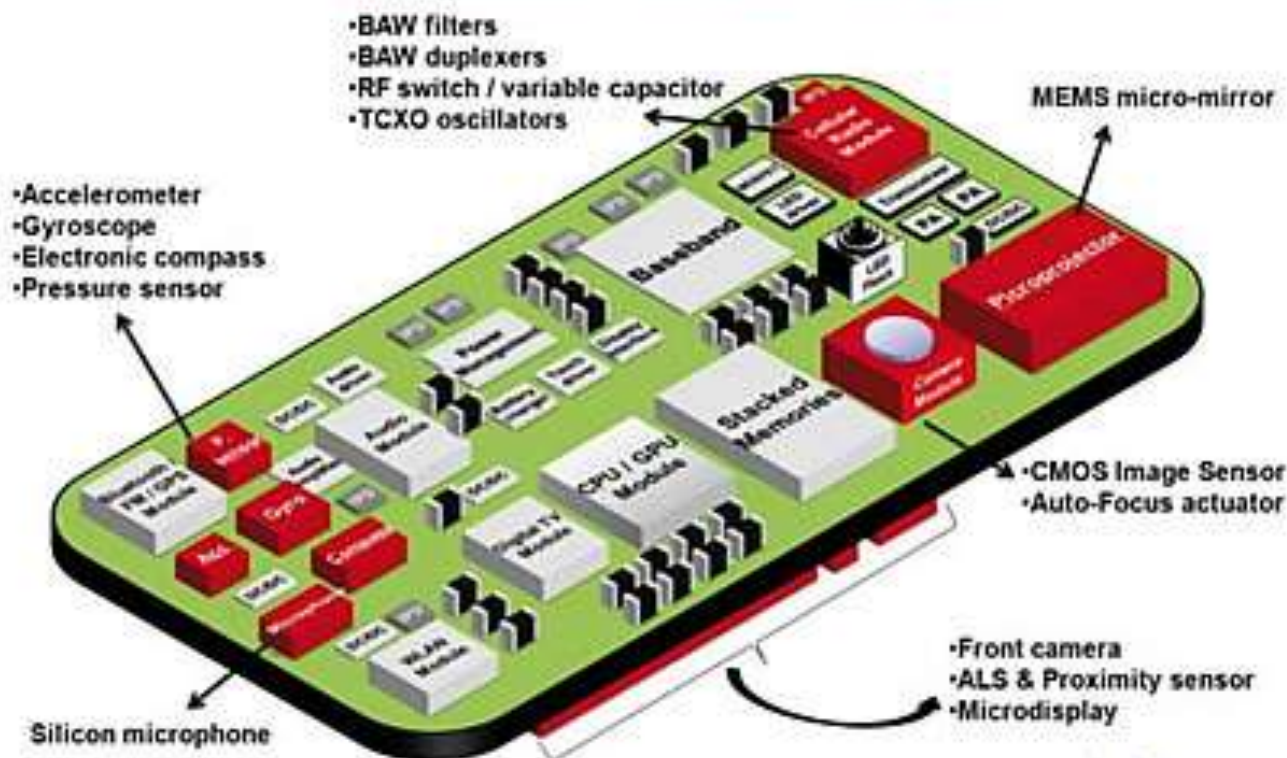
Aplikace MEMS

Applications for MEMS in automobiles



MEMS & Sensors

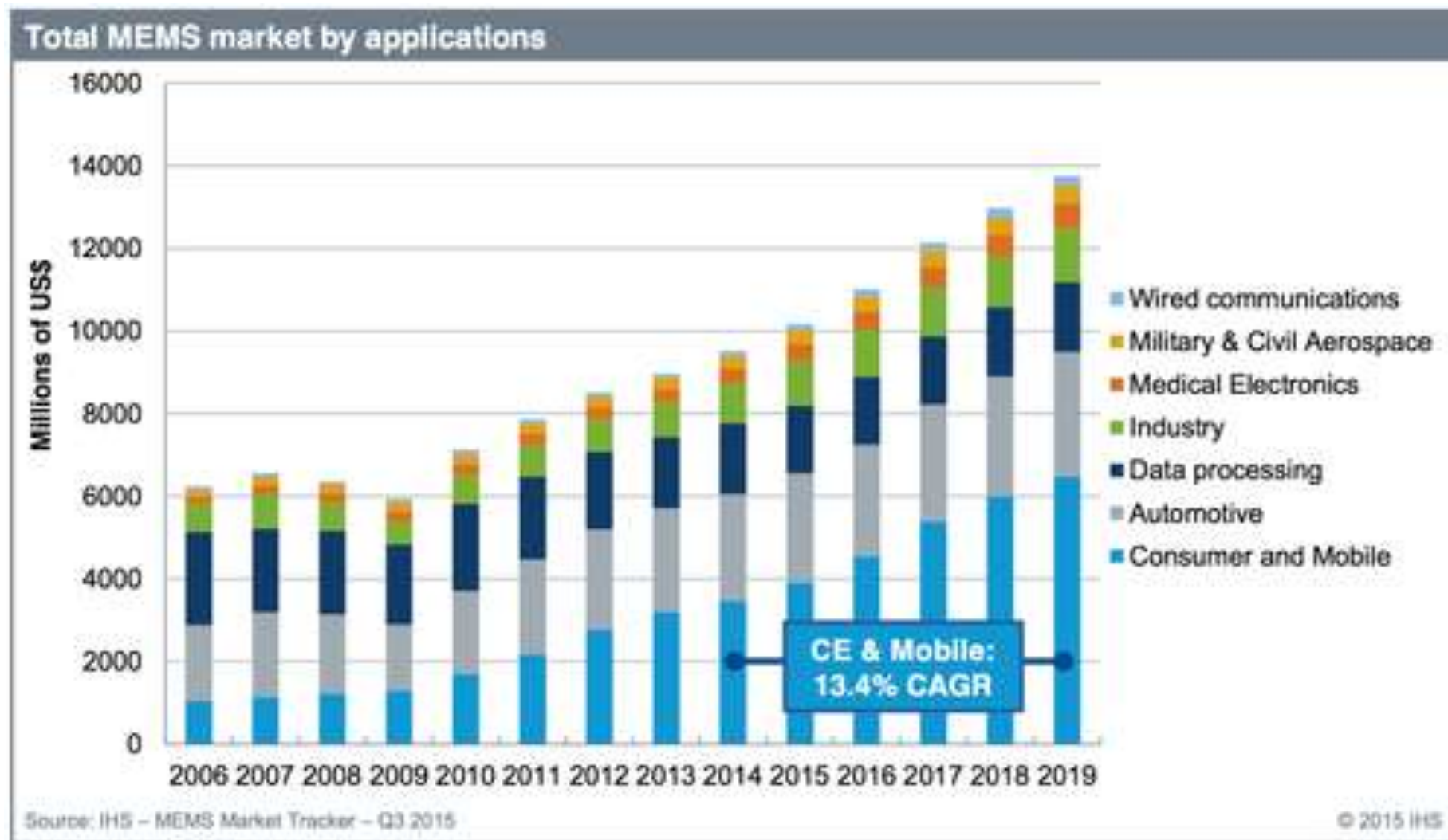
Simplified view of a smart-phone board

MEMS & Sensors in red (scope of this report)

© July 2010

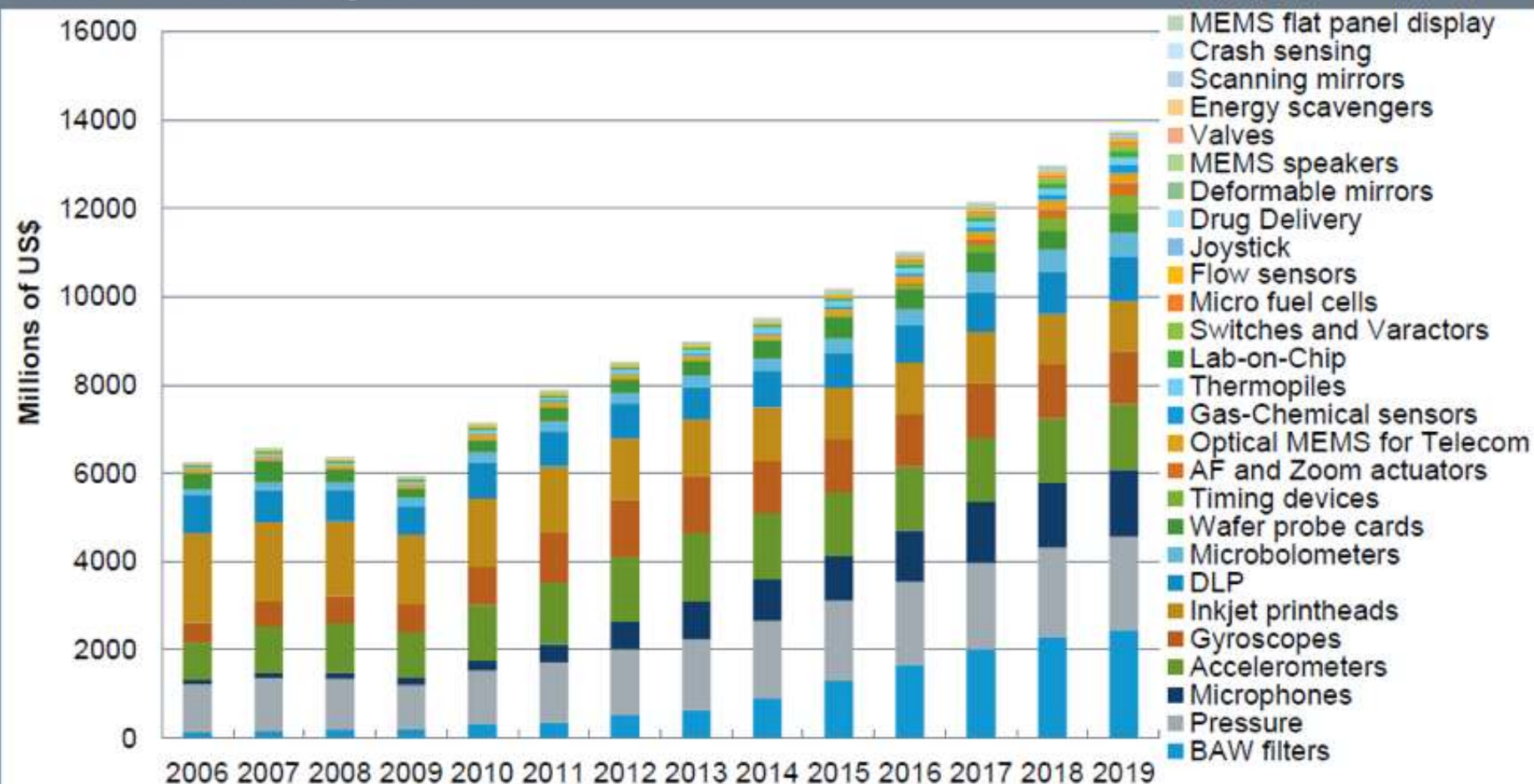
y'n OPEN DEVELOPMENT

Vývoj na trhu



Vývoj na trhu

Total MEMS market by device

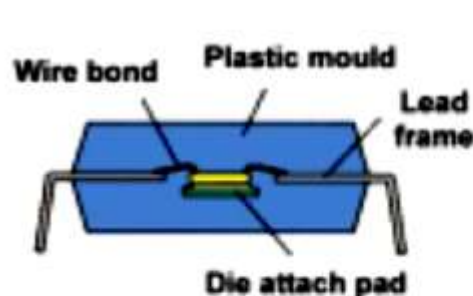


Source: IHS – MEMS Market Tracker – Q3 2015

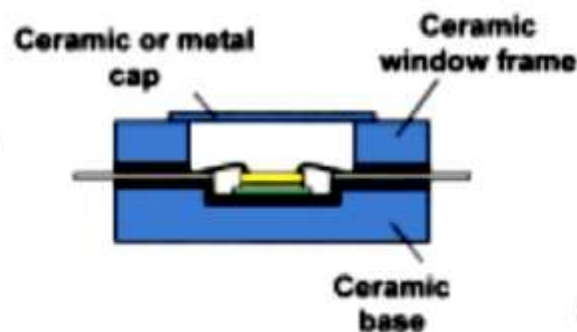
© 2015 IHS

Pouzdrění MEMS

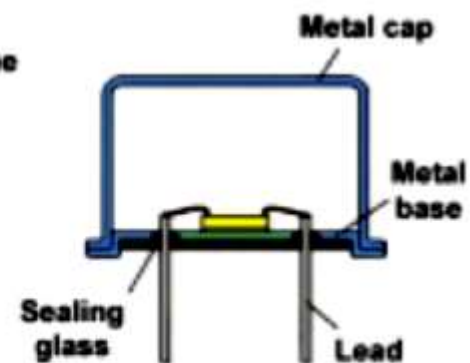
- Plastická pouzdra - zalévání
- Keramická pouzdra
- Kovová pouzdra
- Bondování čipů k vývodům pouzdra
- **Ochrana vůči vnějšímu prostředí při zachování citlivosti senzoru**
 - Minimalizace vnitřního a vnějšího rušení
 - Minimalizace vnějšího zatížení – otřesy, vibrace
 - Teplotní odolnost s dostatečným odvodem tepla



(a) plastic moulded package



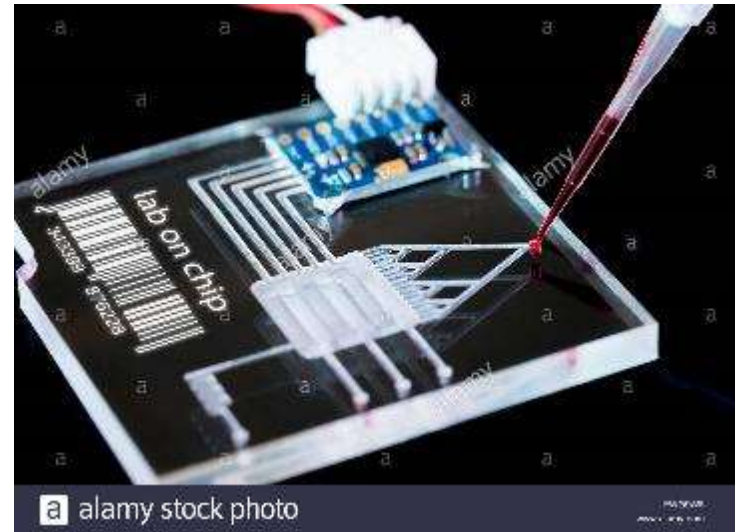
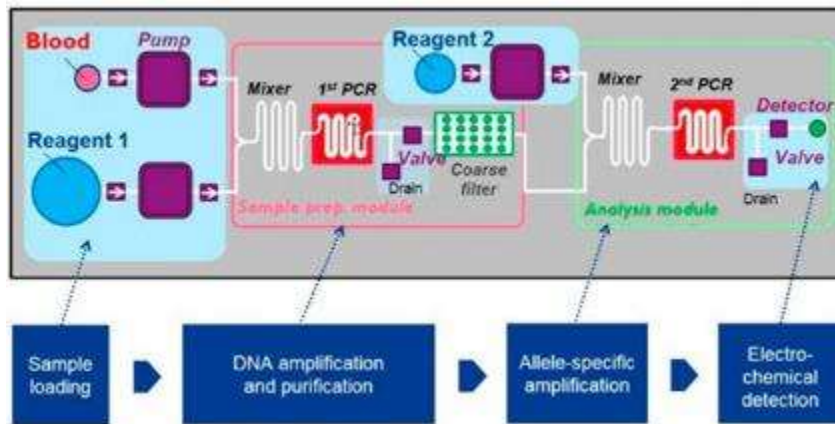
(b) ceramic window package



(c) metal can package

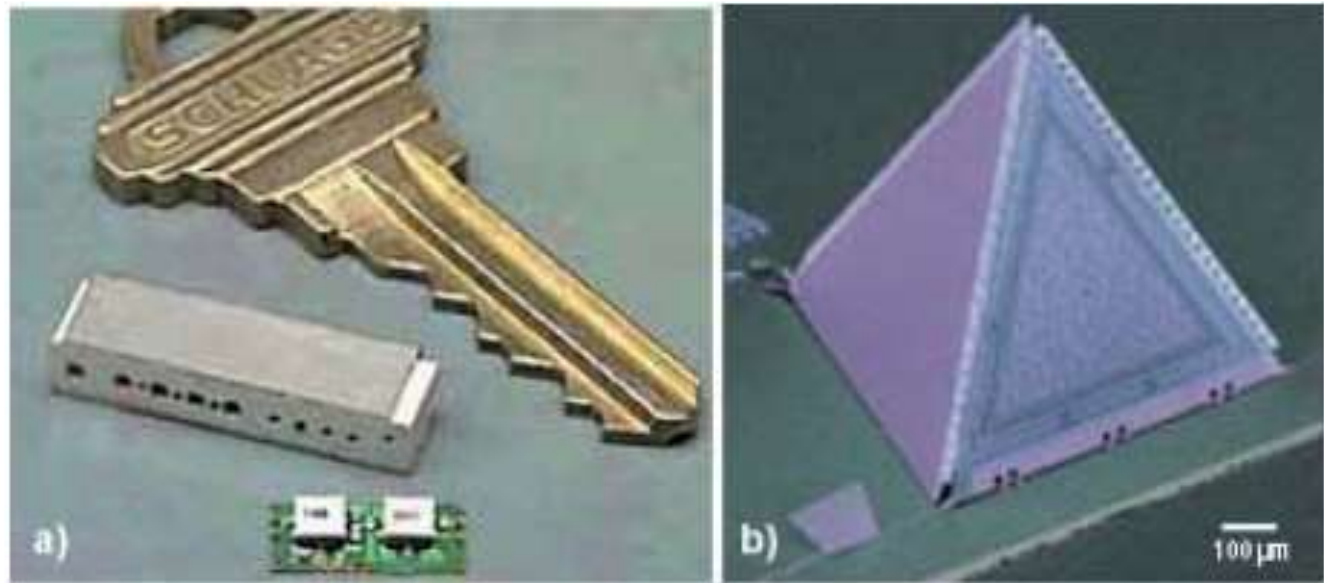
BioMEMS technologie

- Mikrobioelektromechanický systém
- Realizace laboratorí na čipu (lab-on-chip)
- Pharmacy-on-chip



RF MEMS technologie

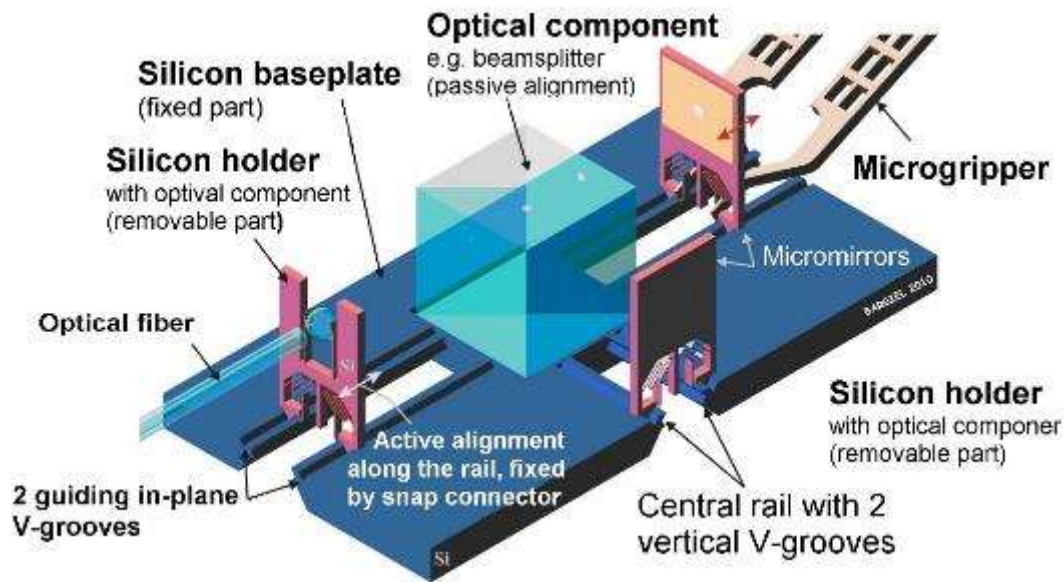
- Mikrosystémy určené zejména pro mobilní telefony a bezdrátové komunikační prvky (radary, satelity, GPS, atd.)
- Nahrazení klasických součástek - zmenšení rozměrů a snížení nákladů
 - Kondenzátory
 - Indukčnosti
 - Rezonátory
 - Filtry
 - Mikrofony
 - Přepínače



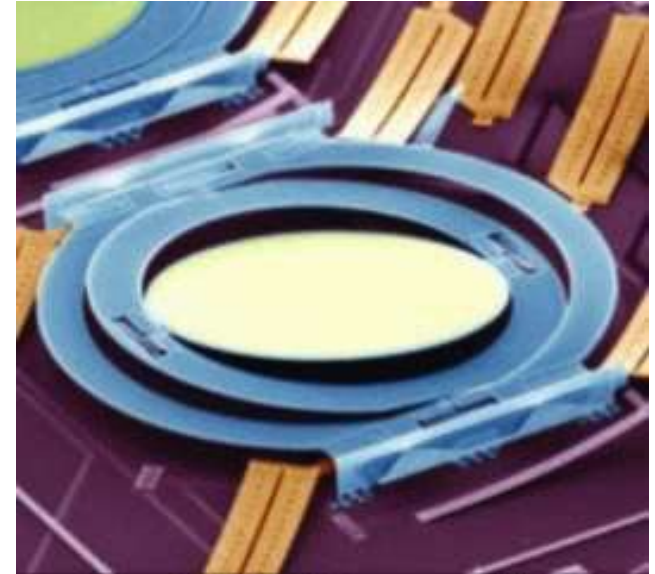
a) Akustický rezonátor, b) Mikro-mikrofon – radio on a chip

MOEMS technologie

- **Mikrooptoelektromechanický systém**
 - Čtečky čárových kódů
 - Snímací hlavy CD a DVD přehrávačů
 - Optické komunikační systémy
 - Zobrazovací systémy



Endoskop



Optický přepínač na bázi otočného zrcadla

Kontrolní otázky

- Vysvětlete, co je to mikrosystém.
- Vysvětlete, co znamená zkratka MEMS.
- Jaké se využívají výrobní technologie pro výrobu MEMS?
- Jaké mechanické prvky lze u MEMS realizovat?
- Vysvětlete princip objemového mikroobrábění.
- Jaký je rozdíl mezi izotropním a anizotropním leptáním?
- Na jakém principu funguje suché leptání?
- Vysvětlete princip povrchového mikroobrábění.
- Vysvětlete princip MEMS akcelerometru.
- Vysvětlete princip MEMS gyroskopu.
- Vysvětlete princip MEMS tlakového senzoru.
- Vysvětlete, co je BioMEMS a MOEMS.
- Jakým způsobem se MEMS systémy pouzdří?

