



# **MEMS**

## **komponente**

**Prof. dr Vesna Paunović**

**Prof. dr Dragan Pantić**



# Definicije

Mikrosistem (Microsystem) - Evropa

MEMS (Micro-ElectroMechanical System) – USA

Mikromašina (Micromachine) - Japan

Mikro-elektro-mehanički sistemi (MEMS) pripadaju minijaturnim elektromehaničkim sistemima (uređaji i strukture) koji mogu da registruju promene u okolini, da ih analiziraju i procesiraju pomoću mikroelektronike.

Svaki deo naziva za MEMS ima poseban smisao: **mikro** (strukture malih dimenzija koje se dobijaju mikrofabrikacijom), **elektro** (električni signal/kontrola), **mehanički** (mehanička funkcionalnost), **sistemi** (strukture, uređaji ili sistemi)



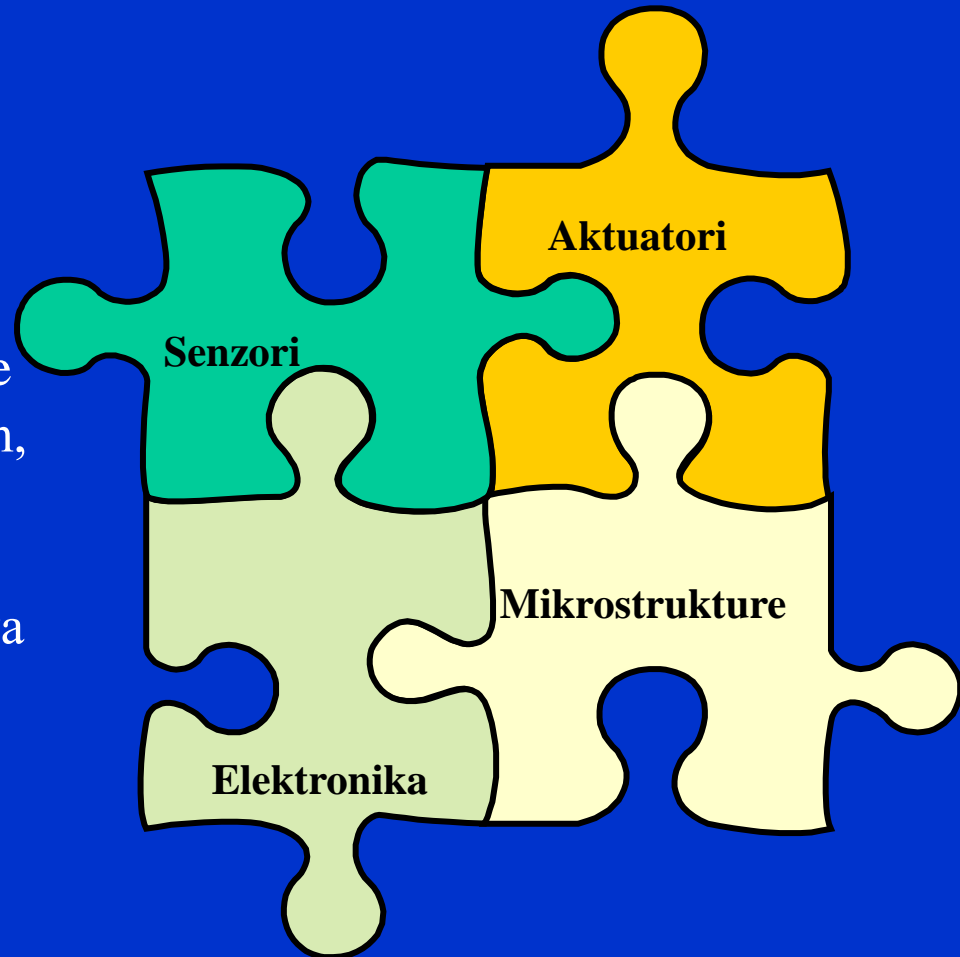
# Definicije

**Microsistem** je minijturni inteligentni sistem u kome su senzori, elektronika, aktuatori i/ili mikrostrukture integrisani na jednom čipu (monolitna integracija) ili više čipova (hibridna integracija) korišćenjem mikroelektronskih tehnologija.

## Komponente mikrosistema

**Senzori** sakupljaju informacije iz okoline merenjem mehaničkih, toplotnih, bioloških, hemijskih, optičkih i magnetnih efekata.

**Elektronika** procesira ove informacije i uz mogućnost donošenja odluka usmerava pokretače (aktuatora) da svrsishodno željenom odzivu reaguju prema okolini (na primer pomeranjem, pozicioniranjem, regulisanjem, pumpanjem i/ili filtriranjem)

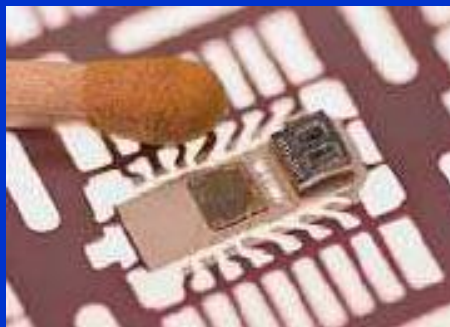




# Definicije

**Senzori** mere okolinu bez njenog modifikovanja. Konvertuju fizičke i hemijske veličine u električne signale. Merene veličine mogu biti :

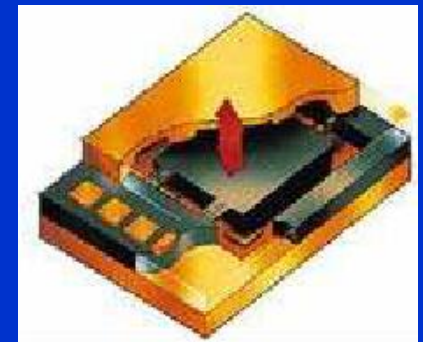
- Termičke (temperatura, toplota, protok toplote)
- Mehaničke (sila, pritisak, brzina, ubrzanje, pozicija)
- Hemijske (koncentracija nekog materijala, sastav, brzina reakcije)
- Magnetne (intezitet magnetnog polja, gustina fluksa, magnetizacija)
- Radijacione (intezitet, talasna dužina, polarizacija, faza)
- Električne (napon, struja, naelektrisanje)



Senzor pritiska



Senzor gasova



Senzor ubrzanja

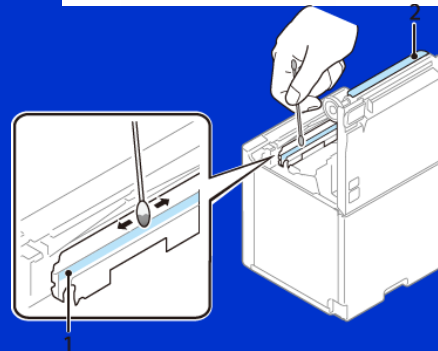
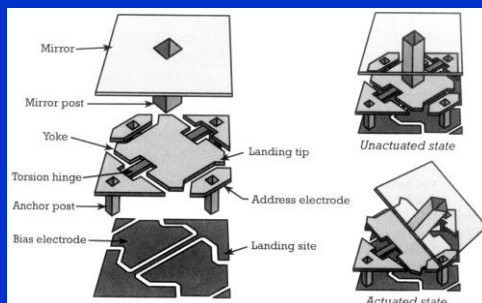


# Definicije

**Aktuatori** interaguju sa okolinom. Konvertuju električnu energiju (signale) u mehaničko dejstvo (kretanje).

## Primeri:

- Mikromotori
- Mikropumpe
- Ventili
- Glave termičkih štampača
- Pojačavači mikrofluida
- Optički komunikacioni elementi
- Skenirajuća mikroskopija





# Definicije

Senzori i aktuatori su **pretvarači** energije  
(aktivni elementi sistema).



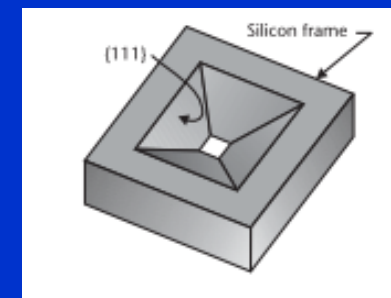
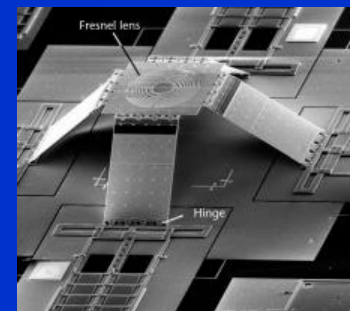
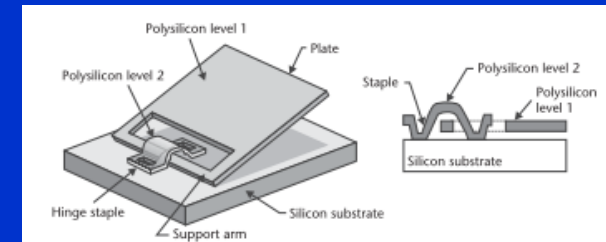


# Definicije

**Mikrostrukture** su objekti koji ne pripadaju niti senzorima niti aktuatorima (pasivni elementi sistema). Predstavljaju niz jednostavnih oblika kao što su žlebovi, otvori, brizgalice, rešetke, itd.

**Primeri:**

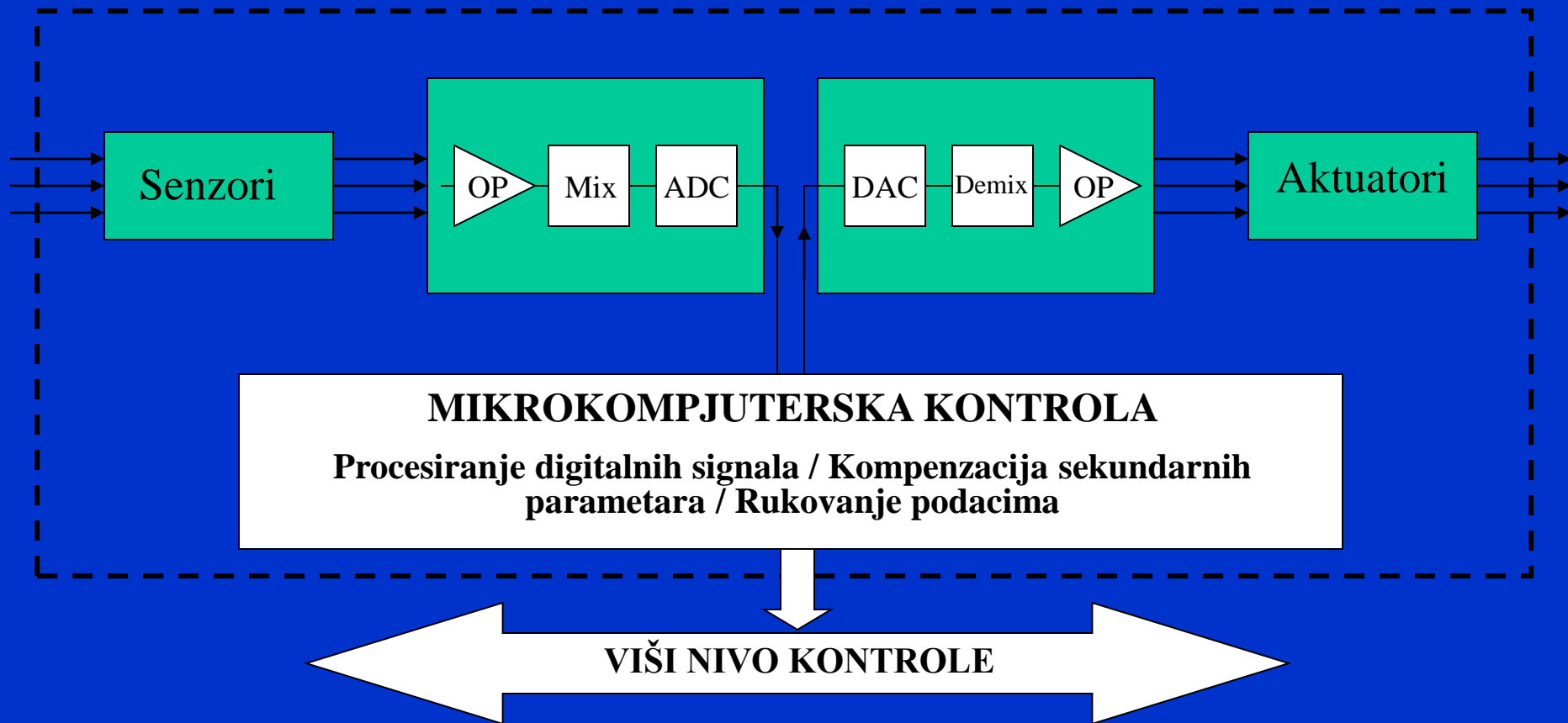
- Mikrosita
- Optički elementi
- Mikroelektronske komponente za hladjenje
- Elektronski ventili
- Separatori tečnih izotopa
- Mikrokonektori (električni i optički)





# Definicije

Elektronska kola su u funkciji procesiranja električnih signala.







# Definicije

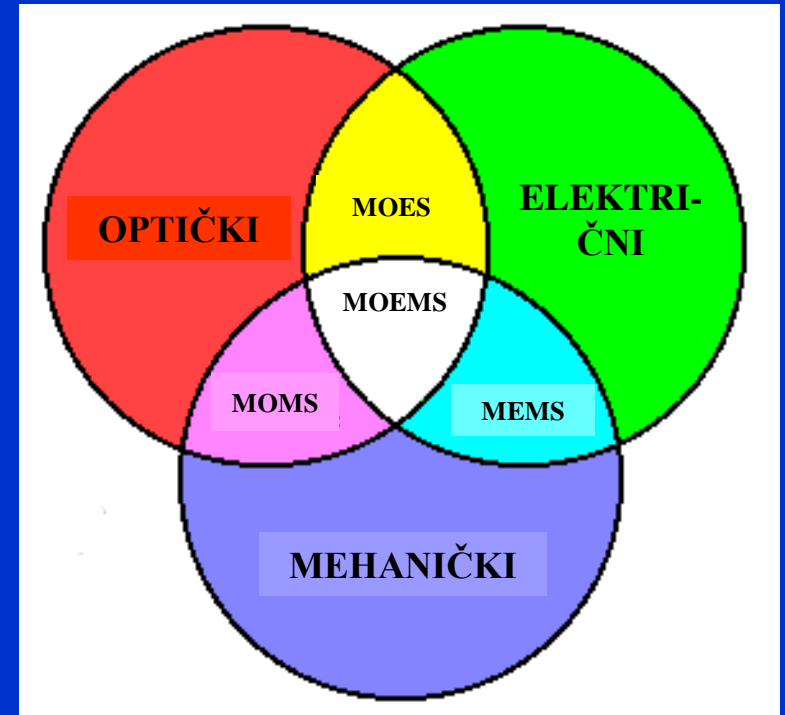
## Kategorije mikrosistema

**MEMS** - Mikro**Elektro**Mehanički Sistemi

**MOEMS** – Mikro**OptoElektro**Mehanički Sistemi

**MOES** – Mikro**OptoElektronski** Sistemi

**MOMS** – Mikro**Opto**Mehanički Sistemi





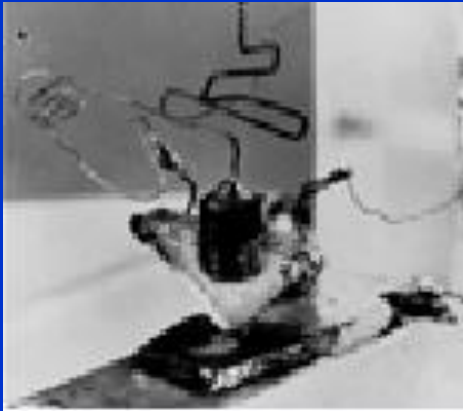
- Veličina MEMS komponenti (senzora, pokretača i elektronike) iznosi od 1 do 100  $\mu\text{m}$ .
- Sam MEMS uređaj je veličine od 20  $\mu\text{m}$  do 1 mm.
- Tipovi MEMS uređaja mogu da variraju od relativno jednostavnih bez pokretnih delova, do izuzetno kompleksnih elektromehaničkih sistema sa mnogo pokretnih elemenata koje kontrololiše integrisana mikroelektronika.
- U MEMS uređaje spadaju senzori za pritisak, merači ubrzanja-akcelerometri kao inertni senzori, mikroogledala, minijturni roboti, zupčanici, pumpe za fluide, senzori za protok, generatori mikrokapljica, optički skeneri, uređaji za analizu i dobijanje slika, hemijski senzori, sonde i šiljci za ispitivanje površine.



# Mikrosistemi su razvijeni zahvaljujući revoluciji mikroelektronskih komponenata

## Razvoj mikroelektronskih komponenata

1947



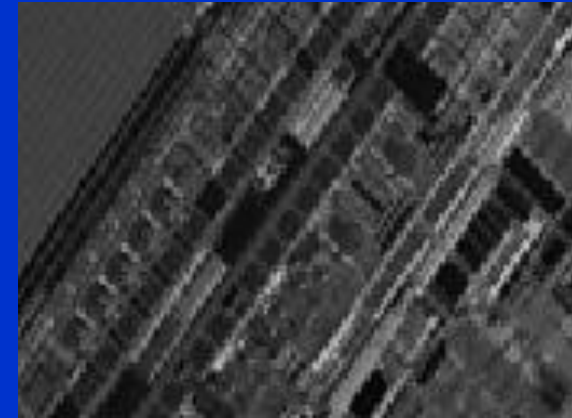
Prvi transistor

1958



Prvo integrisano kolo (IK)

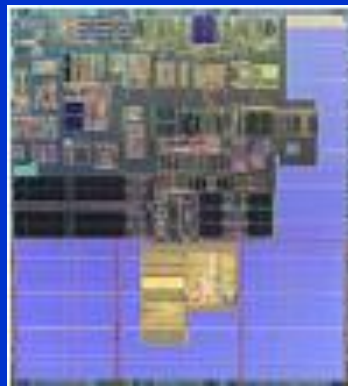
1999



IK sa 10 miliona  
tranzistora

2002

IK sa 400  
miliona  
tranzistora



Moore-ov zakon:

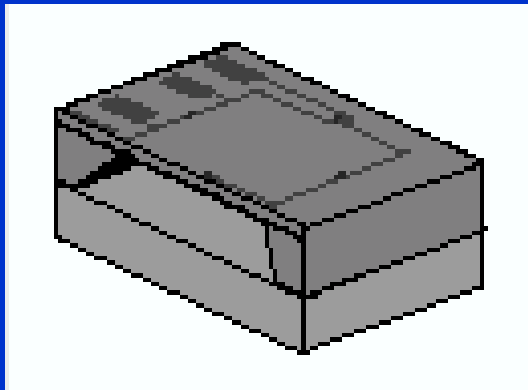
Broj tranzistora u IK raste eksponencijalno  
sa vremenom (udvostručuje se svake 2-3  
godine)



# Mikrosistemi su razvijeni zahvaljujući revoluciji mikroelektronskih komponenata

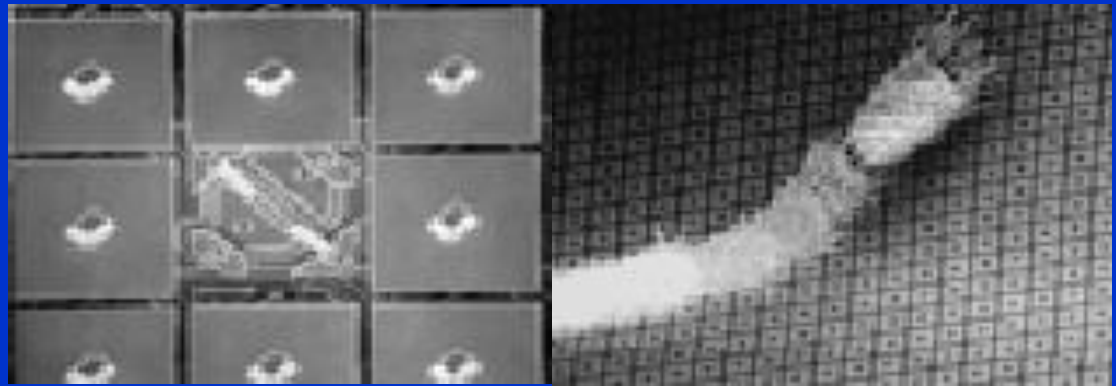
## Razvoj mikrosistema

1980



Senzor pritiska

1999



Digital Micromirror Device  
(DMD)

1.3 milion mikroogledala



# Istorijat razvoja mikrosistema

Istorijat MEMS je vezan za razvoj svake od tehnika na kojima se zasniva MEMS tehnologija, ali se smatra da su prvi fenomeni koji su posledica ovih integrisanih sistema zabeleženi pedesetih godina dvadesetog veka

**1954** – Piezootporni efekat u poluprovodnicima (S.C. Smith)

**1964** – Si integrisani piezo-aktuator (Tuftte, Chapman, Long)

**1965** – FET akcelerometar dobijen tehnologijom površinskog mikromašinstva (Nathanson, Wickstrom)

**1967** – Anizotropno dubinsko nagrivanje Si (Waggner et al.)

**1977** – Si elektrostatički akcelerator (Stanford)

**1979** – Integrisani gasni hromatograf (Terry, Jerman, Angell)

**1982** – “Si kao mehanički materijal” (K. Petersen)

**1983** – Integrisani senzor pritiska (Honeywell)



# Istorijat razvoja mikrosistema

- 1985** – LIGA tehnologija (W. Ehrfield et al.)
- 1988** – Serijska proizvodnja senzora pritiska tehnologijom bondiranja pločica (Nova Sensor)
- 1992** – Zapreminsko mikromašinstvo – SCREAM proces (Cornell)
- 1993** – Displej sa digitalnim ogledalima (Texas Instruments)
- 1994** – Komercijalni akcelerometri realizovani tehnologijom površinskog mikromašinstva (Analog Devices)
- 1999** – Prekidači za optičke mreže (Lucent)
- 2001** – Proizveden i predstavljen prvi iPod (Apple)
- 2006** – Proizveden je uređaj za igrice (Nintendo Wii)
- 2007** – Proizveden i predstavljen prvi iPhone (Apple)
- 2010** – Proizveden je prvi iPad



# Razvoj i primena mikrosistema

Tri su osnovne ideje za razvoj i primenu MEMS:

1. Minimizacija postojećih uređaja (primer: proizvodnje žiroskopa na bazi silikona: masa postojećih uređaja od kilograma i zapremine od  $1\text{ dm}^3$  smanjena je na čip mase nekoliko grama i zapremine  $0.5\text{ cm}^3$  ),
2. Primena principa i otkrića moderne fizike (biočipovi koji koriste električno polje za doziranje reaktanta oko čipa, na osnovu elektro-osmotskog efekta u kanalima prečnika do 1 mm) i
3. Primena mikrotehnika (izgradnja i razvoj uređaja kao što su delovi skenirajućeg mikroskopa sa tunelskim efektom, (STM ) i mikroskopa atomskih sila, (AFM). MEMS uređaji se primenjuju kao mikrogriperi (hvatači) za hvatanje ćelija koje treba analizirati.



# Primena mikrosistema

Automobilska industrija	Elektronika	Biomedicina	Komunikacije	Vojna primena
Senzori za internu navigaciju	Glave u drajvovima diskova	Senzori pritiska krvi	Komponente fiber-optičkih mreža	Navodjenje projektila
Senzori stanja vazduha u kabini	Glave inkjet printera	Stimulatori mišića i sistemi za uvodjenje lekova	RF releji, prekidači i filteri	Sistemi za osmatranje
Senzori kočionih sila	Televizijski projekcioni ekrani	Implantirani senzori pritiska	Projekcioni displeji u mobilnim komunik. komponentama i instrumentima	Ručni sistemi
Senzori nivoa goriva i pritiska pare	Senzori za detekciju zemljotresa	Protetika	Spliteri i kapleri	Ugradivi senzori
Senzori za vazdušne jastuke	Senzori pritiska u avionima	Minijturni analitički instrumenti	Oscilatori kontrolisani naponom (VCO)	Memorisanje podataka
“Inteligentne gume”	Sistemi za masovno memorisanje podataka	Pejsmejkeri	Podesivi laseri	Kontrola letilica

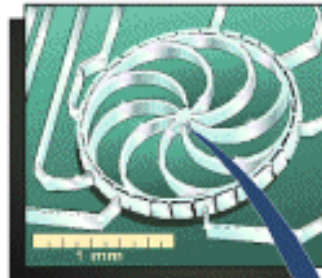
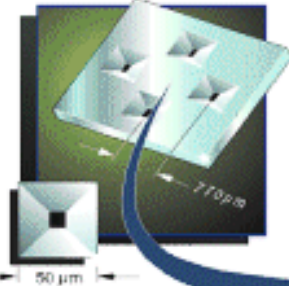




Courtesy of D. Thomas,  
Perkin-Elmer Applied  
Biosystems

**Inertial Navigation Sensors**  
• Acceleration  
• Yaw Rate

**Silicon Nozzles  
for Fuel Injection**

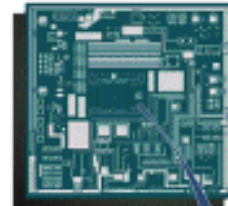


Fuel  
Pressure  
Sensor

# Micromachined Transducer

## Applications for Automotive Operation & Safety

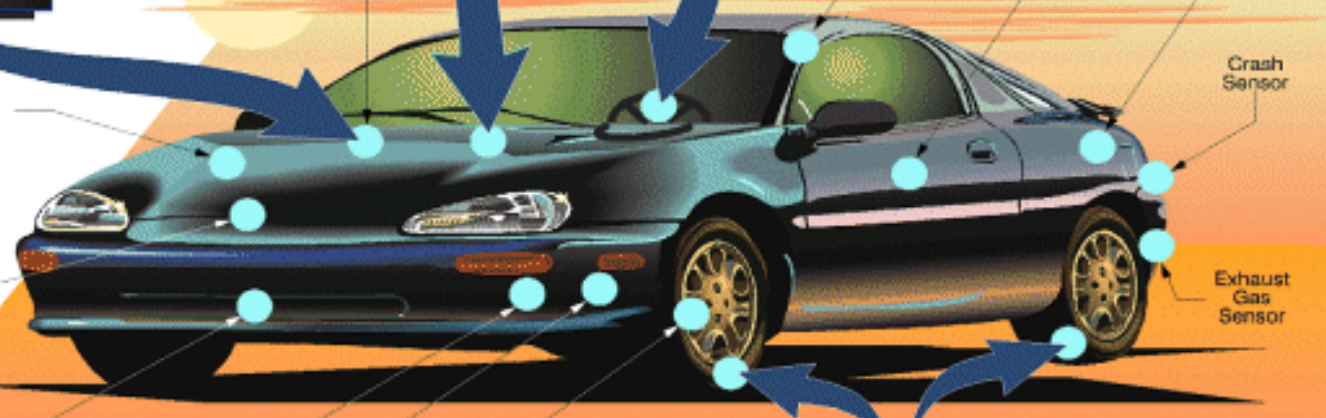
**Micromachined  
Accelerometer  
for Airbag**



Microphones  
for Noise  
Cancellation

Airbag  
Side Impact  
Sensor

Fuel Sensors  
• Level  
• Vapor Pressure



Air-Conditioning  
Compressor  
Sensor

Manifold  
Air  
Pressure  
Sensor

Mass  
Air Flow  
Sensor

Force Sensors  
• Brakes  
• Throttle Pedals

Accelerometer  
for Suspension  
Control

Pressure and Inertial  
Sensors for  
Braking Control

Microphones  
for Noise  
Cancellation

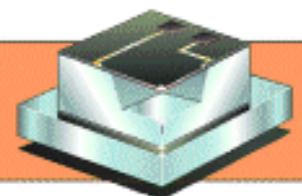
Fuel Sensors  
• Level  
• Vapor Pressure

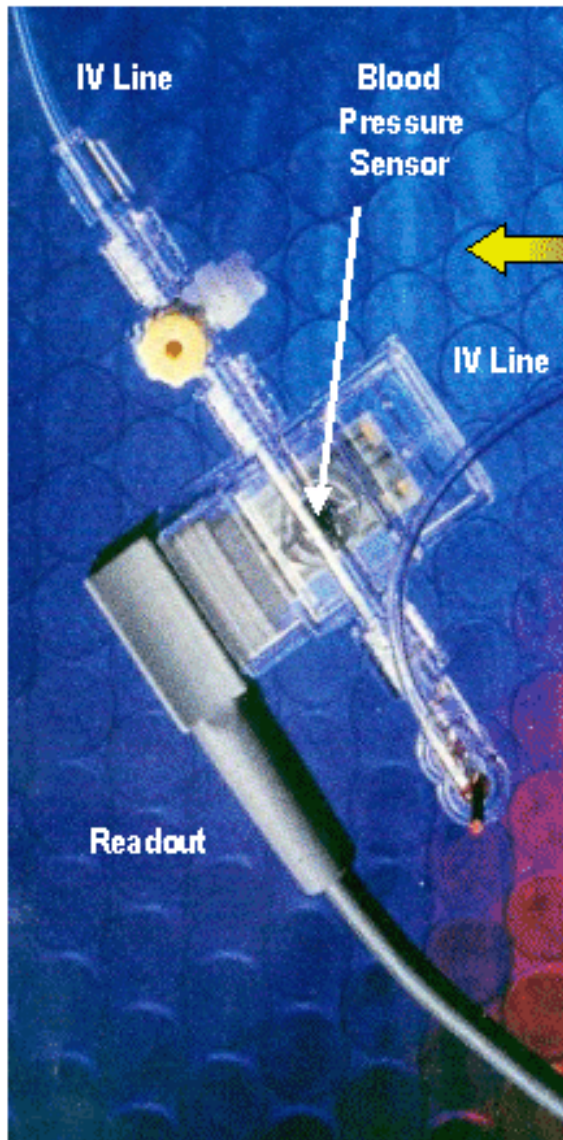
Crash  
Sensor

Exhaust  
Gas  
Sensor



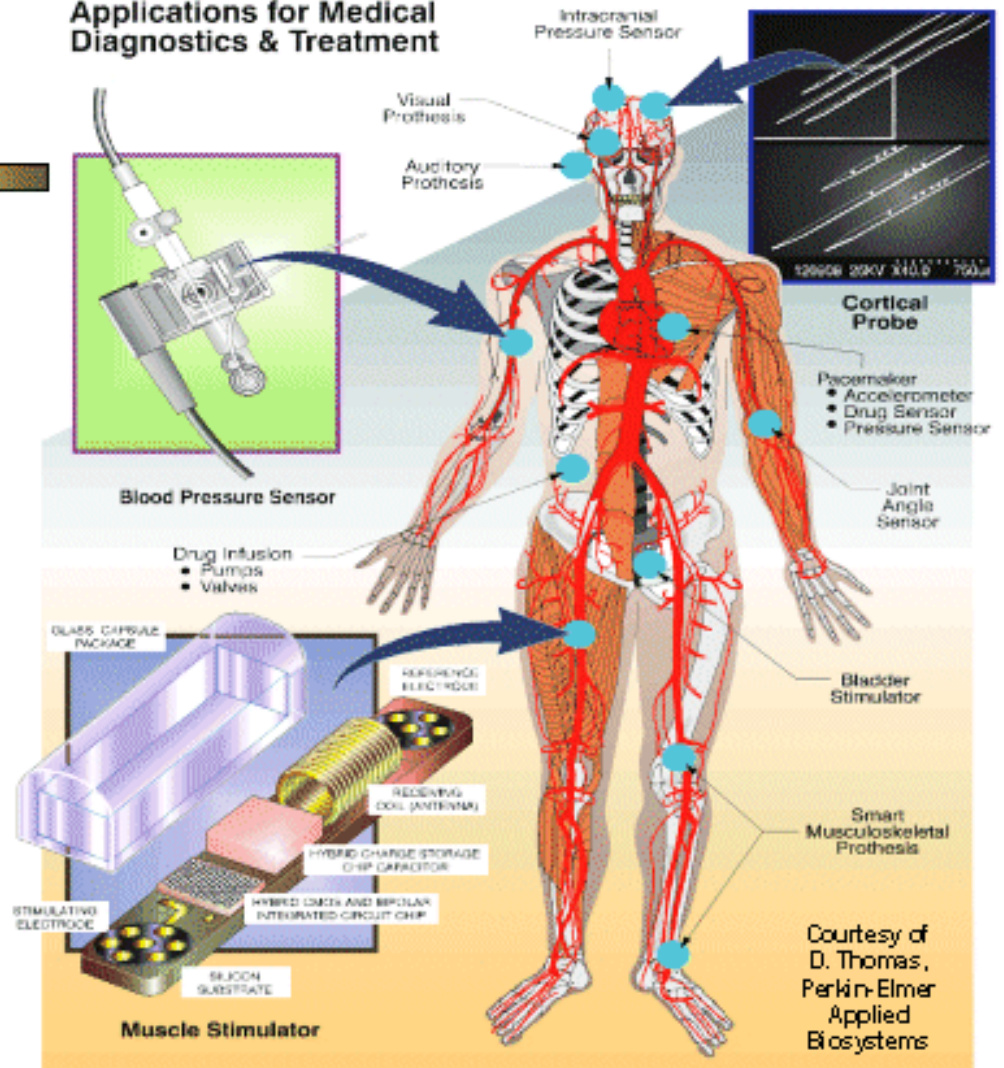
**Tire  
Pressure  
Sensors**





## Micromachined Transducer

Applications for Medical Diagnostics & Treatment



Courtesy of  
D. Thomas,  
Perkin-Elmer  
Applied  
Biosystems



# Tržište mikrosistema

- Tržište MEMS uređaja predstavlja deo velikog tržišta poluprovodničkih čipova, a to je tržište koje pokazuje najbrži rast.
- U početku je automobilska industrija bila glavni pokretač tržišta za MEMS uređaje, ali se rast ove grane poslednjih godina industrije usporio.
- S druge strane, novije oblasti primene (oblast medicine, telekomunikacija i proizvodi široke potrošnje) imaju značajniji uticaj na tržište MEMS
- Veliki zahtevi tržišta za elektronskim uređajima najnovije generacije, kao što su inteligentni telefoni (smart phones) i tablet uređaji utiču na porast proizvodnje i razvoj MEMS.
- Procena je da će tržište MEMS uskoro dostići nivo od 15-20 milijardi dolara.
- Tržište za radiofrekventne (RF) MEMS uređaje će imati najveći rast (50%), zatim slede čipovi sa mikrofluidikom koji služe za distribuciju lekova (42%), mikrofoni na bazi silicijuma (32%), čipovi sa mikrofluidikom za dijagnostiku (23%), mikrosone i mikrošpricevi (22%) i mikrobolometri (20%) .



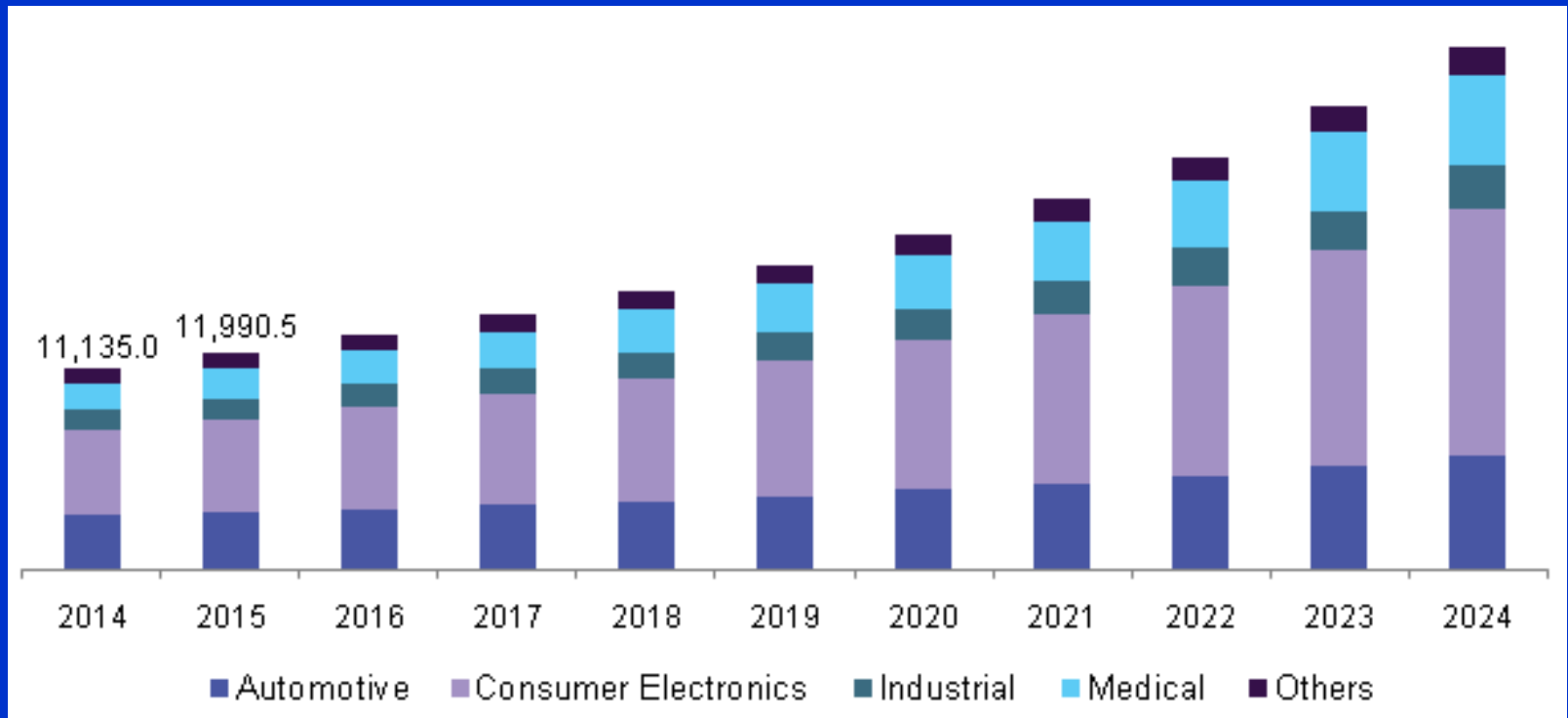
# Tržište mikrosistema

- MEMS u proizvodima široke potrošnje, mobilne aplikacije, na primer iPhone, iPad i iPod, predstavljaju 50% ukupne količine MEMS uređaja. U 2012. godini je proizvedeno 7 milijardi MEMS uređaja, što predstavlja rast od 17% u odnosu na 2011. godinu, a čak 54% u odnosu na 2010. godinu.
- Detekcija pomeraja (rotiranje ekrana od vertikalnog ka horizontalnom položaju) je našla široku primenu u mobilnim telefonima, pejsmejkerima, inteligentnoj municiji što je uslovalo rast potražnje i proizvodnje merača ubrzanja, žiroskopa i elektronskih kompasa.
- MEMS mikrofoni se ugrađuju u mobilne telefone i zamenjuju do skora korišćene mikrofone na bazi elektrokondenzatora. Mikrofoni, merači ubrzanja, žiroskopi i magnetometri čine više od polovine svih MEMS uređaja napravljenih u 2011. godini





# Tržište mikrosistema



Globalni razvoj MEMS tržišta po oblastima 2014 - 2024 (USD Million)



# Tehnologije i postupci za proizvodnju MEMS

- Proizvodnja MEMS proističe iz tehnologija razvijenih u proizvodnji poluprovodnika kao što su: depozicija, fotolitografija i nagrivanje.
- MEMS odlikuje velika vrednost odnosa površina/zapremina (tzv „aspekt odnosa”), pa su površinski efekti (kvašenje i elektrostatički efekti) dominantni u odnosu na zapreminske efekte (inercija i toplotna energija).
- Tri najčešće primenjivane procesne tehnologije, koje se koriste za proizvodnju MEMS su:
  - I. mikrofabrikacija u masi,
  - II. mikrofabrikacija površine i
  - III. LIGA proces.



# Tehnologije i postupci za proizvodnju MEMS

Procesi fabrikacije u MEMS-u se mogu podeliti u nekoliko grupa:

1. Litografija - obuhvata tehnike kojima se prenose željeni oblici struktura na maskirajući materijal (npr. fotosenzitivni polimer u slučaju fotolitografije) i kasnijim nagrivanjem i obradom projektovani oblik biva prenet na Si podlogu (wafer).
2. Tehnike suvog nagrivanja (dry etching) – obuhvata familiju metoda i postupaka kojima se čvrsta površina uzorka nagriza u gasnoj fazi, modifikuje fizičkim bombardovanjem, hemijskom reakcijom površine sa hemijskim reagensima ili kombinovanim fizičko-hemijskim mehanizmima.
3. Tehnike formiranja različitih slojeva - oksidacija Si, PVD (fizička depozicija iz parne faze), CVD (hemijska depozicija iz parne faze), epitaksija, elektrohemijska depozicija itd.
4. Zapreminsko mikromašinstvo u supstratu gde se strukture formiraju u masivnom materijalu (bulk-u) silicijuma, SiC, kvarca, GaAs, Ge, i stakla itd, izotropnim i anizotropnim nagrivanjem.
5. Površinsko mikromašinstvo - ova tehnologija omogućava formiranje struktura sukcesivnom depozicijom slojeva na površini supstrata (najčešće Si) i njihovom sukcesivnom obradom različitim tehnikama izotropnog i anizotropnog nagrivanja.
6. Tehnike inkapsulacije i formiranja električne i fizičke veze MEMS komponente i sredine u kojoj ona funkcioniše.



# Materijali za proizvodnju MEMS

- MEMS i delovi za MEMS uređaje proizvode se od silicijuma, polimera, metala, keramike i kompozitnih materijala.
- Silicijum je, kao materijal koji se koristi za proizvodnju integrisanih kola, najzastupljeniji u modernom svetu. Dostupnost finansijski povoljnih visokokvalitetnih materijala i mogućnost ugrađivanja elektronske funkcionalnosti, omogućile su da silicijum bude atraktivan za široku primenu kod MEMS aplikacija .
- Zamena za silicijum su polimeri, jer mogu da se proizvode u velikim količinama uz raznovrsne karakteristike. Osnovne prednosti polimera su elastičnost, optička svojstva i biokompatibilnost.
- Metali za proizvodnju MEMS elemenata su zlato, nikl, bakar, volfram, aluminijum, hrom, titan, platina i srebro.
- Keramički materijali koji se sve više koriste za proizvodnju MEMS su nitridi silicijuma aluminijuma i titana, kao i silicijum-karbid .





# Mikrosenzori i mikropokretači

- Najznačajniji i najinteresantniji elementi MEMS sistema su mikrosenzori i mikropokretači. To su uređaji koji konvertuju energiju iz jednog oblika u drugi.
- Kod mikrosenzora, tipično je da uređaj pretvara mereni mehanički signal u električni signal. Mikrosenzori takođe mogu da detektuju promene u okolini merenjem toplotnih, magnetnih, hemijskih ili elektromagnetnih efekata. Ove informacije se obrađuju pomoću mikroelektronike, koja daje signal mikropokretačima da reaguju u vidu promene prema okolini.
- Mikropokretači mogu da se koriste za mehaničko pokretanje delova uređaja, za merenje određenih fizičko–hemijskih svojstva iz čovekove okoline ili čak da obezbede kretanje robota . U osnovi, mikropojačivači proizvode mehanički otklon kao odziv na pobudu nastalu iz energetske izvora. Uobičajeni oblici pobude su elektrostatička, toplotna i magnetna.
- Tehnike koje se koriste za detektovanje mehaničkog otklona zasnivaju se na kapacitivnim, piezootpornim i optičkim efektima.



# Primeri mikrosistema

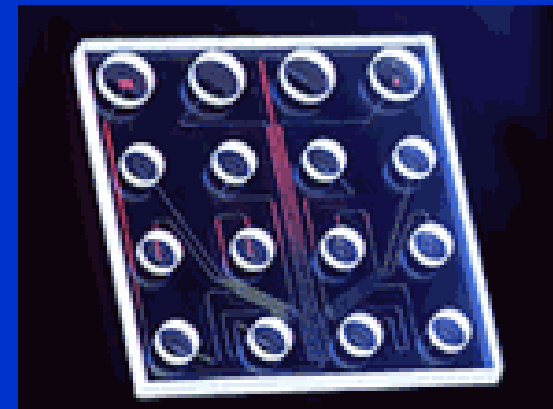
Žiroskop



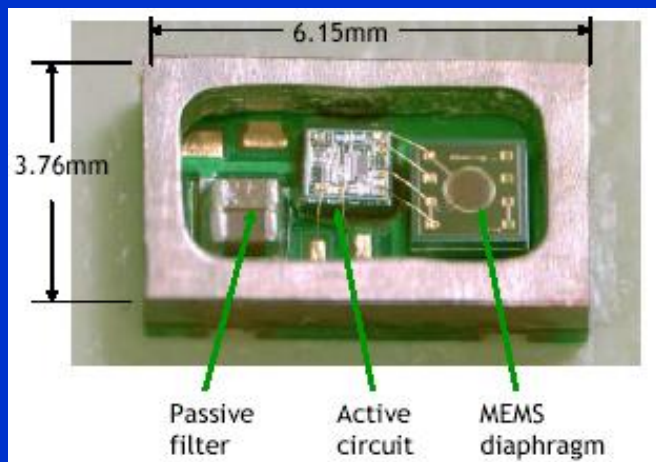
Rotacioni motor



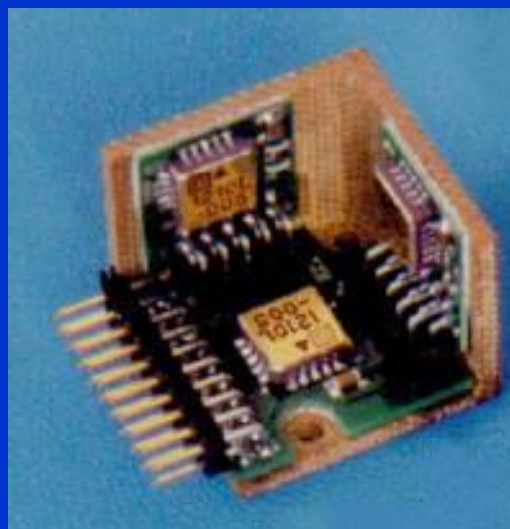
MEMS za mikrofluide



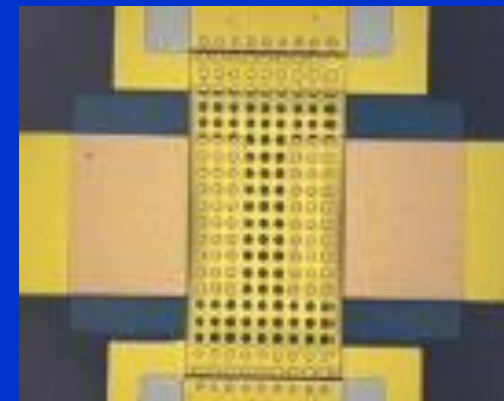
MEMS mikrofoni



3-osni akcelerometar



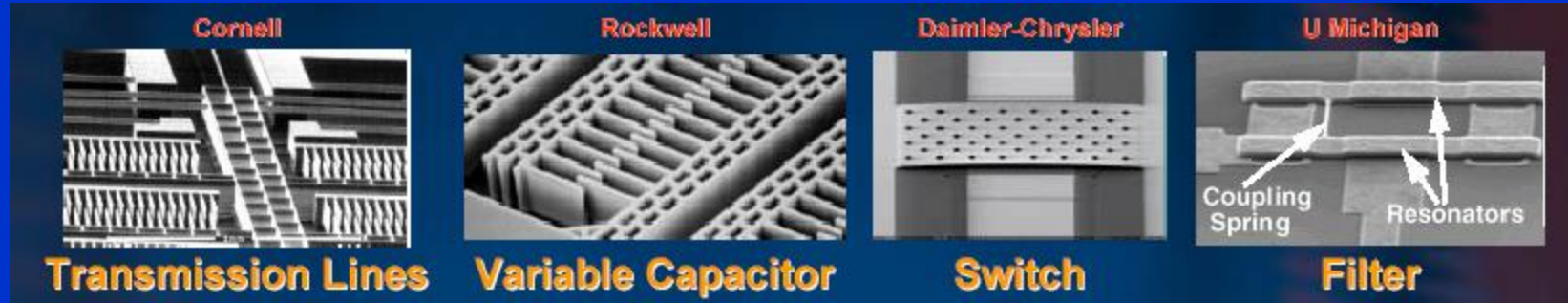
Mikrotalasni prekidač





# Primeri mikrosistema

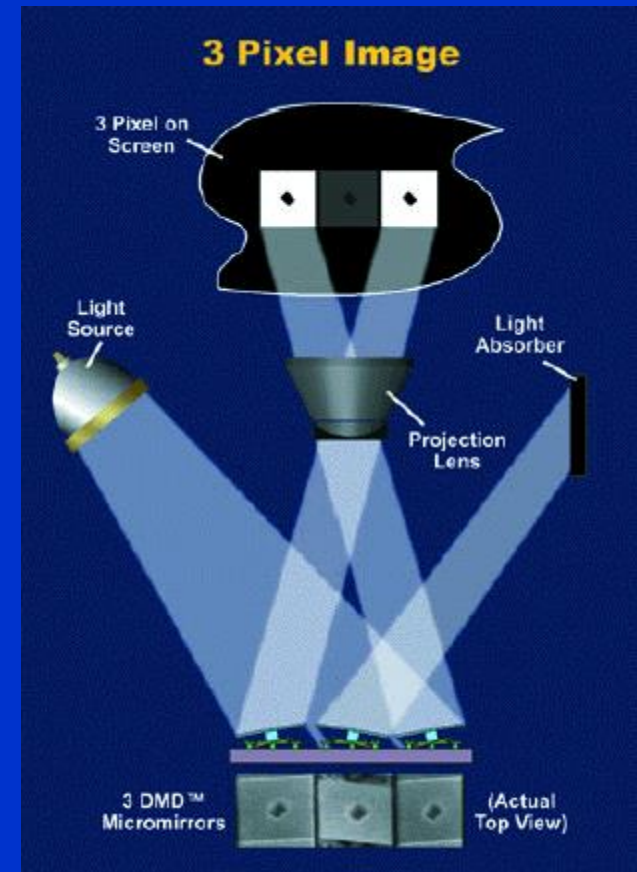
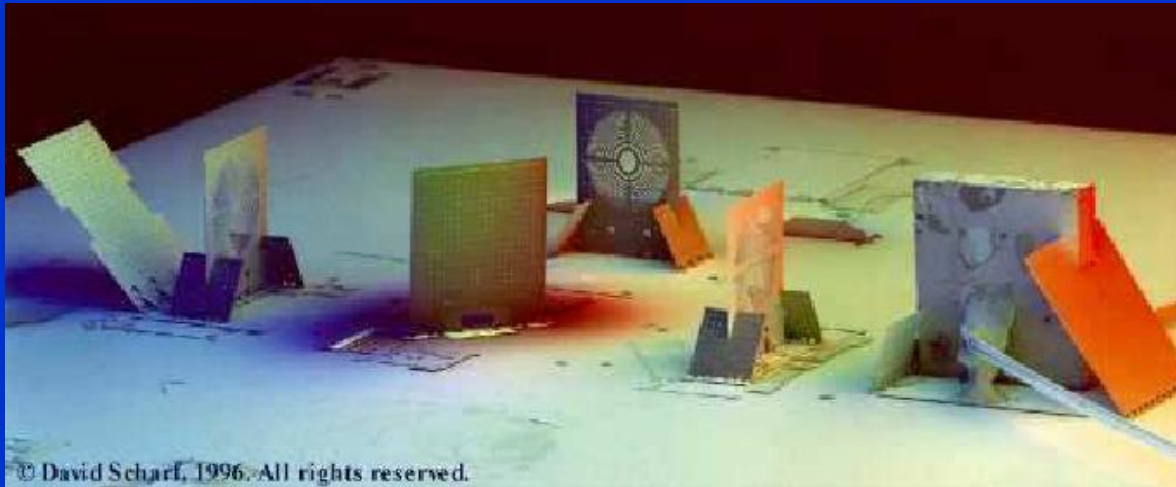
## RF MEMS



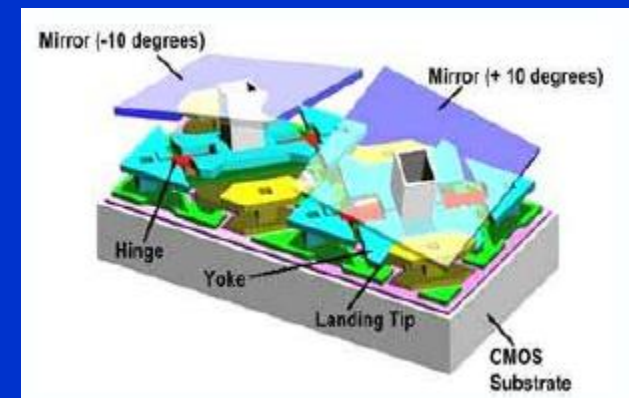


# Primeri mikrosistema

Integrirana mikro optika: laser, spliter snopa, Fresnolova sočiva, ogledalo, fotosenzor



Digital Light Processing (DLP)

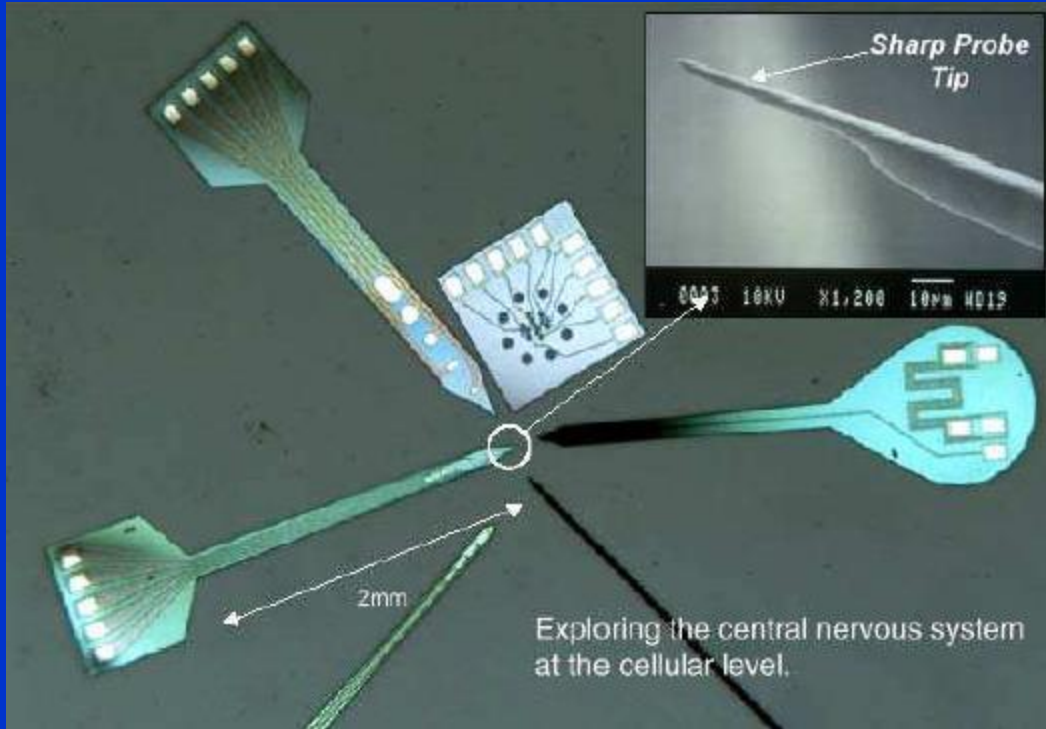


DMD



# Primeri mikrosistema

## Neuronske mikroprobe



## Mikropincete

