

MESTERSÉGEM CÍMERE – F, mint FIZIKUS



József Attila Gimnázium és Eü. Szakközépiskola – spec. mat.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem

- Mérnök fizikus (1999), MBA (2002), Ph.D (2004)



Magyar Tudományos Akadémia

Energiatudományi Kutatóközpont

Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet

- **MEMS Laboratórium és a BIOMEMS csoport vezető**
- Szilícium és polimer alapú **szenzorok, mikro- és nanofluidikai rendszerek fejlesztése és vizsgálata** (MEMS, BIOMEMS)



Tateyama Kagaku Ind. Co. Ltd.,
Toyama, Japan

- 3-irányú szilícium gyorsulásérzékelő



Furtwängli Egyetem

- nedvességérzékelő fejlesztése

Mikromechanika és MEMS technológia oktatás a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen



A SZILÍCIUM (silex)

THE ELEMENTS

H 1 Hydrogen	He 2 Helium																
Li 3 Lithium	Be 4 Beryllium																
Na 11 Sodium	Mg 12 Magnesium																
K 19 Potassium	Ca 20 Calcium	Sc 21 Scandium	Ti 22 Titanium	V 23 Vanadium	Cr 24 Chromium	Mn 25 Manganese											
Rb 37 Rubidium	Sr 38 Strontium	Y 39 Yttrium	Zr 40 Zirconium	Nb 41 Niobium	Mo 42 Molybdenum	Tc 43 Technetium											
Cs 55 Cesium	Ba 56 Barium	Hf 72 Hafnium		Ta 73 Tantalum	W 74 Tungsten	Re 75 Rhenium											
Fr 87 Francium	Ra 88 Radium	Rf 104 Rutherfordium		Db 105 Dubnium	Sg 106 Seaborgium	Bh 107 Bohrium											
Radioactive elements		La 57 Lanthanum	Ce 58 Cerium	Pr 59 Praseodymium	Nd 60 Neodymium	Pm 61 Promethium											
		Ac 89 Actinium	Th 90 Thorium	Pa 91 Protactinium	U 92 Uranium	Np 93 Neptunium											

Photo credit: © 2000 Theodore W. Gray and Rick Meeks.
All other photos are © 2000 Theodore W. Gray and Rick Meeks. All other photos are © 2000 Theodore W. Gray and Rick Meeks.

B 5 10.81 Boron	C 6 12.011 Carbon	N 7 14.007 Nitrogen
Al 13 26.982 Aluminum	Si 14 28.085 Silicon	P 15 30.974 Phosphorus
Ga 31 69.723 Gallium	Ge 32 72.64 Germanium	As 33 74.922 Arsenic

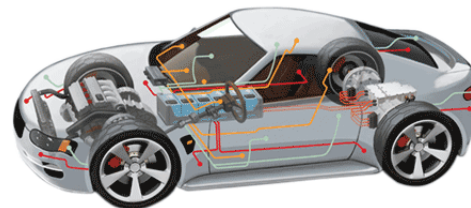
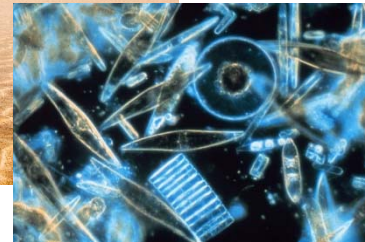
A SZILÍCIUM

Felfedező: Jons Berzelius
1823, Svédország

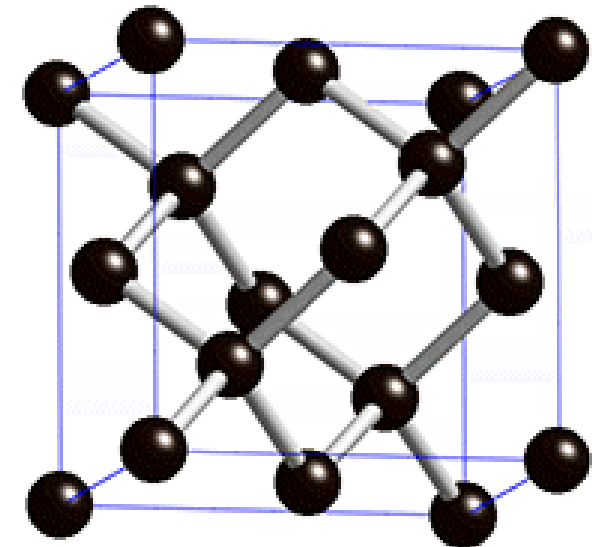
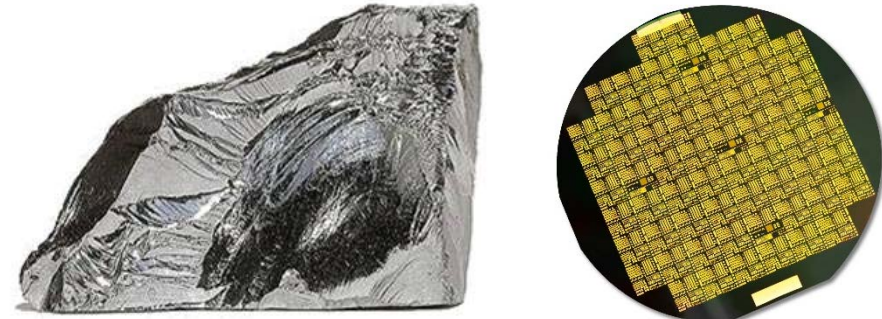
Természetes előfordulás:
gránit, kvarc, agyag, homok

2. leggyakoribb elem a Földön

Egyéb felhasználás...



A SZILÍCIUM – mint kémiai elem



Tulajdonság: szürke színű, fémesen csillogó, nagyon kemény anyag.

Rendszám: 14 ($1s^2 2s^2 2p^6 / 3s^2 3p^2$)

4. főcsoport / félfém

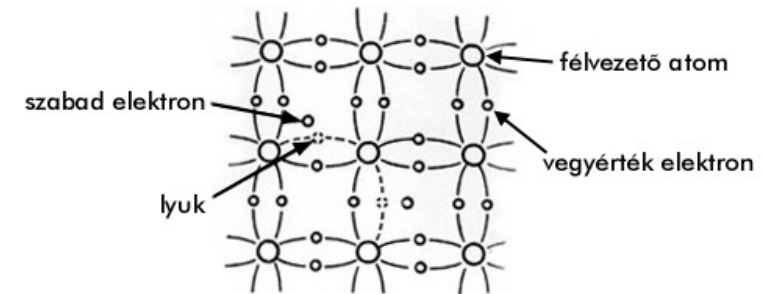
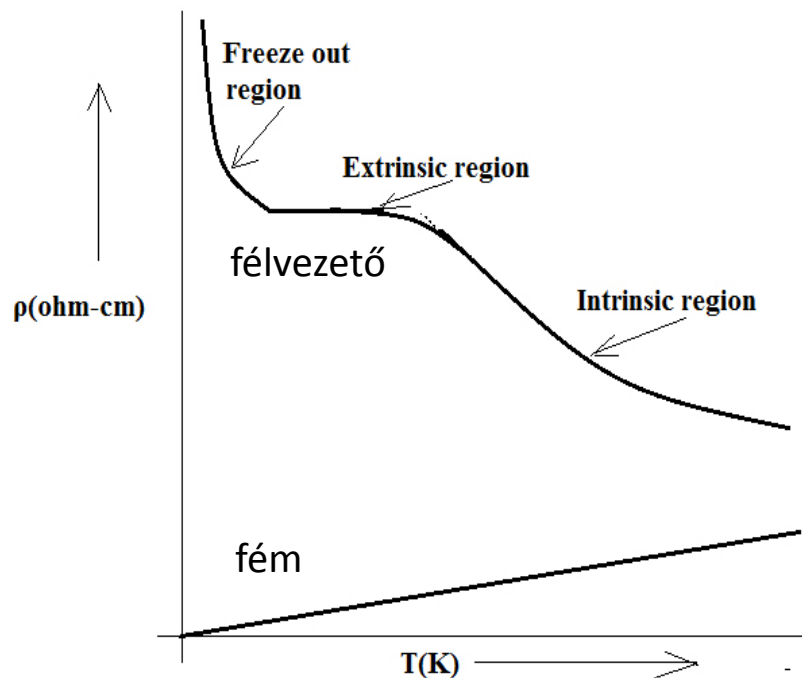
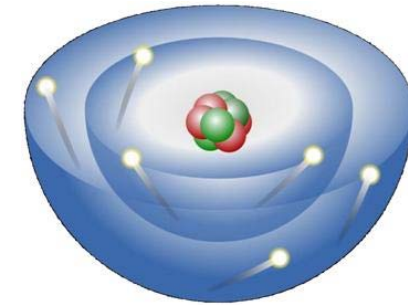
Rács: a gyémántéhoz hasonló

Elektromos tulajdonság: FÉLVEZETŐ

A FÉLVEZETŐK

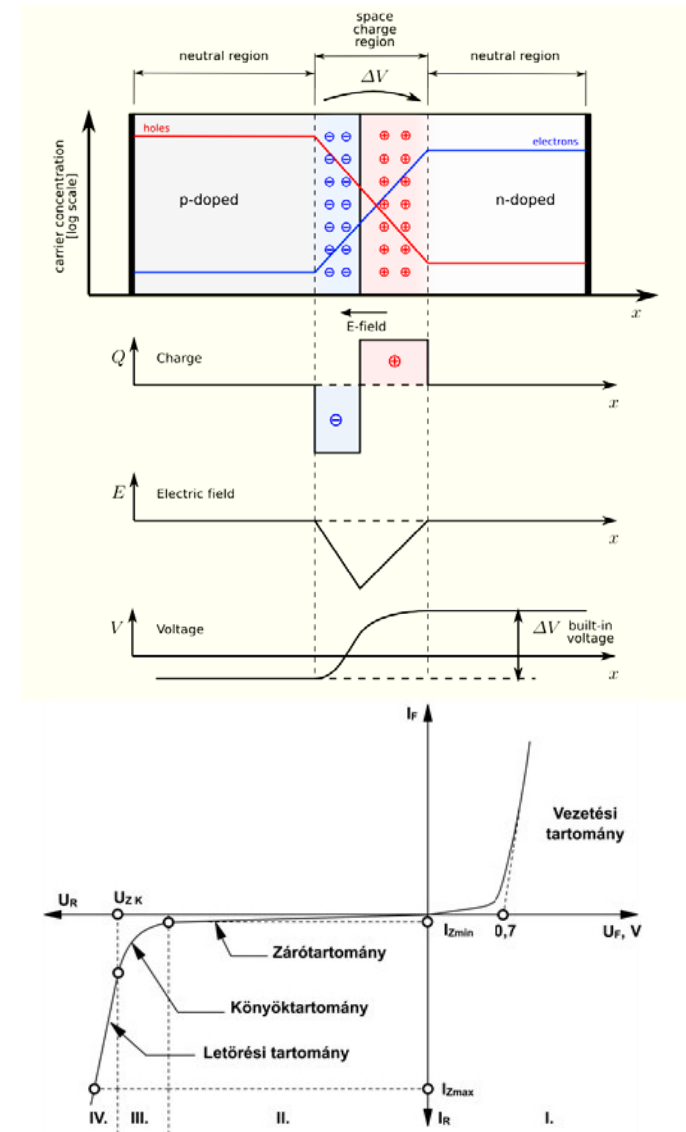
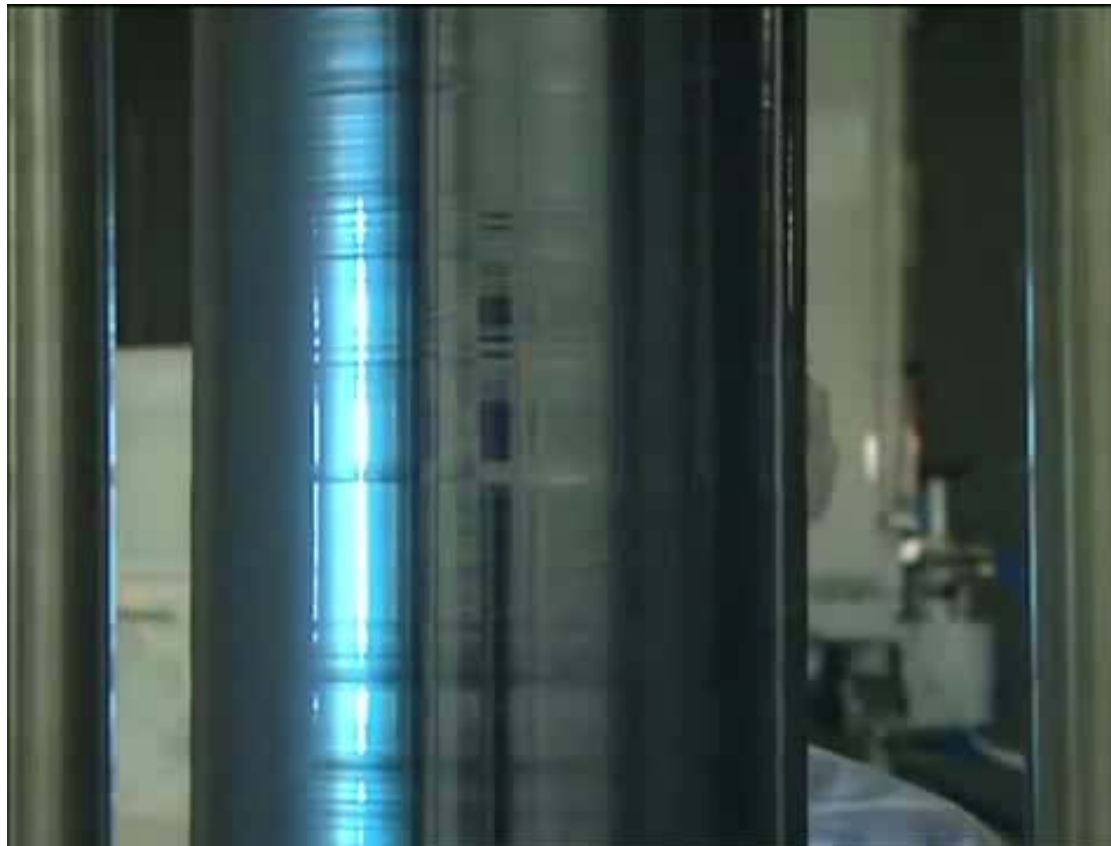
Hogyan változik a vezetők ellenállása a hőmérséklettel?

A félvezetők ellenállása: **negatív hőmérsékleti együttható**



A DIÓDA

Adalékolt félvezetők: n (elektron) és p (lyukvezető) típus



A TRANZISZTOR



The Nobel Prize in Physics 1956



William Bradford Shockley
Prize share: 1/3



John Bardeen
Prize share: 1/3



Walter Houser Brattain
Prize share: 1/3

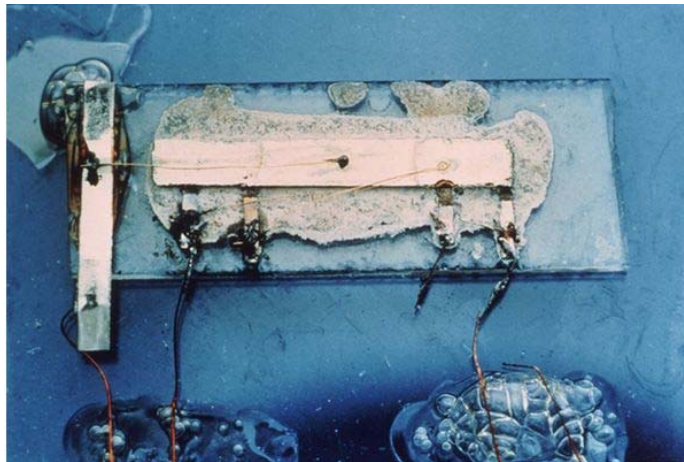
The Nobel Prize in Physics 1956 was awarded jointly to William Bradford Shockley, John Bardeen and Walter Houser Brattain *"for their researches on semiconductors and their discovery of the transistor effect"*.

Helyettesíti az elektroncsövet.

Funkciók:

kapcsoló / erősítő / feszültségstabilizálás

AZ ELSŐ INTEGRÁLT ÁRAMKÖR



- A tranzisztor megoldás az elektroncső problémáira (pl. fogyasztás, megbízhatatlanság).
- Az integrált áramkör megoldja a diszkrét elemek kapcsolásának problémáit (helytakarékoság).

The Nobel Prize in Physics 2000



Zhores I. Alferov
Prize share: 1/4



Herbert Kroemer
Prize share: 1/4



Jack S. Kilby
Prize share: 1/2

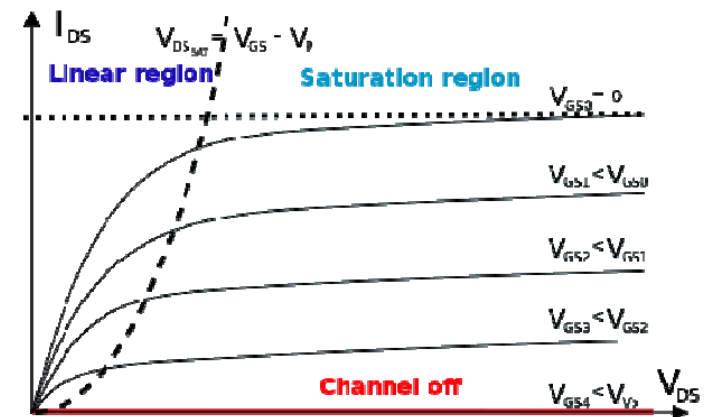
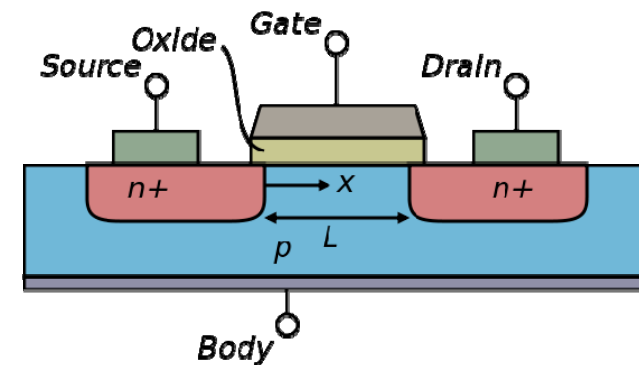
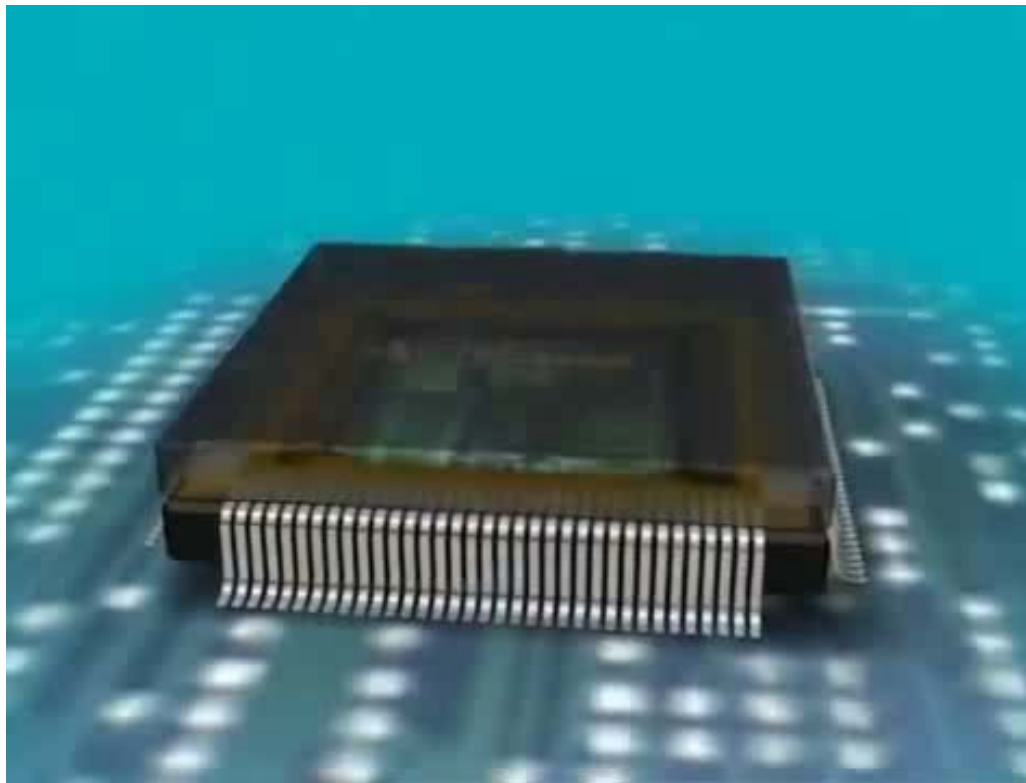
The Nobel Prize in Physics 2000 was awarded *"for basic work on information and communication technology"* with one half jointly to Zhores I. Alferov and Herbert Kroemer *"for developing semiconductor heterostructures used in high-speed- and optoelectronics"* and the other half to Jack S. Kilby *"for his part in the invention of the integrated circuit"*.

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

TÉRVEZÉRELT TRANZISZTOR (FET)

A CPU és a memória alapegysége

Funkciók: erősítés (analóg jelek), kapcsoló





AZ ELSŐ SZÁMÍTÓGÉP

Neumann János (1903-1957)



Kidolgozta az elektronikus számítógépek logikai elrendezését a kettes számrendszert alapján.

Alapelemei: memória, programtárolás, utasítás rendszer

A SZÁMÍTÁSI KAPACITÁS FEJLŐDÉSE

1 The accelerating pace of change ...



2 ...and exponential growth in computing power ...

Computer technology, shown here climbing dramatically by powers of 10, is now progressing more each hour than it did in its entire first 90 years

COMPUTER RANKINGS
By calculations per second per \$1,000



Analytical engine
Never fully built, Charles Babbage's invention was designed to solve computational and logical problems



Colossus
The electronic computer, with 1,500 vacuum tubes, helped the British crack German codes during WW II



UNIVAC I
The first commercially marketed computer, used to tabulate the U.S. Census, occupied 943 cu. ft.

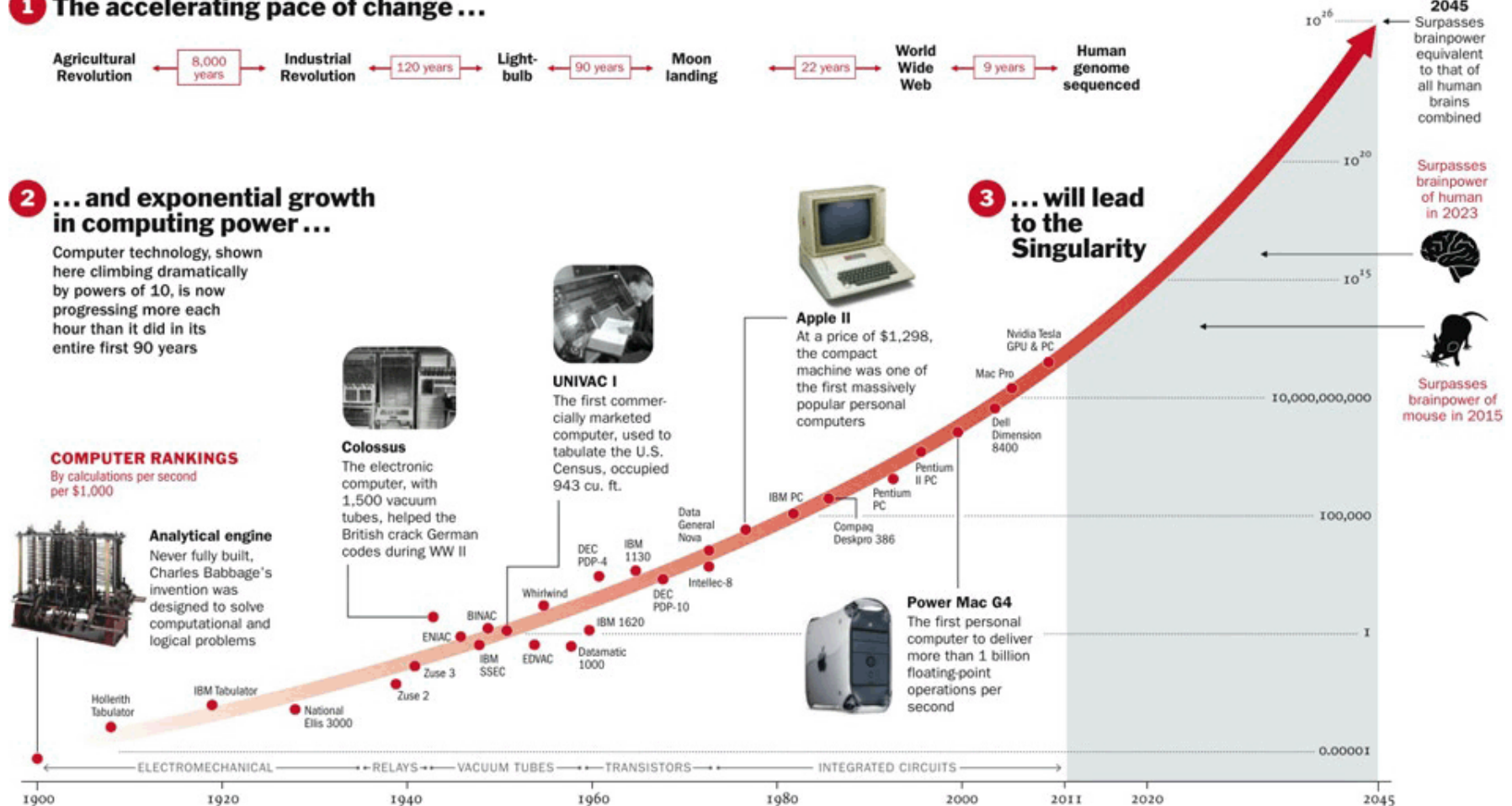


Apple II
At a price of \$1,298, the compact machine was one of the first massively popular personal computers



Power Mac G4
The first personal computer to deliver more than 1 billion floating-point operations per second

3 ... will lead to the Singularity

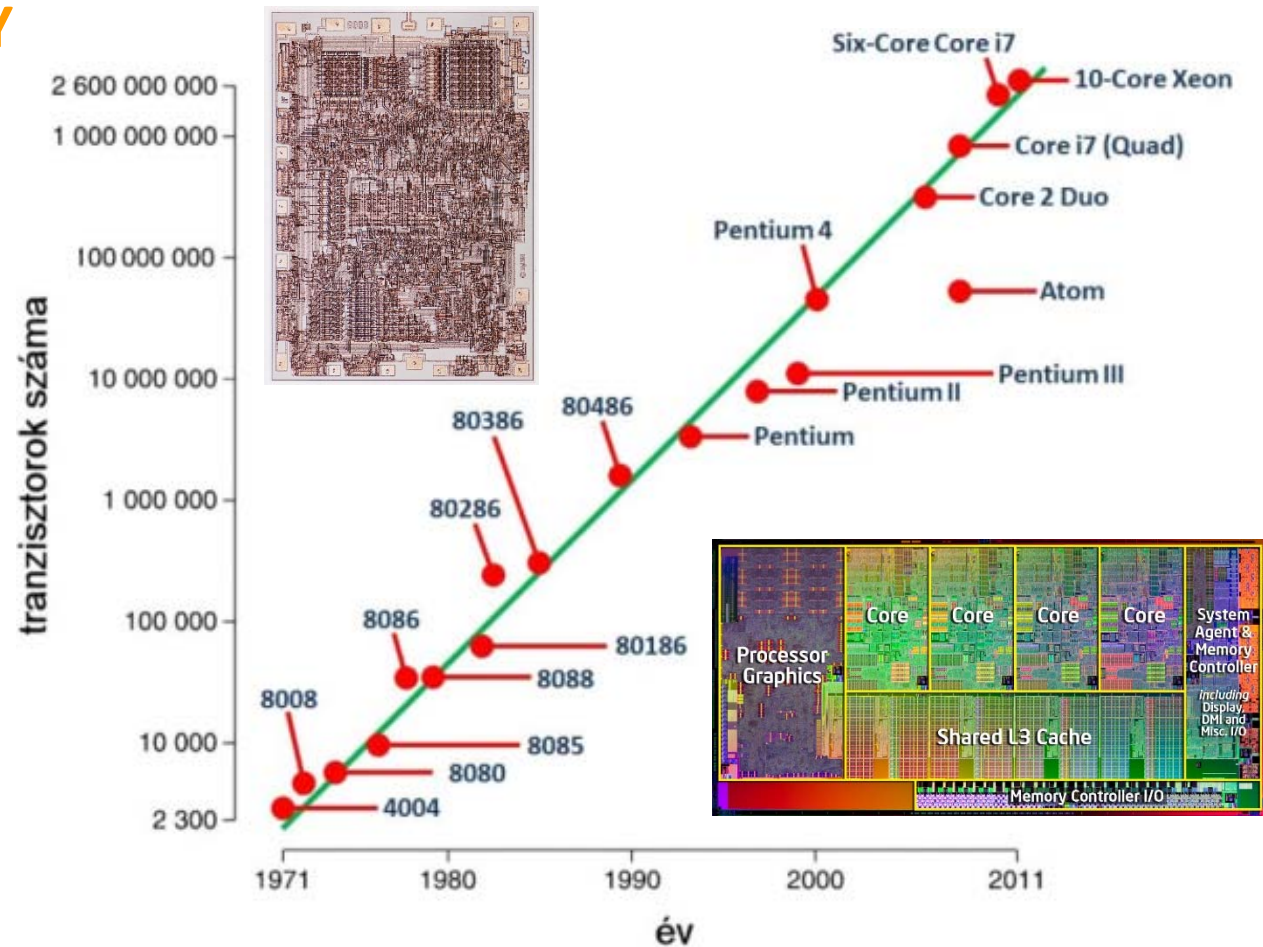


HÁNY TRANZISZTOR FÉR EL EGY CHIPEN?

A MOORE TÖRVÉNY



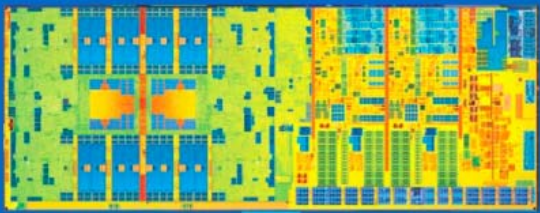
Gordon Moore (1965)



INTEL CORE i7

5th Gen Intel Core Processor
Intel® Core™ i7-5600U Processor with Intel® HD Graphics 5500 with Intel® HD Graphics 4400¹

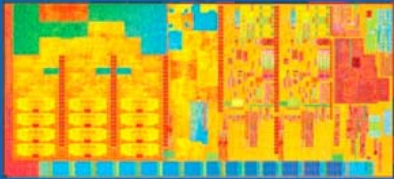
4th Gen Intel® Core™ Processor
0.96B transistors, 131mm²



35% more transistors



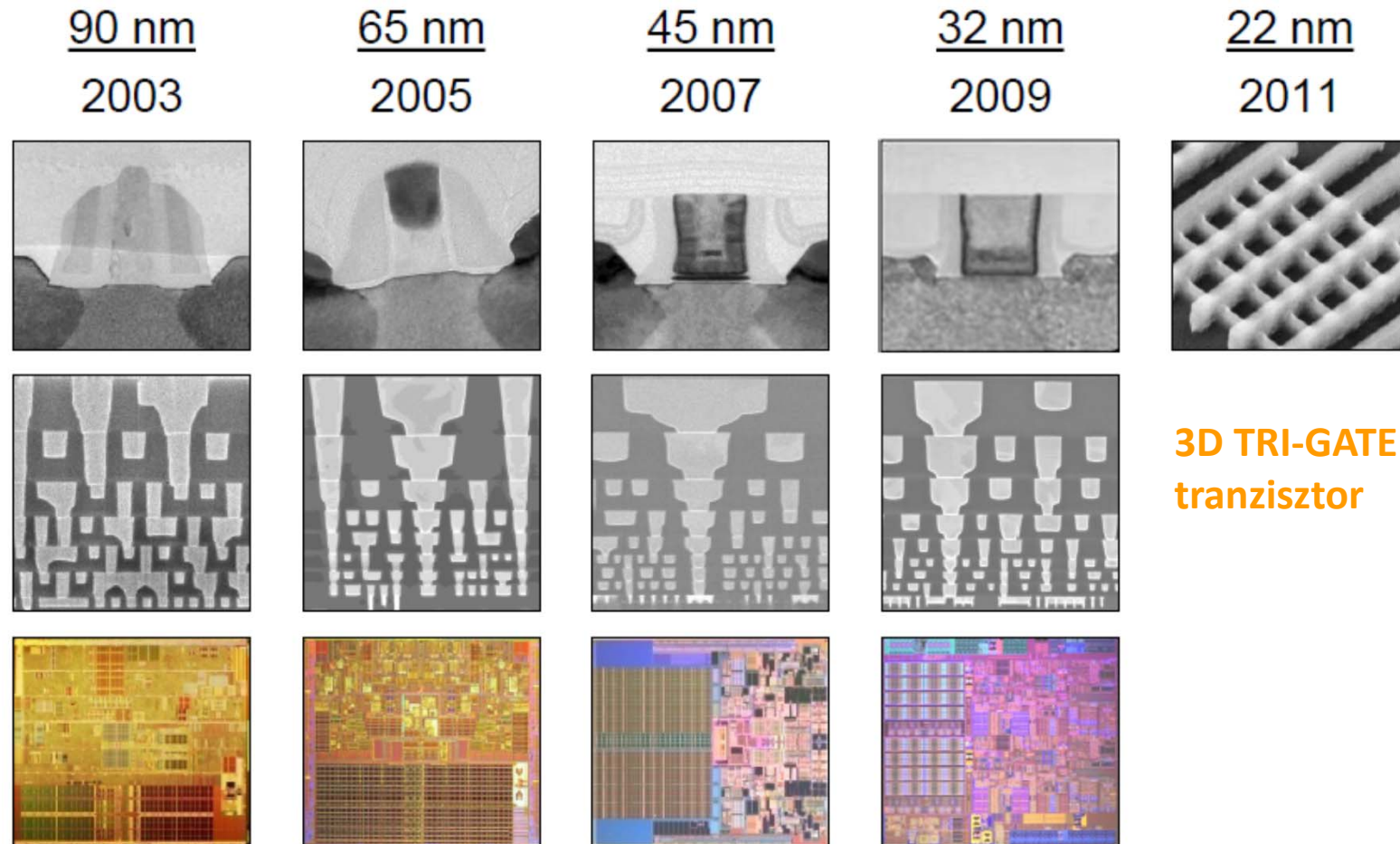
37% smaller die size



5th Gen Intel® Core™ Processor
1.3B transistors, 82mm²



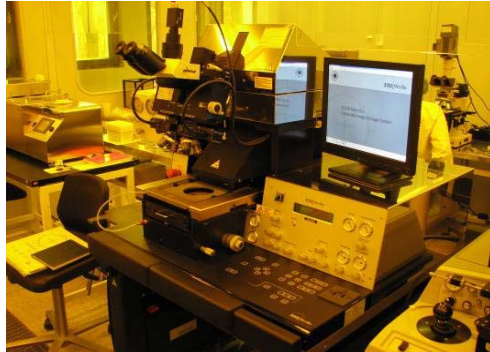
INTEL 2003 - 2011



TECHNOLÓGIA: a homoktól a processzorig



INFRASTRUKTÚRA – MIKRO / NANO – MTA EK MFA



MEMS labor:

300+150 m² clean room (4inch wafers) - 1µm felbontású maszkkészítés (Heidelberg laser PG & direkt írás),

Maszkillesztő / nanoimprinting rendszer (Karl Süss MA 6, Quintel),
DRIE (Oxford Instruments Plasmalab 100),
Fizikai és kémiai rétegleválasztások
(párolgatás, porlasztás, 2x4 diffúziós cső, LPCVD, ALD),
Wafer bonder (Karl Süss BA 6), ion implanter, etc.



Nanoskálás megmunkálás és karakterizáció:

E-BEAM, FIB, SEM, TEM, AFM, XPS, EDX, Auger, SIMS

RAITH 150 E-BEAM

Direct írás / maszkgyártás
Ultra nagy felbontás (8nm)



Zeiss-SMT LEO 1540 XB SEM, Canon FIB nanoprocessing system

SEM és fókuszált ionnyaláb (FIB),
Gáz injektáló rendszer (GIS) (EBAD, IBAD)
és Energia Diszperzív Spektroszkóp (EDS)

INFRASTRUKTÚRA – MIKRO / NANO – INTEL FAB



MORE THAN MOORE

MEMS: az érzékelők forradalma

MEMS: SI SZENZOROK

mikro-elektromechanikai rendszerek



- 1 - Headlamp levelling control / Interior Lighting controls / Infotainment controls / Instrument panel dimming controls / Traction control / HVAC controls / Airbag enable-disable / Tachograph mode switch / Navigation system function select
- 2.- Mirror memory
- 3.- Door position sensor
- 4.- Seat:
 - Seat heating control
 - Recliner position sensor
 - Head restraint position sensor
 - Lumbar position sensor
 - Seat memory position sensor (linear & rotary)
- 5.- Headlamp levelling sensor / Adaptive frontlighting
- 6.- HVAC air flap position sensor
- 7.- Windshield wiper delay control / Steering angle position sensor
- 8.- Gear select position sensor
- 9.- Window position sensor
- 10.- Pedal position sensor
- 11.- Suspension & chassis height
- 12.- Throttle position / air-intake valve
- 13.- Swirl system / EGR
- 14.- Liquid level sensor
- 15.- Power sunroof control / Convertible hood control
- 16.- Rear-view mirror actuator feedback sensor
- 17.- Anti-collision radar
- 18.- Anti-pinch sensor / Aided parking

GUESS WHO?

Steve Jobs

APPLE





Apple II (1977):



Lisa (1983):



Macintosh (1984):



NeXT (1989):



iMac (1998):



iPod (2001):



iPhone (2007):



iPad (2010):

SZEDJÜK SZÉT VIRTUÁLIS IPHONE-UNKAT!



2008/09 IPHONE

- Gyorsulásmérő (diszkrét)
- Proximity
- Környezeti világítás

2010/11 IPHONE

- Giroszkóp
- Magnetométer
- MEMS mikrofon
- Gyorsulásmérő (diszkrét)
- RGB / Proximity COMBO
- Környezeti világítás

2012/13 IPHONE 5

- Ujjlenyomat
- Giroszkóp
- Magnetométer
- MEMS mikrofon
- Gyorsulásmérő (diszkrét)
- Proximity
- Környezeti világítás

2012/13 IPHONE 5

Szenzor Hub:

- Ujjlenyomat
- Giroszkóp
- Magnetométer
- Mikrofon
- Gyorsulásmérő (diszkrét)
- Proximity
- Környezeti világítás

2014 IPHONE 6

Szenzor Hub:

- Nyomás
- 6 tengelyű gyorsulásmérő
- Ujjlenyomat
- Giroszkóp
- Magnetométer
- Mikrofon
- Gyorsulásmérő (diszkrét)
- Proximity
- Környezeti világítás

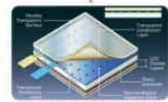
SZENZOROK AZ IPHONE-BAN

Környezeti világítás:
a képernyő
fényerejének
beállításához (akku
élettartam)



Ambient Light

Érintőképernyő:
érintés
helyinformáció a
processzor
számára



Touch Screen

Proximity:
Telefon távolságát méri a
felhasználó arcától.
Kikapcsolja a billentyűzetet
telefonálás közben.



Proximity

Ujjlenyomat:
A HOME gombba épített (ami
zafír borítású) kapacitív
szensor 500ppi felbontással.

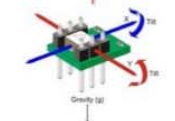


Fingerprint

Rotáció szenzor (a normál
horizonthoz képest): a GIRO
adataiból.

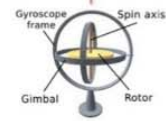


Attitude



Accelerometer

Gyorsulásérzékelő:
Az eszköz gyorsulását méri 3
tengely irányában (pl.
gravitáció). MEMS eszköz.



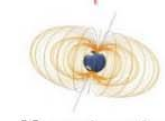
Gyroscope

GIROszkóp:
a forgási sebességet méri a
különböző tengelyek körül.
MEMS eszköz.



Moisture

Nedvesség:



Magnetometer

Magnetométer:
a Föld mágneses terét
méri 3 merőleges irány
mentén.

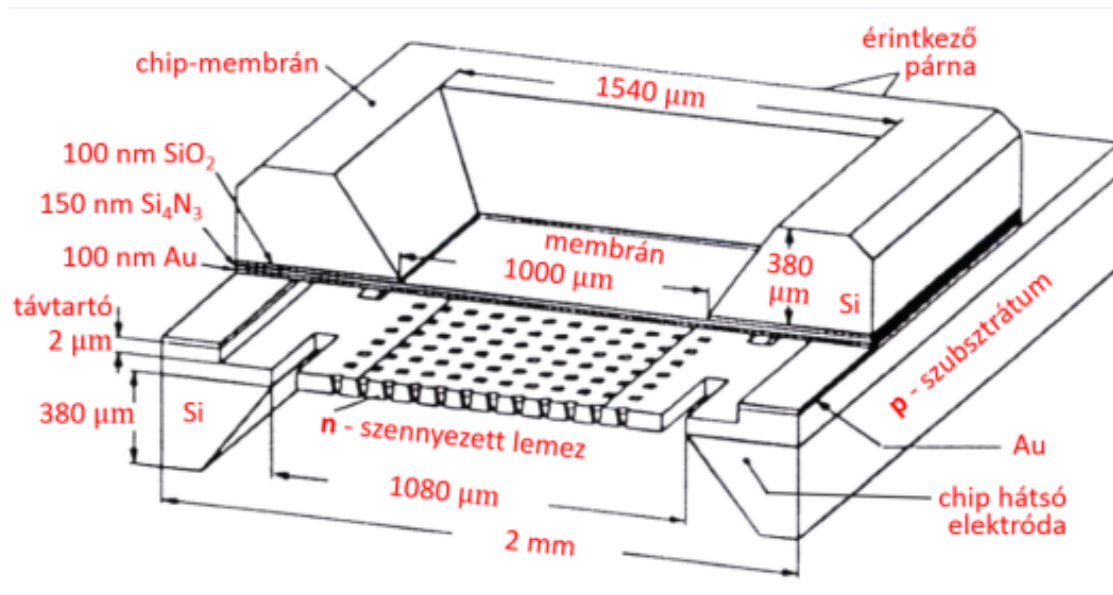


Gravity

Gravitáció:
a gravitáció irányát
méri a 3D
gyorsulásérzékelő
szensor adatai alapján.

MIKROFON

High Performance MEMS mikrofonok (3-4db)



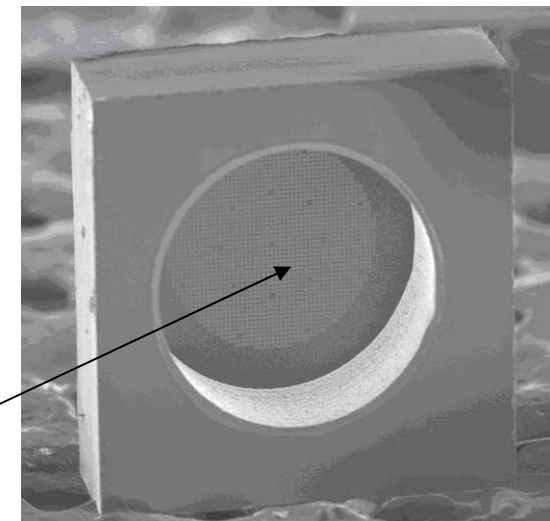
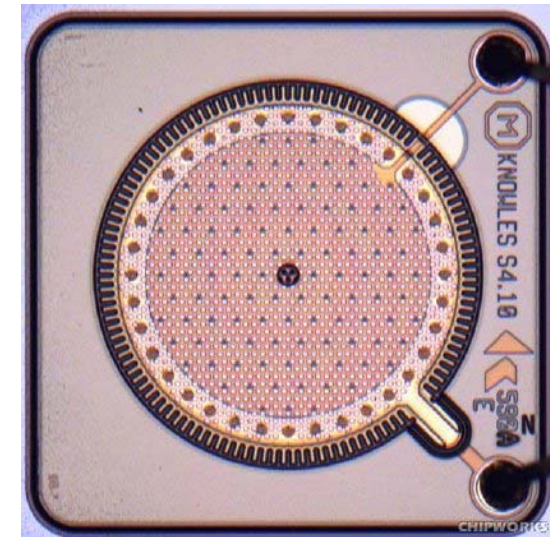
Felső elektróda: Au SiO₂ / SiN_x membrán

Alsó elektróda: n-Si

$$C_o = \epsilon \frac{A}{d}$$

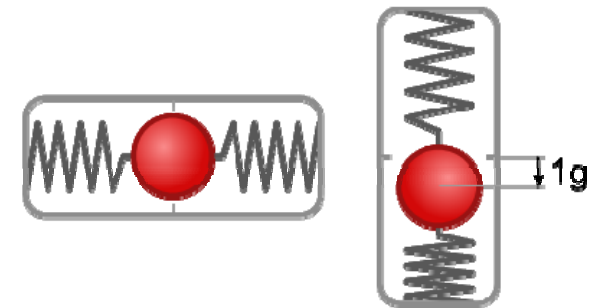
$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\epsilon \frac{A}{d^2}$$

DRIE (mély
reaktív
ionmarással)
mart membrán

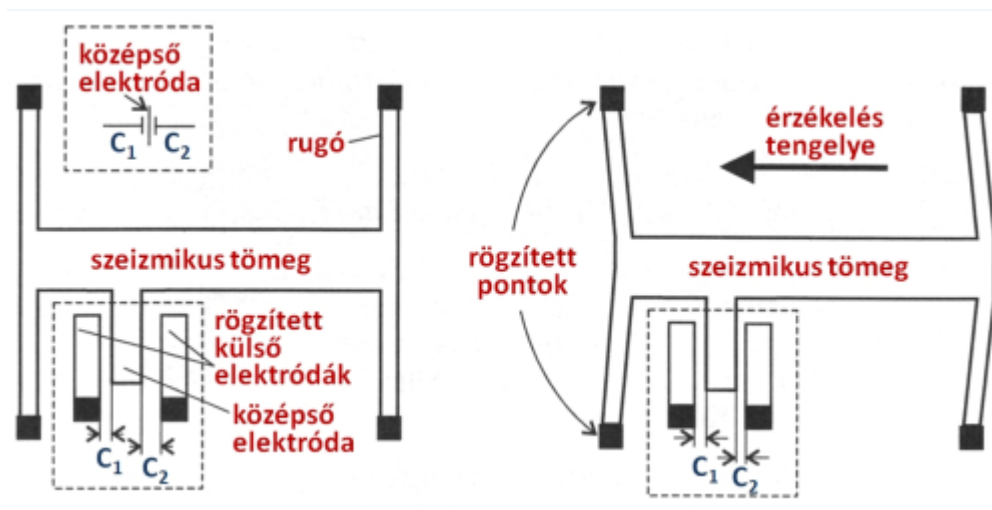


GYORSULÁS - GRAVITÁCIÓ

Képernyő forgatás: a gravitációs gyorsulás mérése



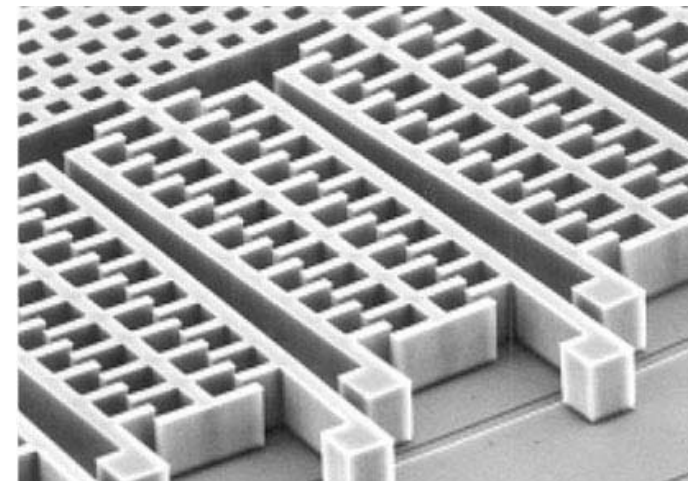
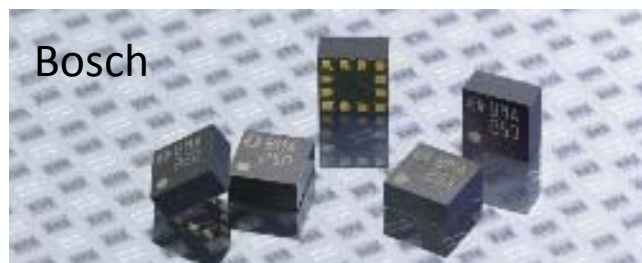
Kapacitív mérési elv: kondenzátor elektródáinak távolsága



Párhuzamos elektródájú (síkkondenzátor)
elrendezésben az érzékenység kis elmozdulások esetén:

$$C_o = \varepsilon \frac{A}{d}$$

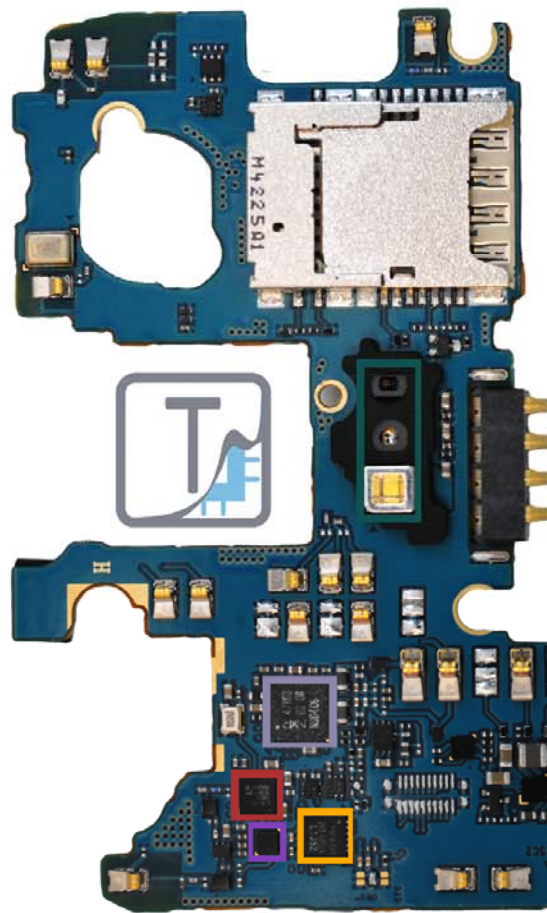
$$\frac{\Delta C}{\Delta d} = -\varepsilon \frac{A}{d^2}$$



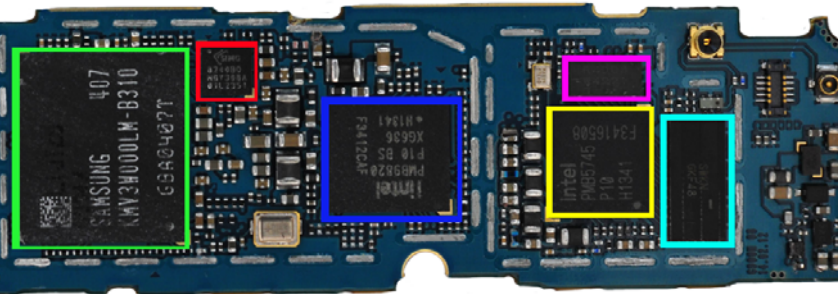
SZEDJÜK SZÉT VIRTUÁLIS SAMSUNG GALAXY S6-UNKAT IS!



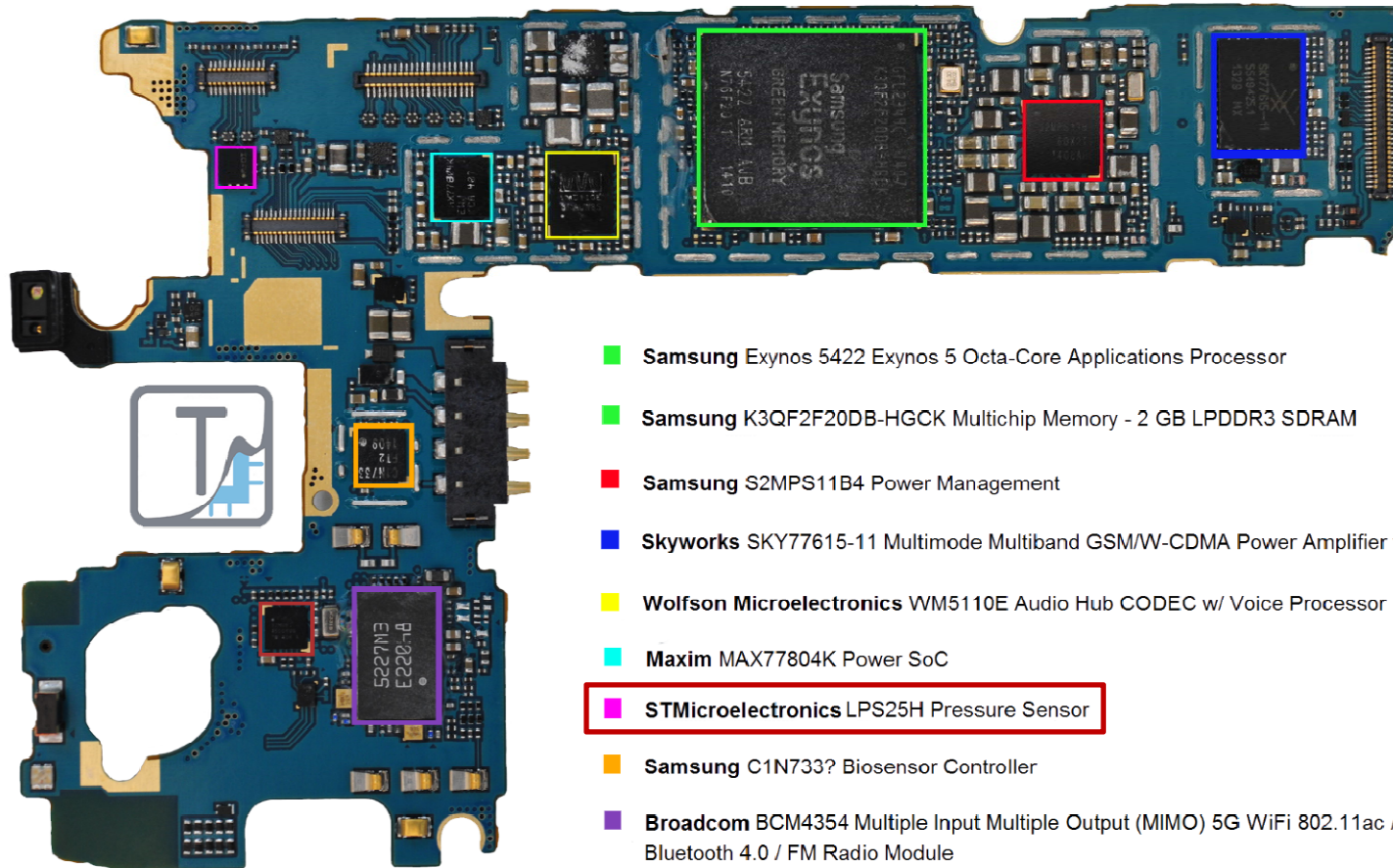
SZEDJÜK SZÉT VIRTUÁLIS SAMSUNG GALAXY S6-UNKAT IS!



- **Samsung** KMV3W000LM-B310 Multichip Memory - 16 GB MLC NAND Flash, 64 MB Mobile DDR SDRAM, Memory Controller
- **Silicon Image** SiI8240 MHL 2.0 Transmitter w/ HDMI Input
- **Intel** X-Gold 636 / PMB9820 Baseband Processor & Power Management
- **Intel** SMARTi UE3 / PMB5745 GSM / W-CDMA RF Transceiver
- **Murata** SWKN GKF48 Main Antenna Switch w/ Duplexers & Filters
- **Murata** ? R4D08 ? Receive Diversity Switch w/ SAW Filters
- **Invensense** MPU-6500 6-Axis MEMS Gyroscope & Accelerometer
- **Yamaha** YAS532B 3-Axis Electronic Compass
- **Broadcom** BCM47531 GPS / GNSS Receiver
- **NXP Semiconductor** PN547 NFC Controller
- **Maxim** OS21A Heart Rate Biosensor

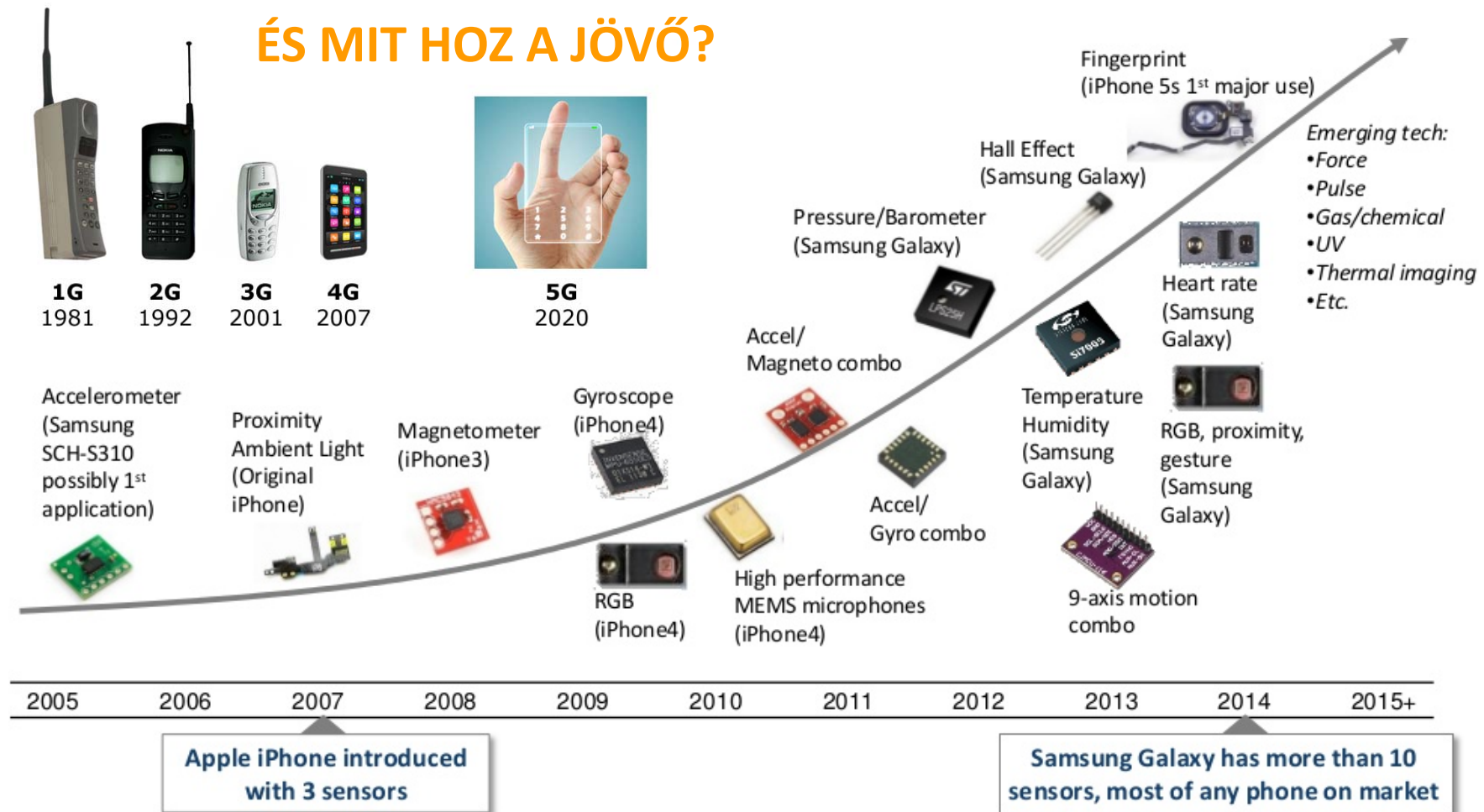


SZEDJÜK SZÉT VIRTUÁLIS SAMSUNG GALAXY S6-UNKAT IS!



- **Samsung** Exynos 5422 Exynos 5 Octa-Core Applications Processor
- **Samsung** K3QF2F20DB-HGCK Multichip Memory - 2 GB LPDDR3 SDRAM
- **Samsung** S2MPS11B4 Power Management
- **Skyworks** SKY77615-11 Multimode Multiband GSM/W-CDMA Power Amplifier w/ Switches
- **Wolfson Microelectronics** WM5110E Audio Hub CODEC w/ Voice Processor DSP
- **Maxim** MAX77804K Power SoC
- **STMicroelectronics** LPS25H Pressure Sensor
- **Samsung** C1N733? Biosensor Controller
- **Broadcom** BCM4354 Multiple Input Multiple Output (MIMO) 5G WiFi 802.11ac / Bluetooth 4.0 / FM Radio Module
- **STMicroelectronics** STM32Fxxxx 32-Bit Microcontroller

ÉS MIT HOZ A JÖVŐ?



Sources: This little motion sensor went to the market..., Sonja Thompson, IT News Digest, March 22, 2007; Willie D. Jones, IEEE Spectrum, A Compass in Every Smartphone, January 29, 2010; Consumers boost MEMS combo sensors, Electronic Product Design and Test, March 19, 2014; Samsung Turns up the Pressure on Competition with Pressure Sensor in Galaxy S4, IHS, March 20, 2013; Behind the sixth sense of smartphones: the Snapdragon processor sensor engine, Qualcomm, April 24, 2014; MEMS for Cell Phones & Tablets, Yole Developpement, May 2012; Fairchild, Emergence of a \$Trillion MEMS Sensor Market, SensorCon, 2012; MEMS Microphone Market Tops 2 Billion Units, Mobile Dev Design, March 4, 2013

ÚJ MEMS ESZKÖZÖK A TELEFONOKBAN (2018)



UV szenzor?
LIDAR?
Ultrahang?
Sugárzás szenzor?

- gyorsulásmérő / GIRO COMBO
- Nyomásmérő
- Nedvességérzékelő
- Hőmérő
- Még több mikrofon
- Szilícium oszcillátor az órához
- Antenna switch
- Gáz / biokémiai szenzor
- Autó fókusz (kamera)
- MEMS tükrök (PicoProjektor)
- Mikro hangszóró
- Érintőképernyő
- Infravörös szenzor?

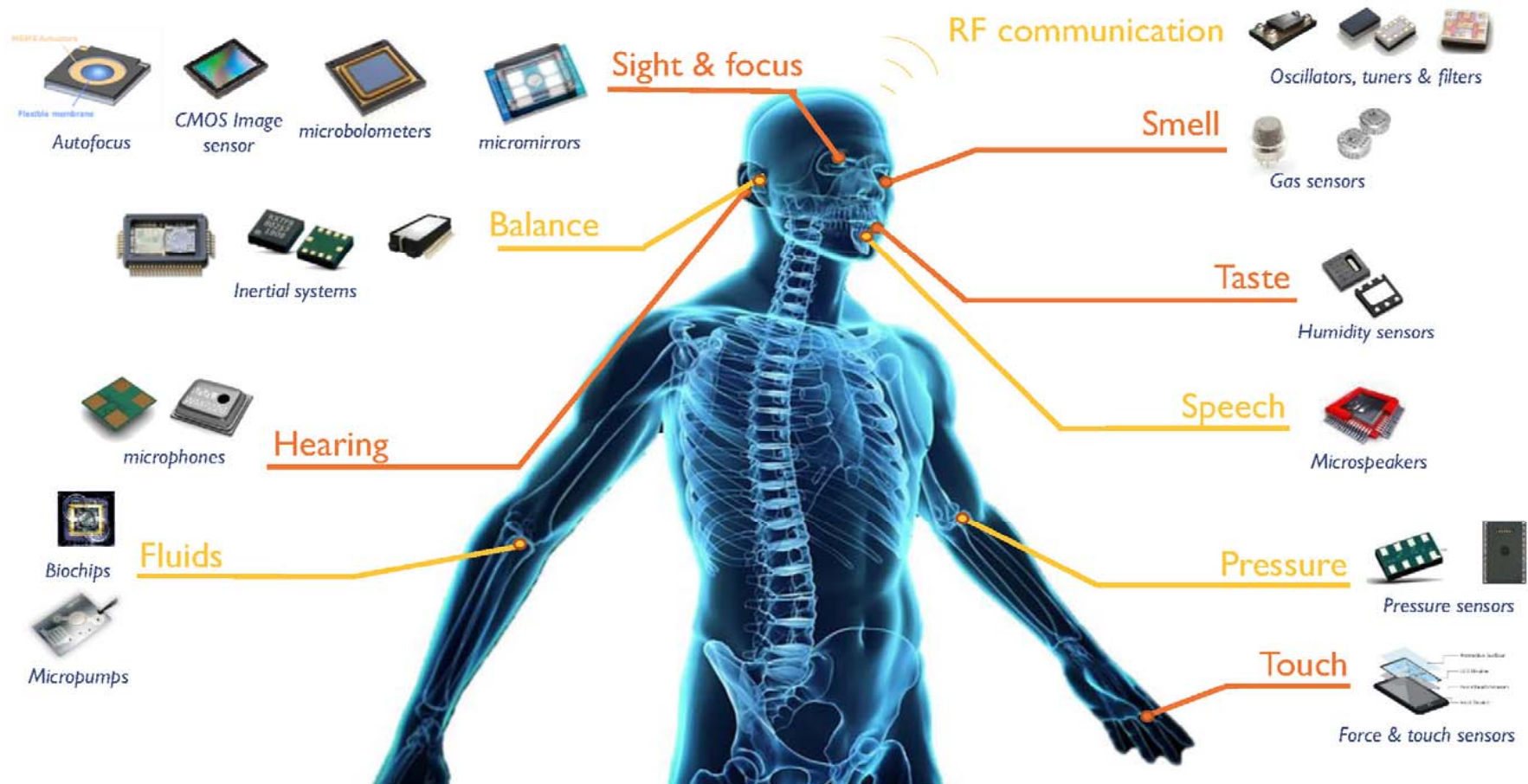
NÉZZÜK A VÉLEMÉNYEKET!

MESTRESÉGES ÉRZÉKELÉS: ROBOTOK



MEMS: SI SZENZOROK

A legjobb minta: az emberi érzékelés (biomimetika)

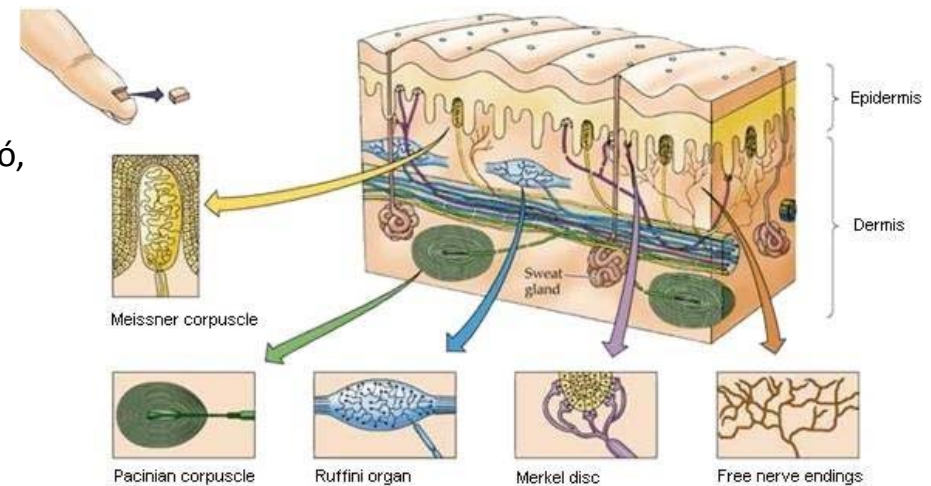


MESTERSÉGES TAPINTÁS

BIOMIMETIKUS ERŐÉRZÉKELÉS

A tapintás analógiája

- statikus nyomás, alacsony és magas frekvenciás vibráció, NYÍRÓERŐ!!!,
- csúszás, érdesség, mintázat, alak...



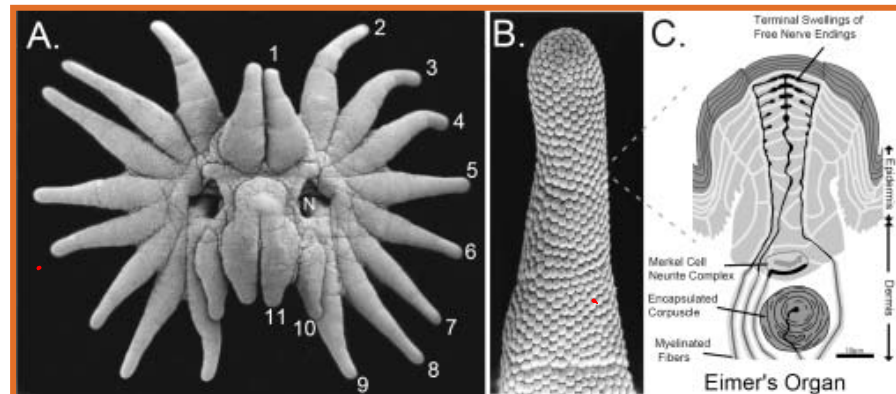
Type	Merkel	Ruffini	Meissner	Pacini
Number	25%	19%	43%	13%
Adaptivity	Slow	Slow	Fast	Fast
Receptor type	SAI	SAII	FAI	FAII
Field diameter	3–4 mm	>10 mm	3–4 mm	>20 mm
Frequency range	0–30 Hz	0–15 Hz	10–60 Hz	50–1000 Hz
Response to indentation $S(t)$	$S, \frac{dS}{dt}$	S	$\frac{dS}{dt}$	$\frac{d^2S}{dt^2}$
Response to constant indentation	Yes	Yes	No	No
Location	Superficial	Deep	Superficial	Deep
Receptive field	Small	Large	Small	Large
Innervation density	High, variable	Low, constant	High, variable	Low constant
Sensed parameter	Local skin curvature	Directional skin stretch	Skin stretch	Non localized vibration

MESTERSÉGES TAPINTÁS

and the WORLD CHAMPION is ...



Csillagorrú vakond:
tapintó szem – Eimer szerv



3D PIEZOREZISZTÍV ERŐDETEKTOR

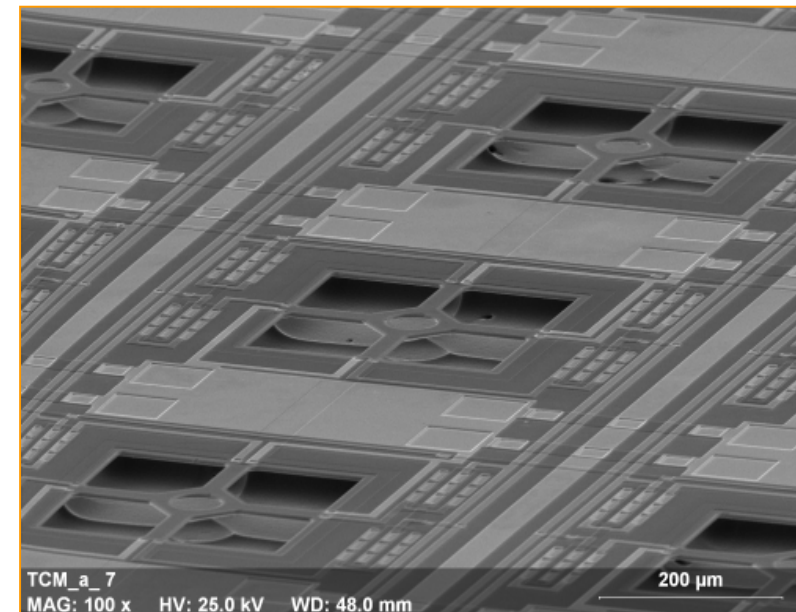
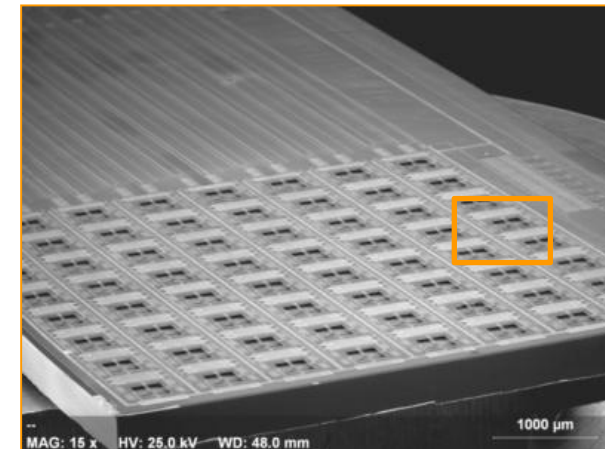
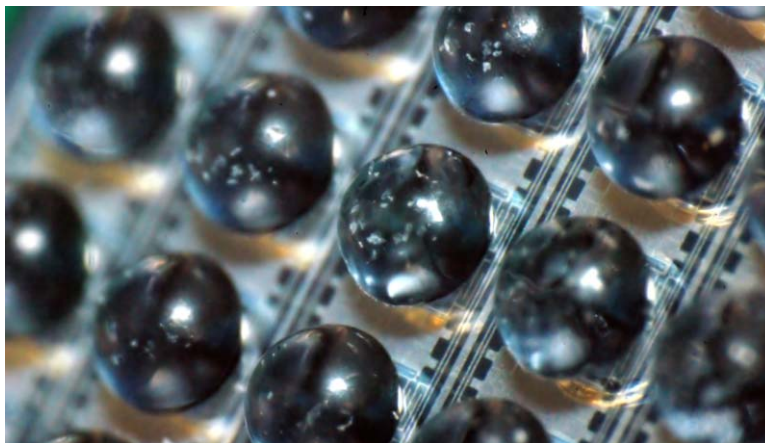
3D erőterkép 2D felületen

8x8 (7x7mm)
40 kontaktus,
MEMS + CMOS

INTEGRÁLT KIOLVASÓ ELEKTRONIKA

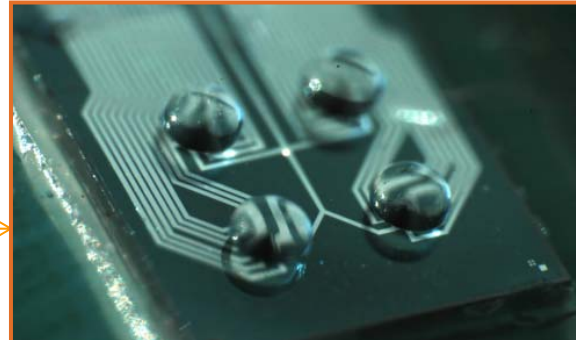
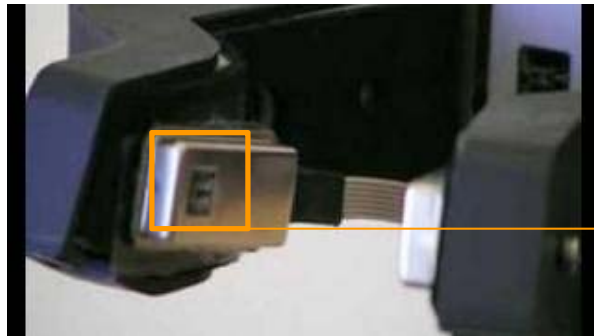
Pórusos Si mikromechanika és CMOS technológia

- érzékelő tömbök 64 (8x8) taxel méretig
- az ujjbegyhez hasonló felbontás és érzékenység
- neuromorf rugalmas borítás

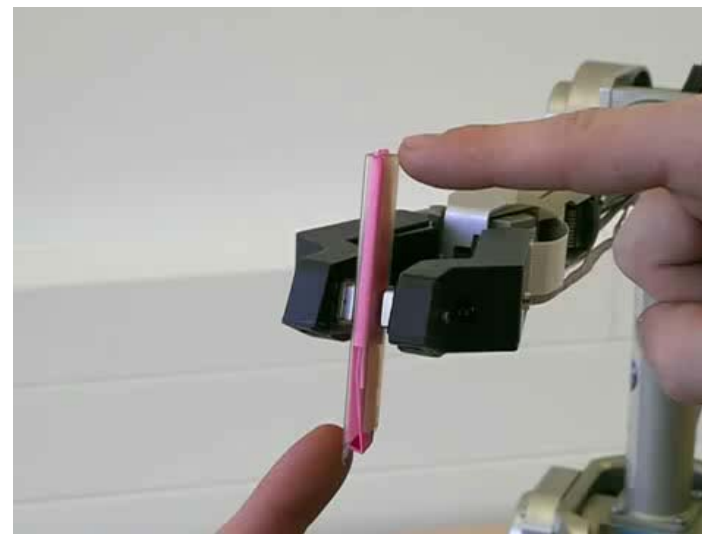
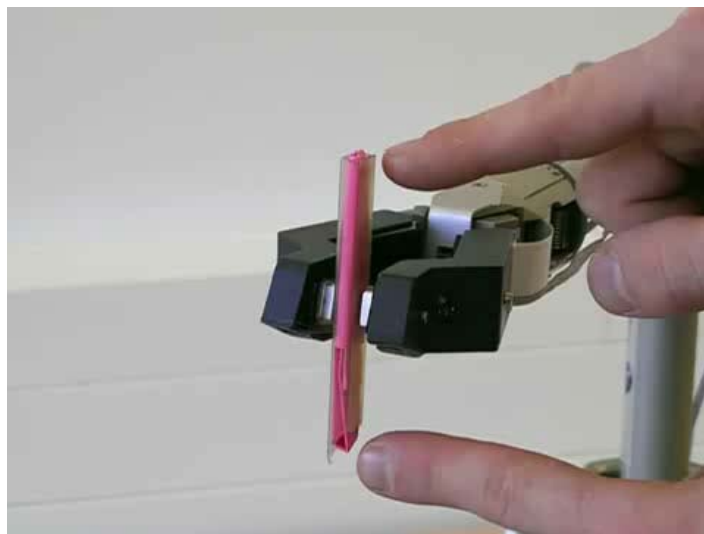


3D TAPINTÁSÉRZÉKELÉS ROBOTOKBAN

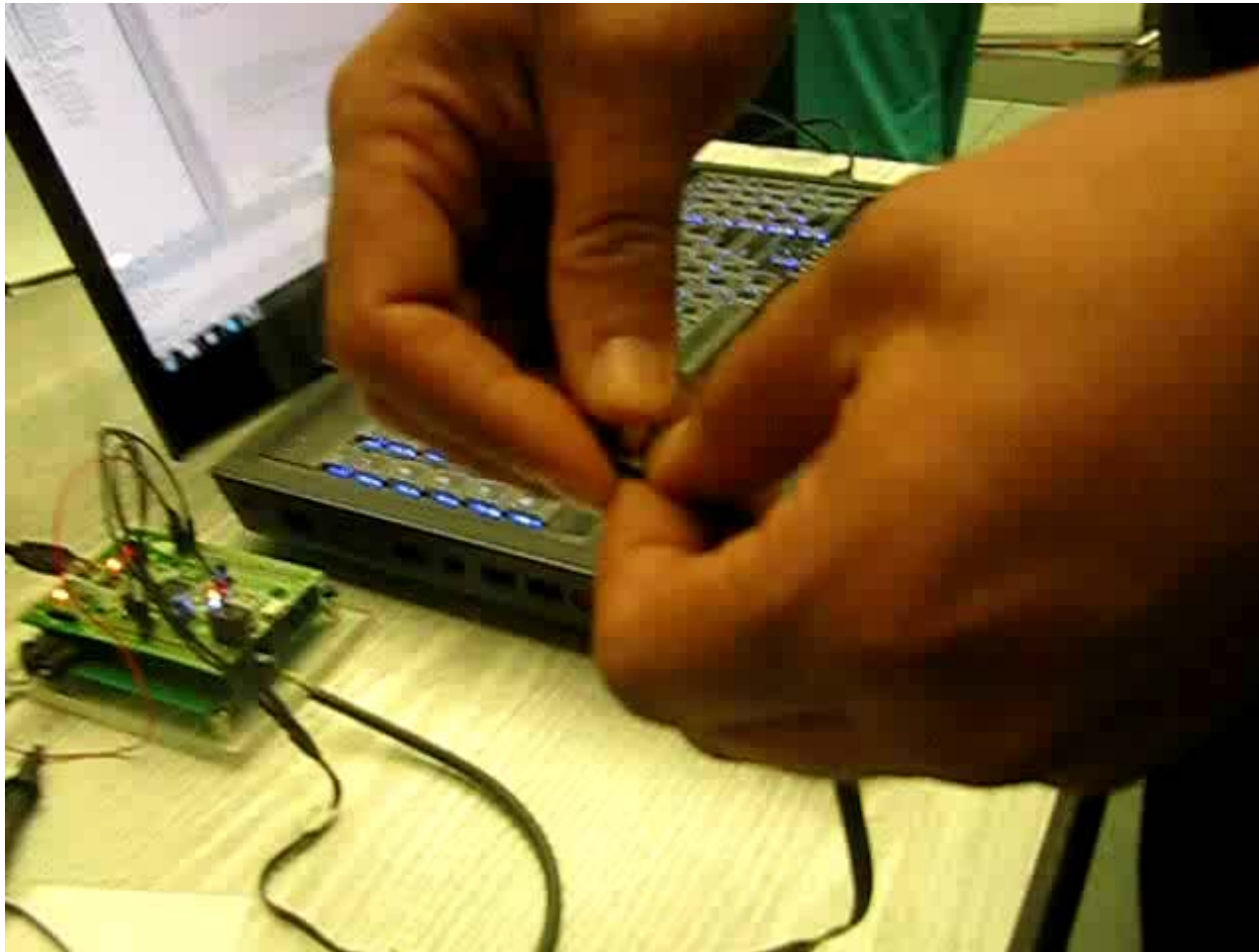
<http://www.youtube.com/user/tactologic/videos>



Erőmérő:
PDMS félgömbökkel

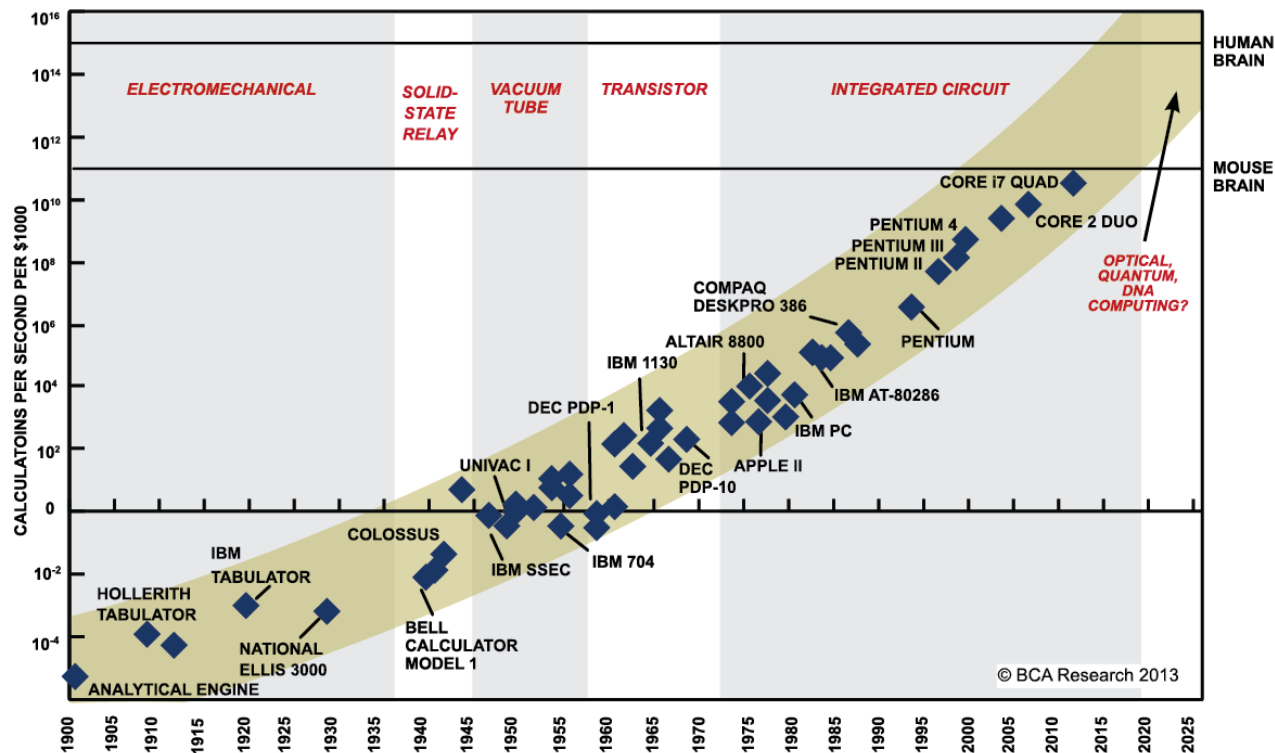
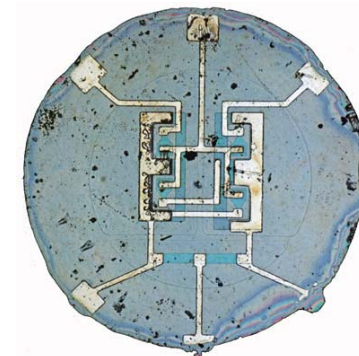
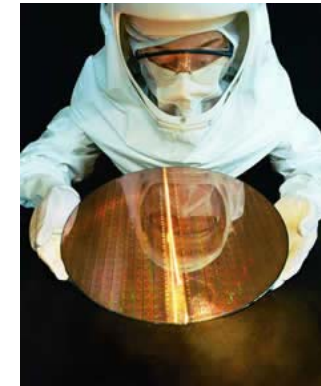
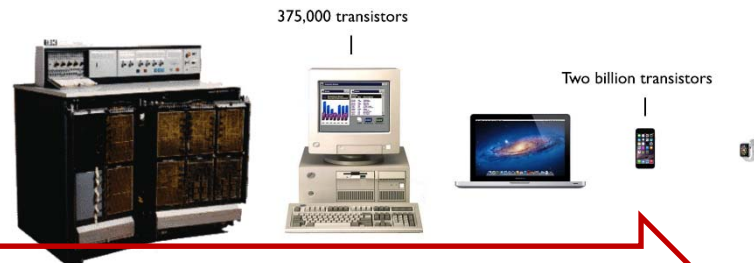


ROBOTVEZÉRLÉS - MEMS JOYSTICK



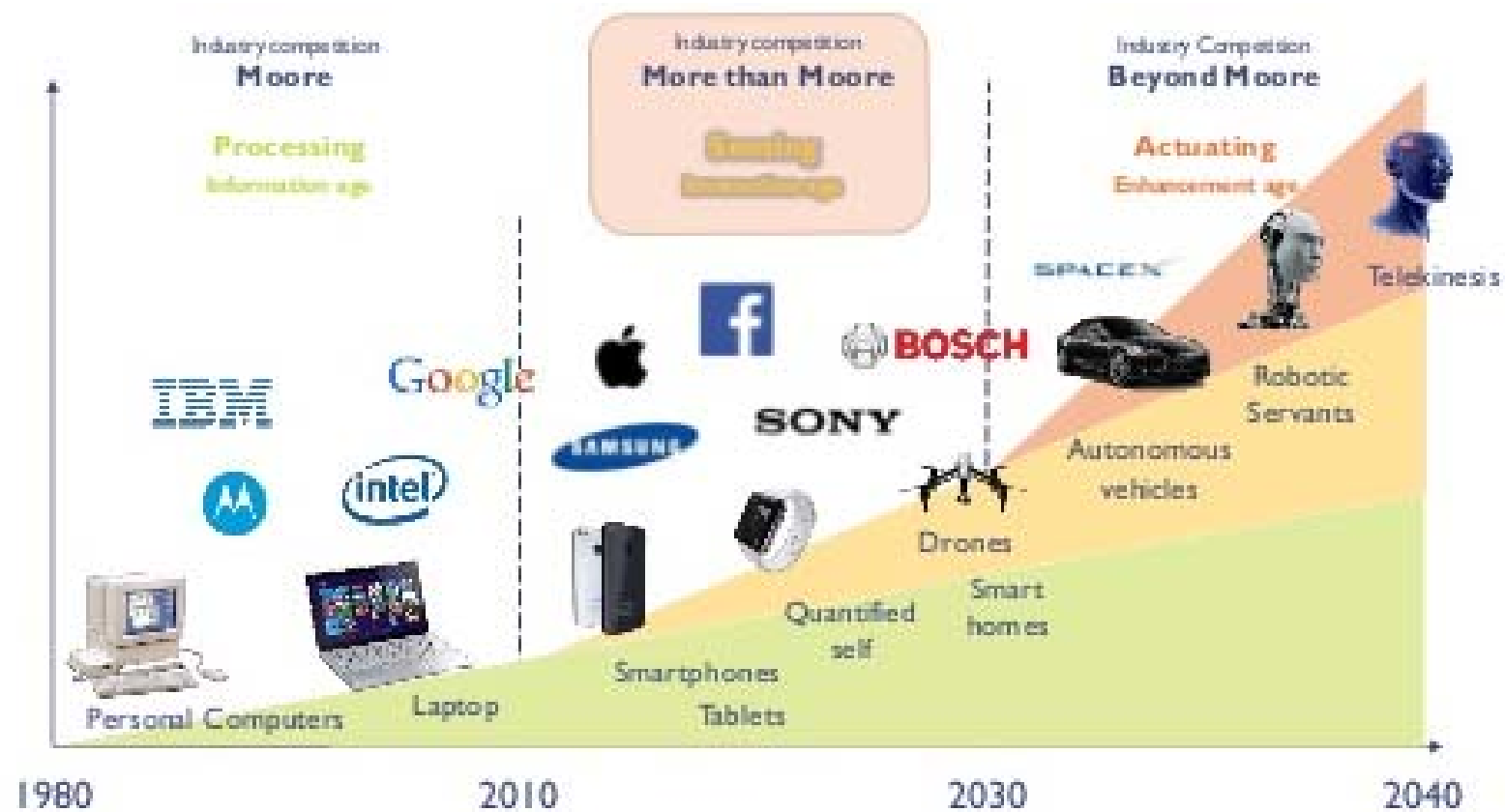
MOORE TÖRVÉNY

2025 - ig



MORE THAN MOORE

2015 -



TÁMOGATÓK

- a Bolyai János és a MedInProt kutatási ösztöndíjak (Magyar Tudományos Akadémia)

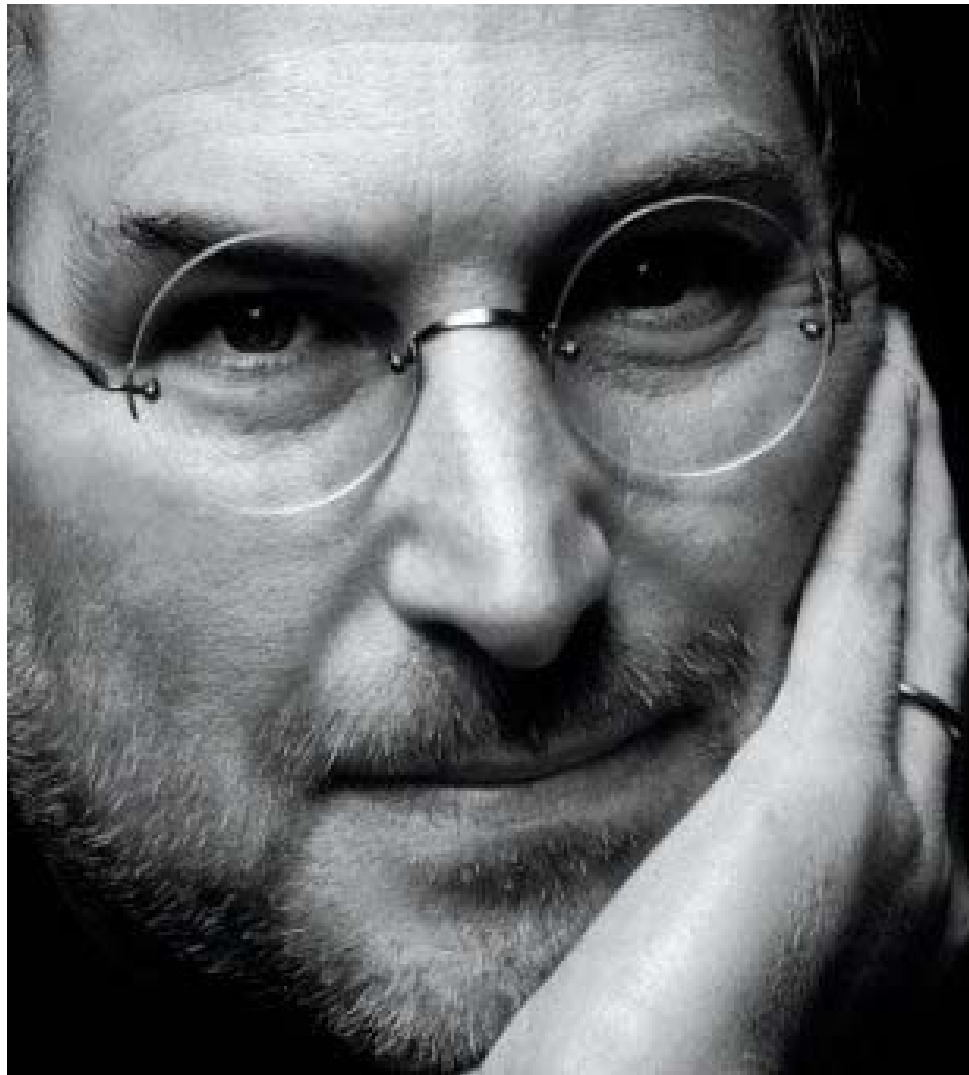
MENTORAIM

- Kónya István
- Scitovszky Szilvia
- Dücső Csaba
- Bársony István

Köszönöm a figyelmet,
és a meghívást!

www.mems.hu / www.biomems.hu





A munkád kitölti az életed nagy részét,
és az egyetlen út,
hogy igazán elégedett légy:

hinned kell, hogy nagy dolgot viszel végbe.

... és az egyetlen út
ahhoz, hogy nagy dolgot vigyél végbe,

szeretned kell azt amit csinálsz.

**Ha még nem találtad meg,
keresd tovább!**

Soha ne nyugodj bele!

Steve Jobs
1955 - 2011