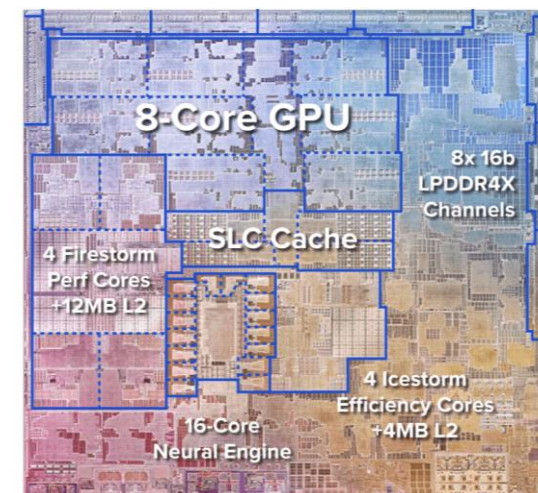
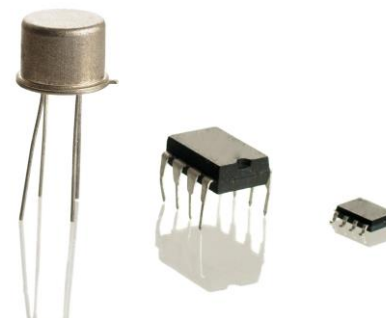
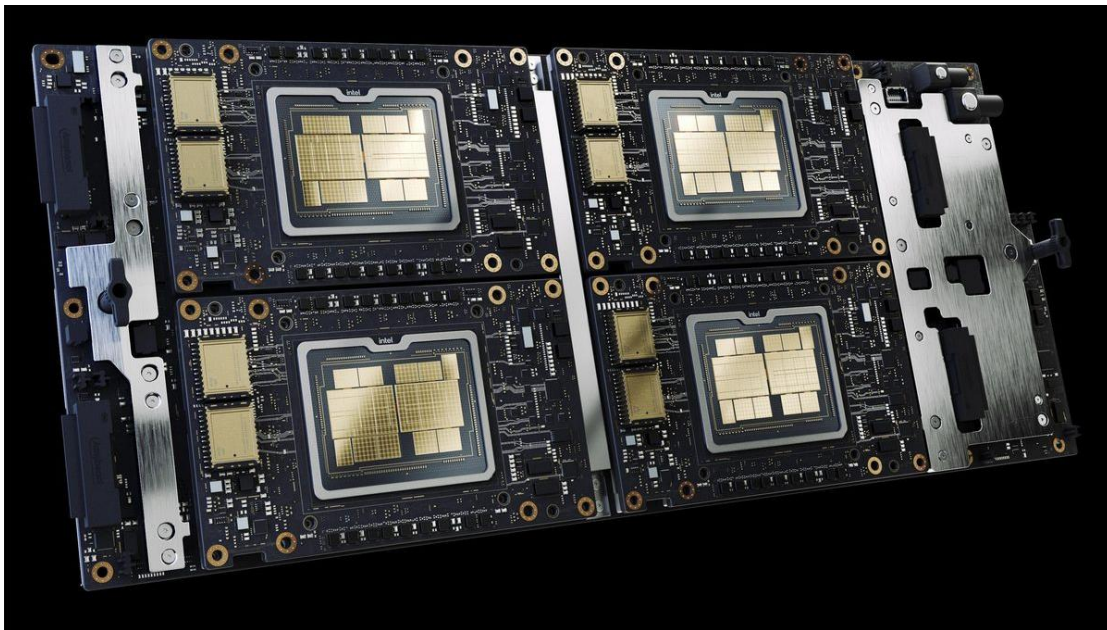
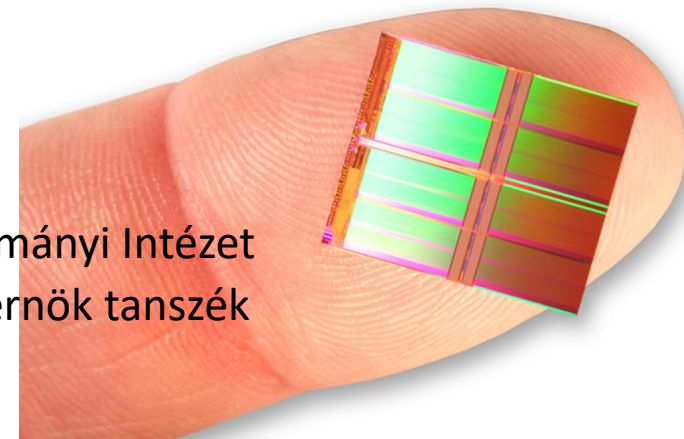


A mikrotechnológia megváltoztatja mindennapjainkat: trendek az MI fényében

Battistig Gábor

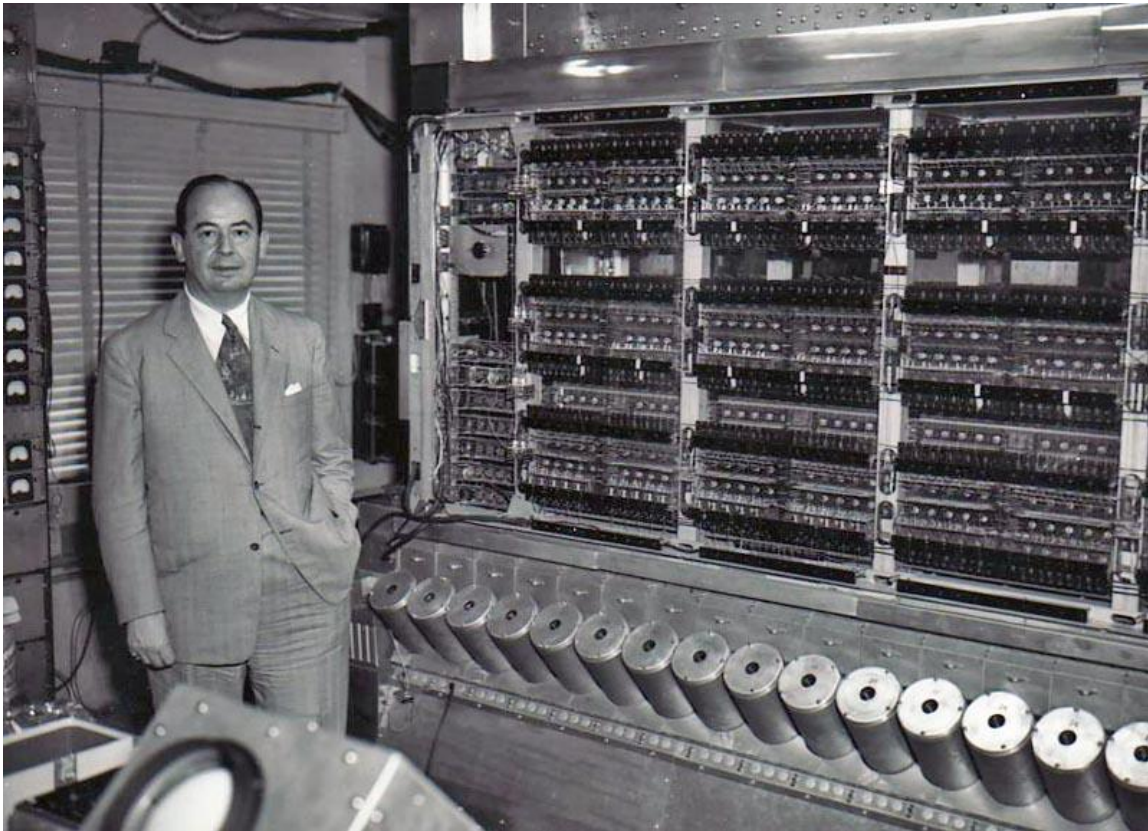
HUN-REN Energiatudományi kutatóközpont Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet
Debreceni Egyetem Természettudományi és Technológiai kar, Villamosmérnök tanszék



Ahogy kezdődött

Neumann János (1903-1957) – Digitális számítógép

Neumann-elvek: a bináris számábrázolás és aritmetika, nagysebességű memória, programtárolás, kötött utasításrendszer



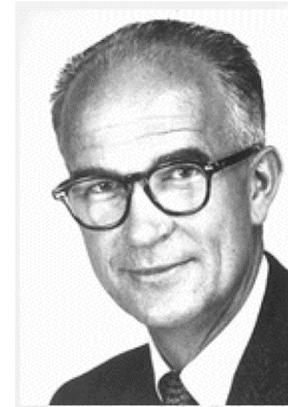
1945 – 1948 EDVAC (Electronic Discrete Variable Automatic Computer) első ilyen elven működő számítógép vácuumcsövekkel megvalósítva

17 468 darab elektroncső, 7200 db kristálydióda, 1500 db relé, 10 000 db kondenzátor, 70 000 db ellenállás
30 tonna

- A programot és az adatokat nem kell megkülönböztetni, a gép szempontjából mindkettő bemenő adat;
- belső programvezérlés;
- folyamatábra, mint formalizmus bevezetése;
- gépi kódú programozás

W.B. Shockley, J. Bardeen, W.H. Bratten

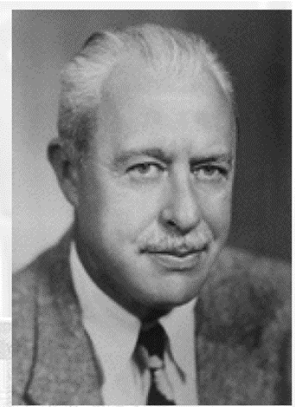
1947 – Bipoláris tranzistor
félvezető elápegység, Germánium
Bell Laboratories



**William Bradford
Shockley**
(1910-1989)



John Bardeen
(1908-1991)



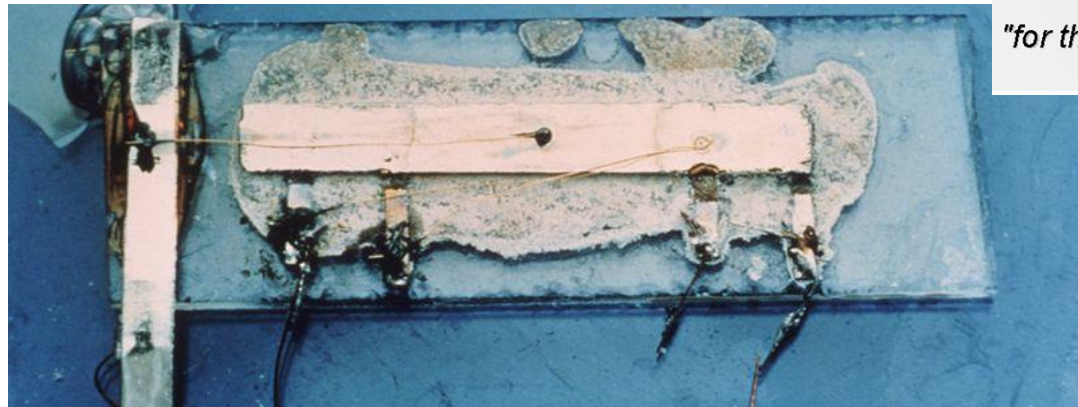
**Walter Houser
Brattain**
(1902-1987)

The Nobel Prize in Physics 1956:

*"for their researches on semiconductors and their discovery of
the transistor effect"*

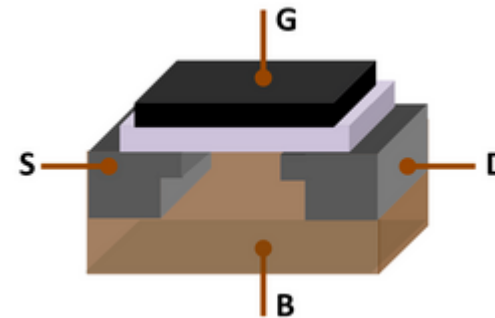
J. Kilby

1959 – IC - flip-flop
Germánium
Texas Instruments

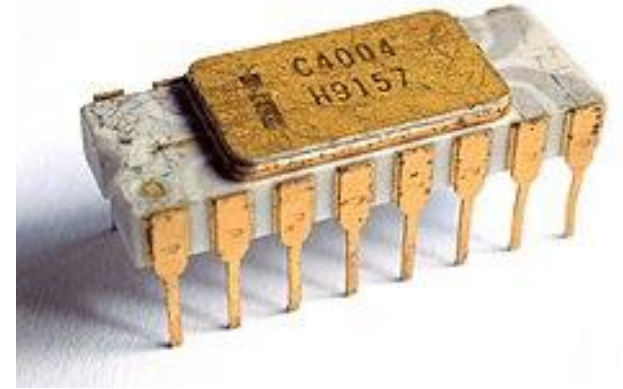
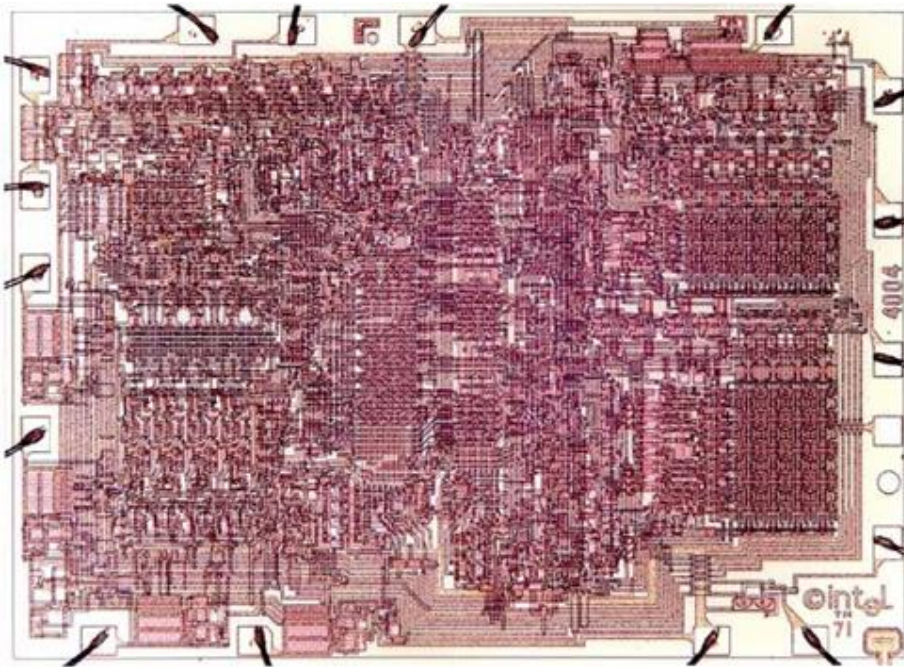


M.M. Atalla, D. Kahng

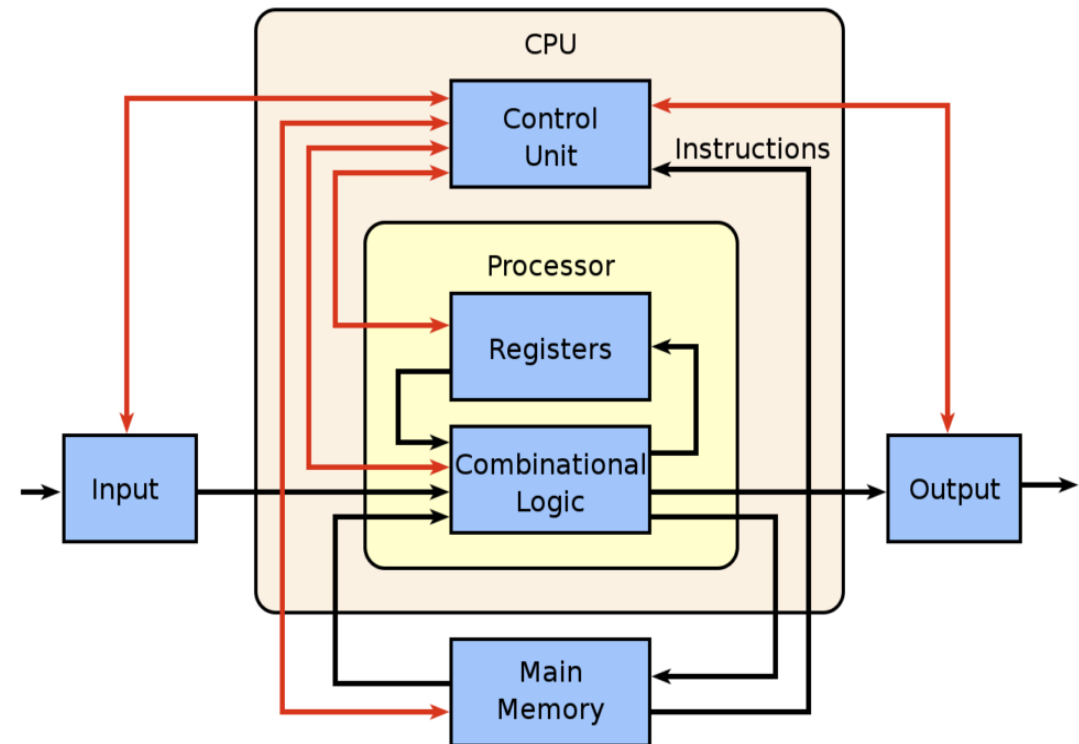
1959 – MOSFET
Szilícium – SiO_2 kiváló szigetelő
Bell Laboratories



Intel 4004 – első általános célú mikroprocesszor, 1971 Intel Corporation



2300 tranzisztor, 10 μm vonalszélesség
4 bites adat, 740kHz-es órajel, Silicon Gate
Technology



Számítógépek

- 1964: Az első általános célú kereskedelmi gép, az IBM 360.
- 1977: Az Apple II, az első óriási sikert arató személyi számítógép
- 1981: Első PC személyi számítógép IBM-PC
- 80-as évek első fele: Commodore64, Sinclair ZX, Spectrum, Atari, Primo (SZTKI), HT-1080Z



Telefon hírmondó (Puskás Tivadar, 1893)

Rádió (1925) – **Televízió** (1957)

Mobiltelefon (1973) Motorola DynaTAC 8000X

Okostelefon (2007) Apple iPhone



Internet

1960-as évek: A DARPA támogatásával elindult az ARPANET. Csomagkapcsolt hálózat, a központi csomópontok megsemmisülése esetén is működőképes marad.

1969: sikeresen összekötötték az első négy amerikai egyetemi számítógépet.

1970-es és 1980-as évek (Protokollok születése): TCP/IP csomagküldési protokoll, amely lehetővé tette a különböző típusú hálózatok összekapcsolását (innen ered az "internet" kifejezés). **1971:** e-mail, @ jel használata

1983-ban az ARPANET hivatalosan átállt erre a rendszerre, a modern internet születése.

1990-es évek: WWW (CERN), e-kereskedelem, HTML nyelv, első online vállalatok - (1994), eBay (1995).

2000-es évektől napjainkig: Web 2.0, mobilitás - közösségi oldalak, folyamatos online jelenlét (okostelefonok), interaktív tartalmak, felhasználók által generált tartalmak, felhőalapú szolgáltatások, a dolgok internete (IoT),

A mesterséges intelligencia integrációs platformjává vált.

Mikrotechnológia (MI)

A mikrotechnológia a milliméter ezredrészével (μm , 10^{-6} m) operáló tudományág és gyártástechnológia, amely mikroszkopikus méretű eszközök, integrált áramkörök és érzékelők tervezésével, valamint előállításával foglalkozik. Ez a terület alapozza meg a modern elektronikát, az informatikát és a precíziós gépészetet.

A **mikrotechnológia** tette lehetővé a mai számítógépek, okostelefonok és orvosi műszerek miniaturizálását.

Mikroelektronika: Félvezetők, tranzisztorok és processzorok gyártása szilícium lapkákon.

MEMS (Mikro-Elektro-Mechanikai Rendszerek): Apró mechanikai és elektronikai elemek együttes integrációja, mint a légzsákok érzékelői vagy a nyomtatófejek.

Mikrofluidika: Kis mennyiségű folyadékok manipulálása hálózatos csatornáknakban

A mikrotechnológiai folyamatok **nagy tisztaságú környezetet**, úgynevezett **tisztatereket** és **különleges berendezéseket** igényelnek. **Fotolitográfia:** Fényérzékeny rétegek és maszkok segítségével történő mintázatatvitel. **Rétegleválasztás:** Vékony fém- vagy szigetelőrétegek felvitele (pl. porlasztással vagy gőzfázisú leválasztással). **Marás:** Az anyag felesleges részeinek kémiai vagy plazmaalapú eltávolítása. **Adalékolás:** A félvezető elektromos tulajdonságainak lokális megváltoztatása.

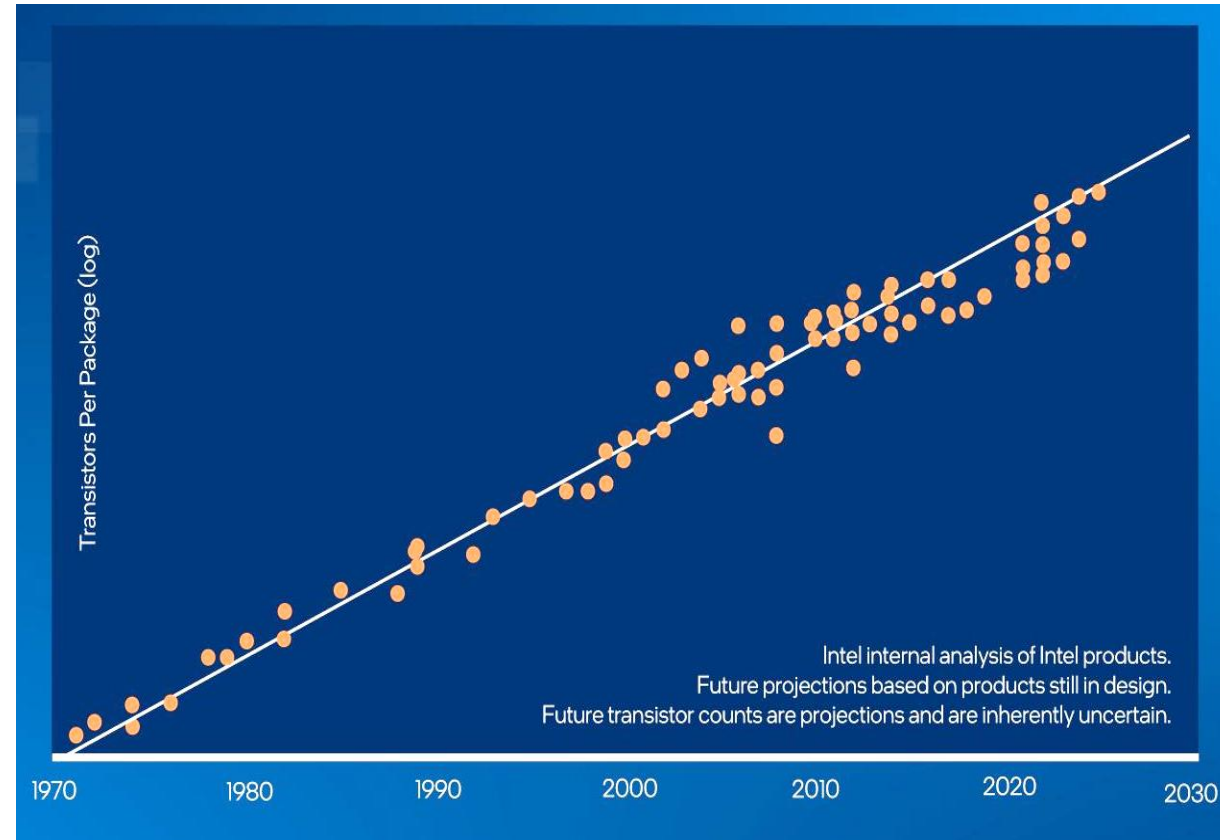
Gordon Moore (Intel) – Moore törvény (1965)

Integrált áramkörök két legfontosabb egymással összefüggő mérőszáma:

- Egy chipre integrált tranzisztorok száma,
- Vonalszélesség (kritikus méret)



**Az integrált áramkörökön
(chipeken) elhelyezhető
tranzisztorok száma
körülbelül kétsévente
megduplázódik,
miközben a számítási
teljesítmény nő, és a
gyártási költségek
csökkennek.**



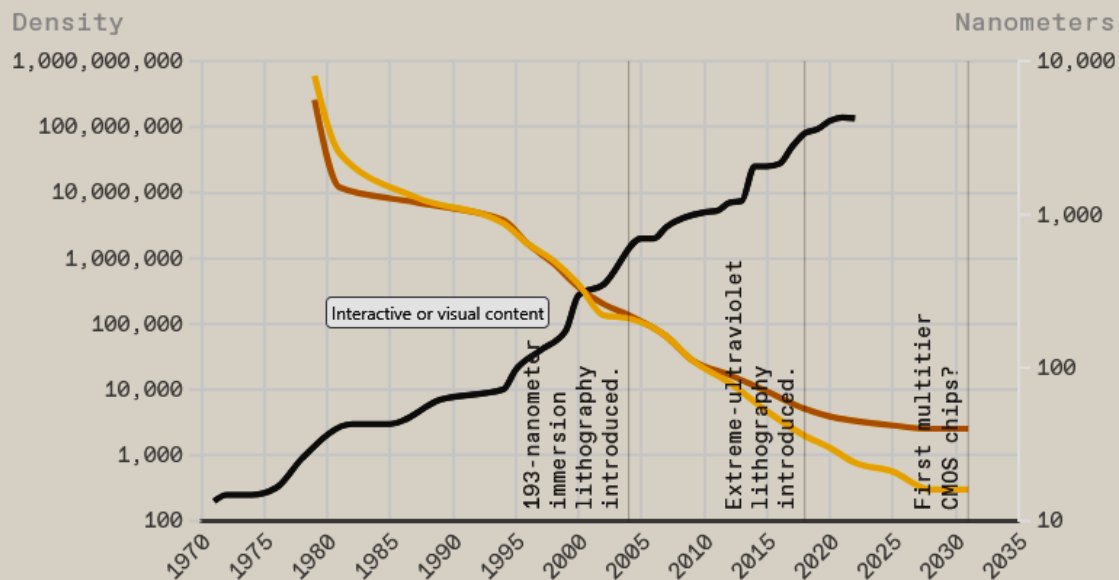
Aspiring to
1 Trillion
transistors in 2030

- ✓ RibbonFET
- ✓ PowerVia
- ✓ High NA
- ✓ 2.5D/3D packaging

Scaling and Density

Maximum devices per mm², millions; critical dimensions, nanometers

- Contacted gate pitch, nanometers
- Metal pitch, nanometers
- Transistor density, devices per square millimeter



Sources: IEEE International Roadmap for Devices and Systems, Stanford Nanoelectronics Lab; H.-S. P. Wong, et al., data accessed 17 October 2022

IEEE Spectrum

Transistors per Processor

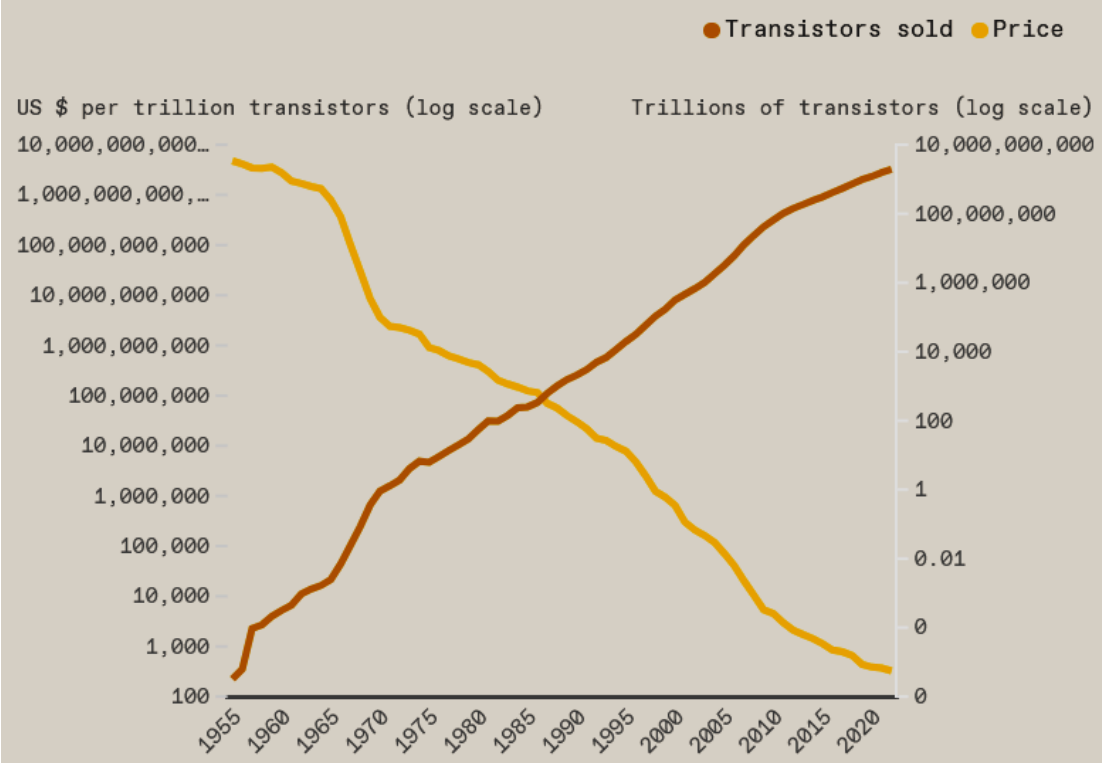
Transistors in CPUs



IEEE Spectrum

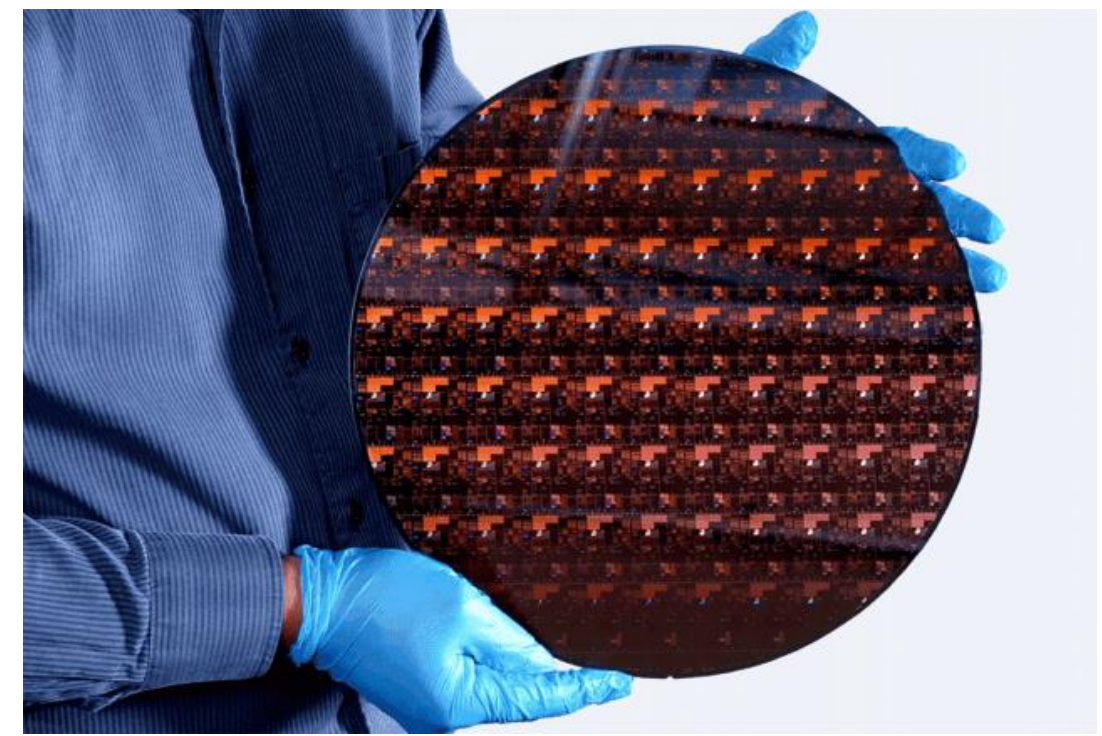
Huge Volume, Small Price

Price per trillion transistors, US \$; transistors sold per year, trillions



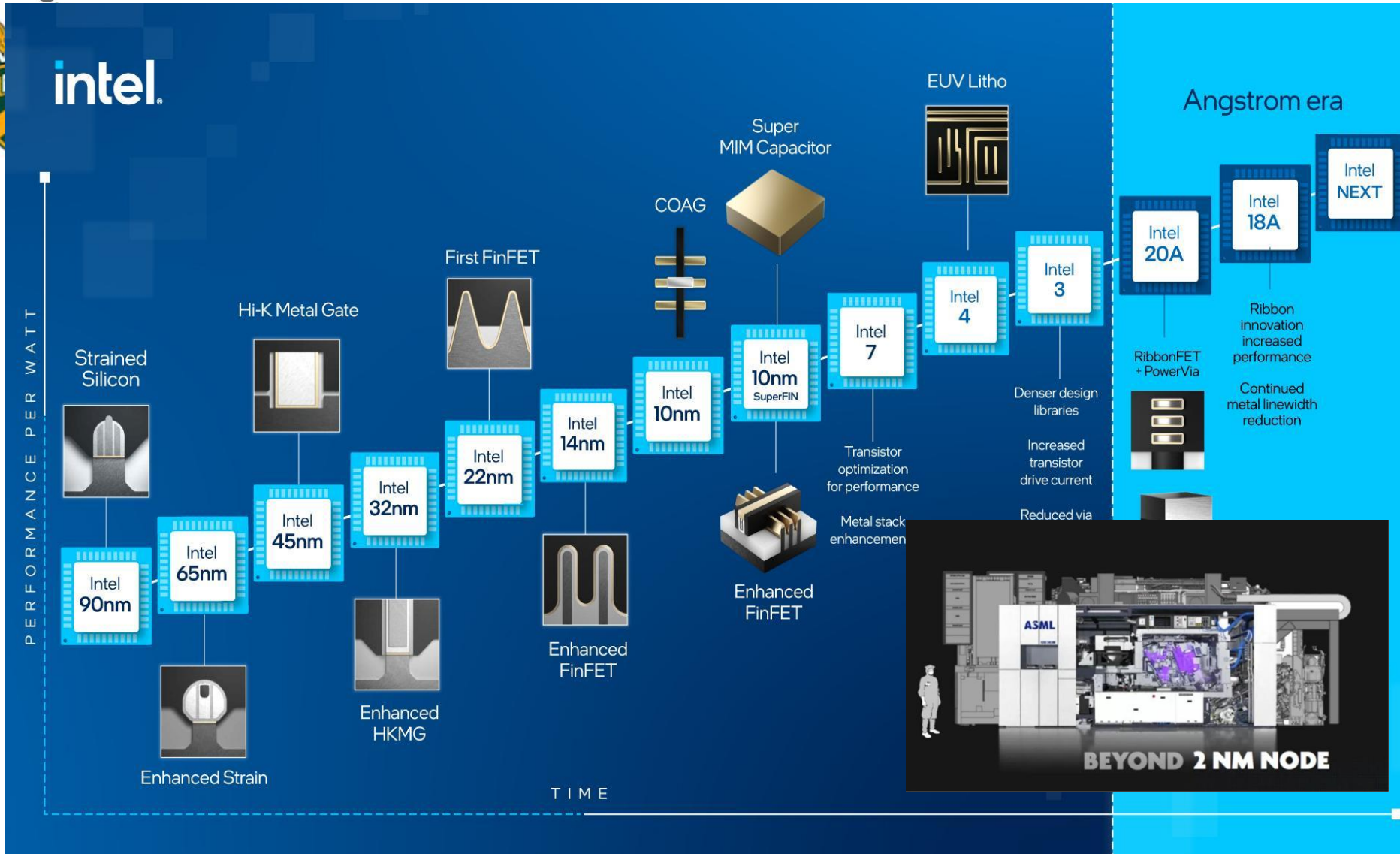
Source: TechInsights

IEEE Spectrum



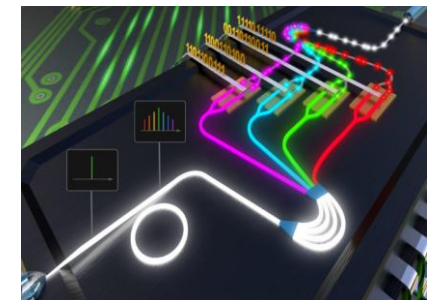
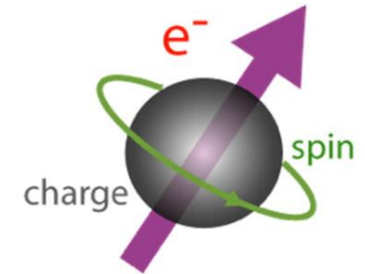
Tiny progress IBM says it can fit 50 billion transistors onto a chip the size of a fingernail using its latest 2nm chip technology. (IBM)

Mérettsökkenés – elemsűrűség növekedése: Hogyan?

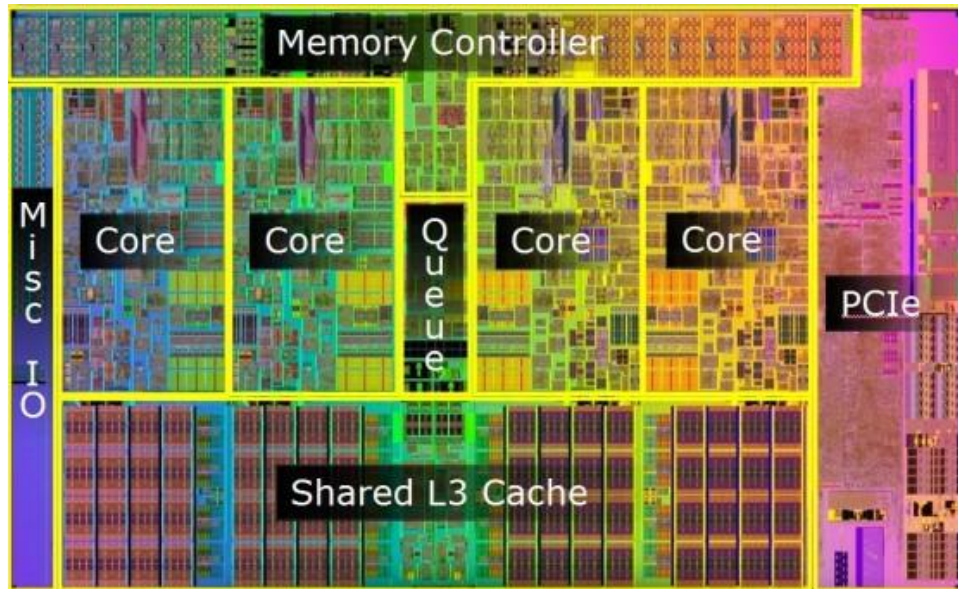


Alternatív technológiák:

- Szupravezetés
- Spintronika
- Fotonika
- Nanotechnológia
- Kvantumtechnológia

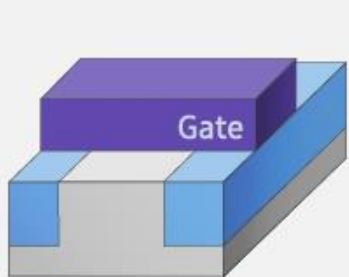


2008: INTEL Core i7
731.000.000 tranzisztor, 45nm

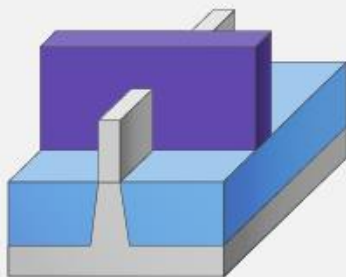


Újabb generációk (pl. 12-14. generáció):
már több mint 9-20 milliárd tranzisztor
több processzormag, integrált grafikus chip
(GPU), nagyméretű gyorsítótárak (Cache)

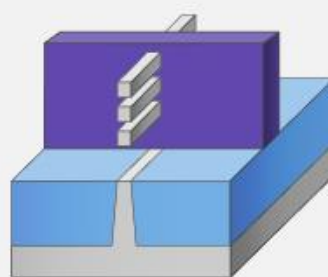
A kritikus méretek csökkentésével, a
tulajdonságok megtartása érdekében ki kell
lépni a felületből és 3D alakzatokat is létre
kell hozni.



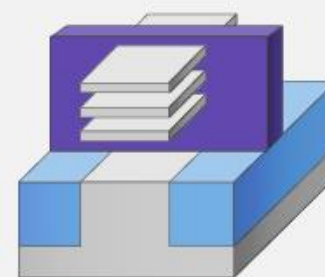
Planar FET



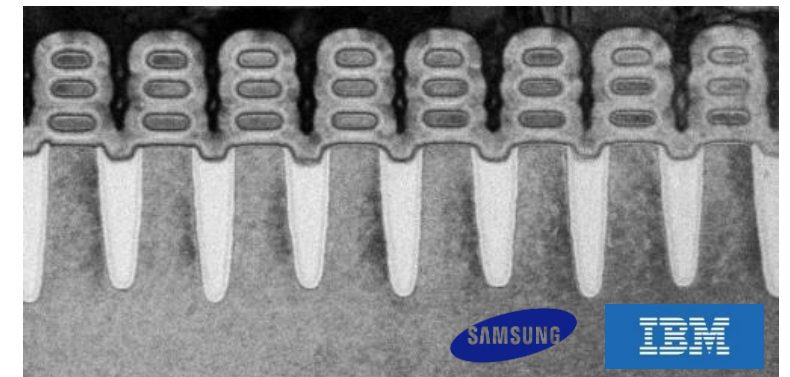
FinFET



GAAFET
(Nanowire)



MBCFET™
(Nanosheet)



Méretcsökkentés

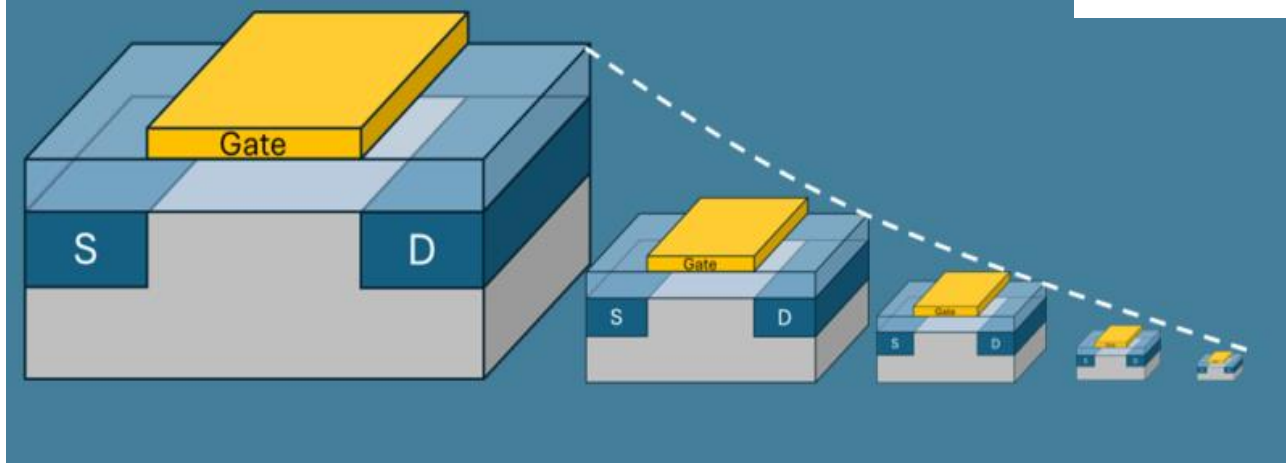
1970 – 2026

10.000 nm → 2 nm

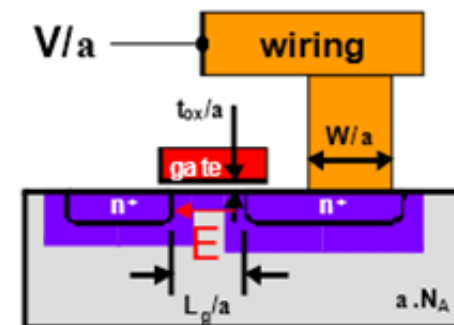
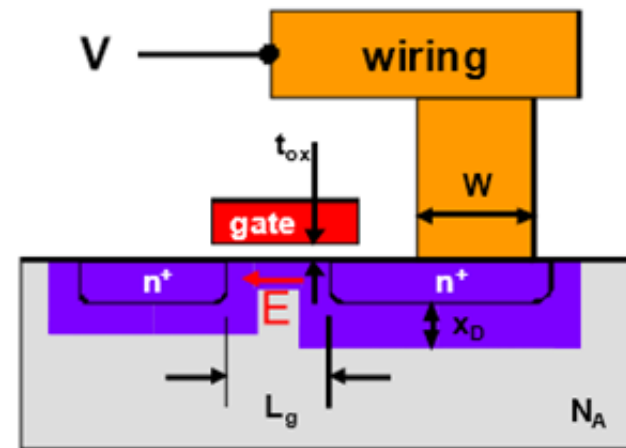
dimensions t_{ox} , L , W
 doping
 voltage
 integration density
 delay
 power dissipation/Tr
 Electric Field E

$1/a$
 a
 $1/a$
 a^2
 $1/a$
 $1/a^2$
 1

Scaling of CMOS and its issues



Ugyanolyan elektromos tér
 = azonos tulajdonságok

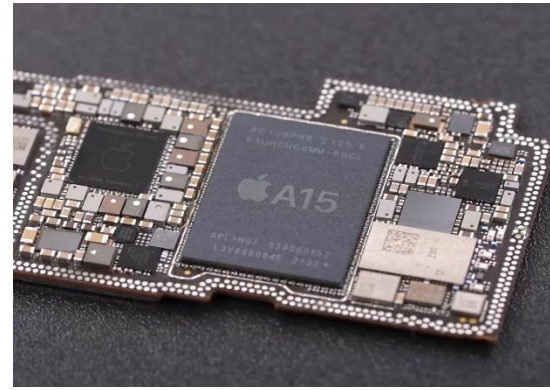


MOBILE

TSMC to Use 4nm Process For A16 Bionic Chips on iPhone 14

By Ali Salman

TWEET SUBMIT



Machine learning controller

New 6-core CPU

Next-generation M

16-core

5 nanometer process

Machine learning accelerators

16-core Neural Engine

11.8 billion Transistors

Apple A

Thunderbolt / USB 4 controller

Media encode and decode engines

Apple M1

16 billion transistors

Advanced image signal processor

Secure Enclave

Unified memory architecture

15 billion transistors

50% faster CPU vs. competition

2x system cache

30% faster GPU vs. competition

Faster NEURAL ENGINE

Apple A15

15.8 trillion operations per second

New video encoder

New video decoder

New ISP

New display engine

Wider lossy compression support

Secure Enclave

Limitek – fizikai, anyagtudományi, technológiai, gazdasági, stb.



- A technológia egyre bonyolultabb és drágább
- **Lithográfia** – alakhú leképezés – 2nm-es kritikus méretek
- Gyártásban 200-300 mm szeletek, < **5-10nm pontossággal kell illeszteni** az egyes rétegek maszkjait (manapság 40-50 maszk szükséges egy áramkör előállításához)
- **High-numerical aperture (NA) Extreme ultraviolet lithography**, drága, bonyolult, nincs jó forrás, stb. - ASML
- **Fotoreziszt** szintén problémás, anyagtulajdonságok, simaság, vastagság homogenitás, kémiai és plazma degradáció, fokozott problémák 20nm vonalszélesség alatt.
- **Tisztaság** – környezet, anyagok, segédanyagok, berendezések

ASML az egyetlen EUV litográfiai berendezésgyártó, 13.5 nm hullámhossz, szükséges a fejlett 32 nm alatti felbontásokhoz: 5 nm, 3 nm, and 2 nm nodok. Komplex optikai, mechanikai berendezés, tömege 180 tonnánál nagyobb, ára 150 és 400 millió USD között van. Exportkorlátozások!



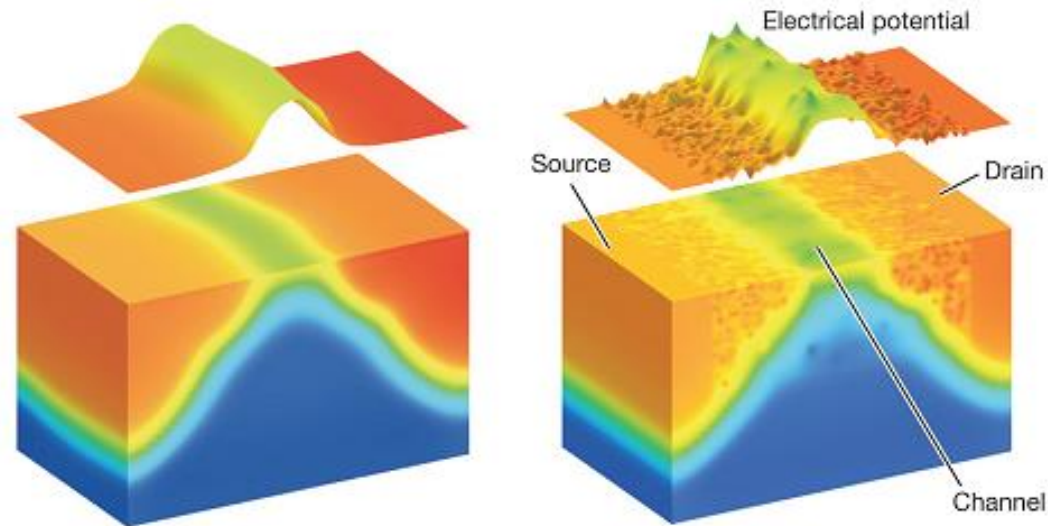


Limitek

- **Teljesítmény felvétel:** egyre kisebb helyre koncentrálódik.
- **Disszipáció:** Aktív hűtés szükséges, $500\text{-}1000\text{ W/cm}^2$ hűtés kb. a limit.
- Csökkenteni kell a tápfeszültséget, de $0.6\text{-}1\text{V}$ alatt az átlagos Si tranzisztor nem működik
- Működési sebesség lehetne akár $60\text{-}100\text{ GHz}$ is, de a fogyasztás és a vezetékezés szórt parazita kapacitásai miatt a kapcsolási sebesség processzoroknál $4\text{-}5\text{ GHz}$ körül limitált.
- A kapcsolási sebességnél szerepet játszik a töltéshordozó mobilitás, csatorna hossz, parazita elemek. Az órajel hossza (gate delay $\sim 10\text{ psec}$, de 1mm hosszú vezetéken a késés 1 nsec) – gyorsabb tranzisztor nem jelent nagyobb sebességet.

Limitek

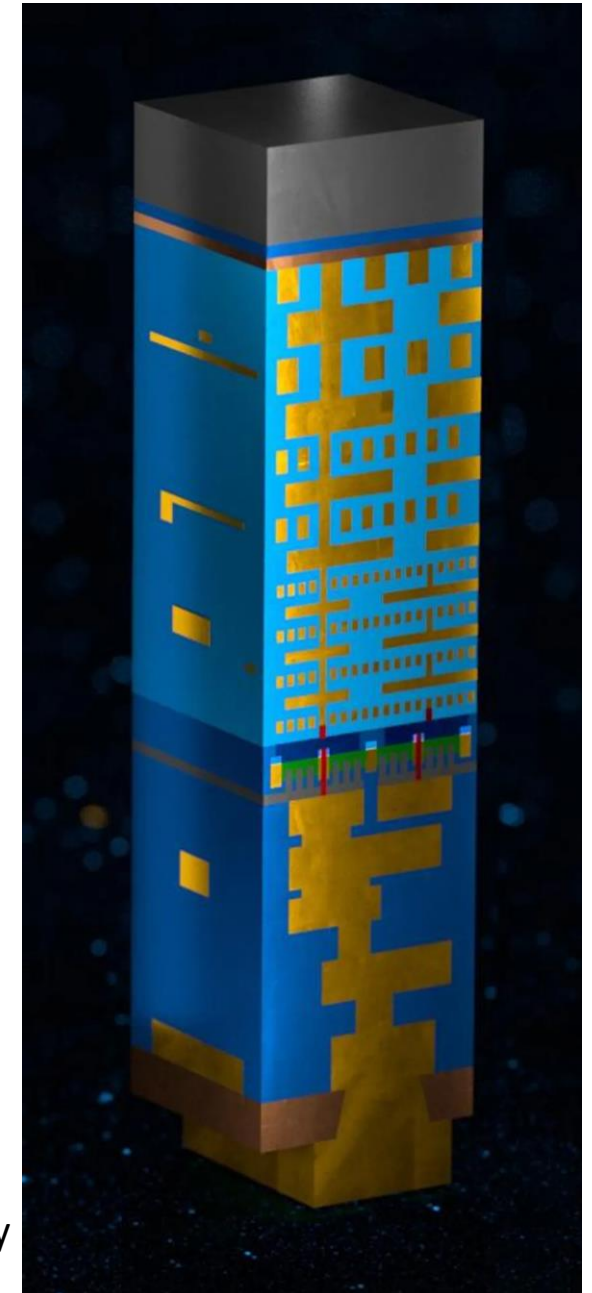
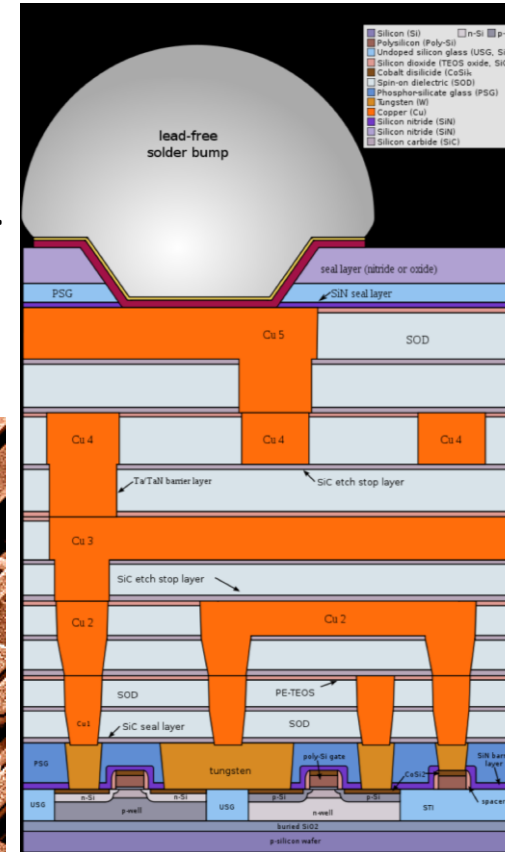
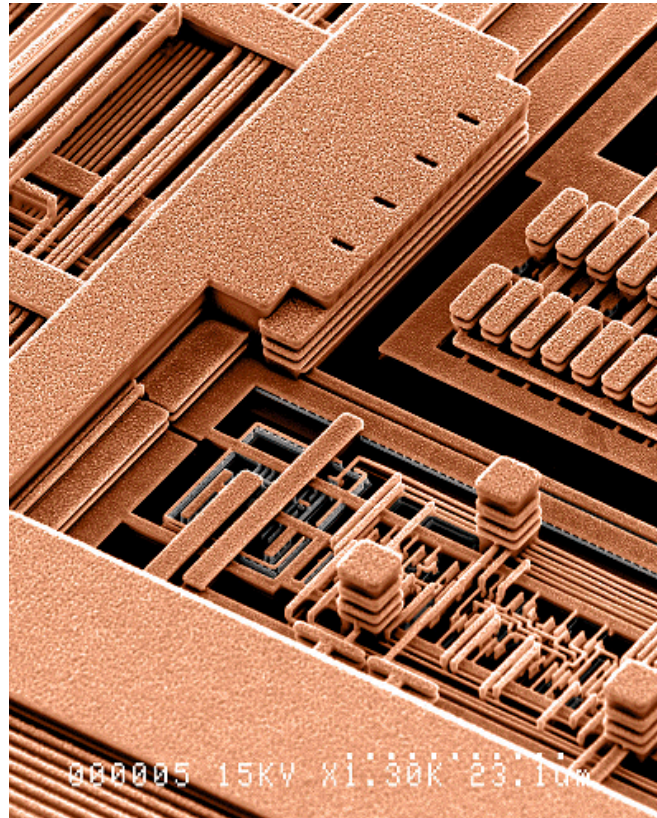
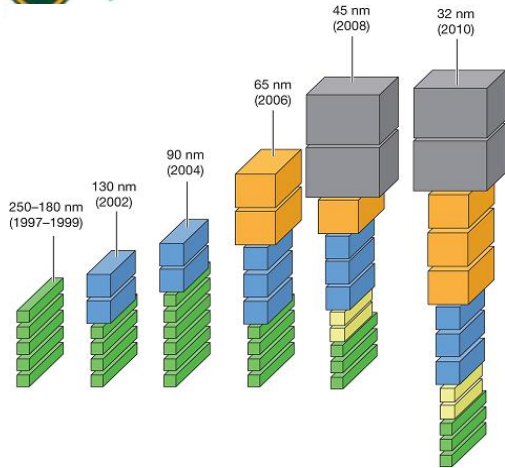
- Az alapelemekben, tranzisztorokban már kevés, megszámlálható mennyiségű atom van. Az elektromos tér, az átfolyó áram az eszközben bizonytalanná válik. A legkisebb elemeknél az illesztetlenség elérheti a 20-30%-ot és a $1/f$ zaj nagyon nagy lesz.
- Ezért az analóg elemek méretei nem jól és hatékonyan csökkenthetők.



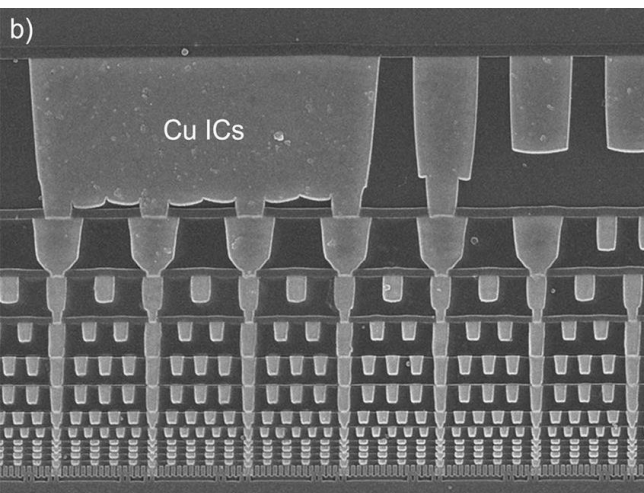
$1/f$ zaj alapvetően az atomok, töltéshordozók bizonytalan, véletlenszerű (statisztikus) mozgásából ered.

Limitek Fémzés, vezetékezés

A chipen fémzés funkciói: gyors jelátvitel, összeköttetések az elemek között, nagy áramú tápellátás. Részben megoldás a vezetékek keresztmetszetének tervezett növelése, de a hőtágulás problémás lehet.

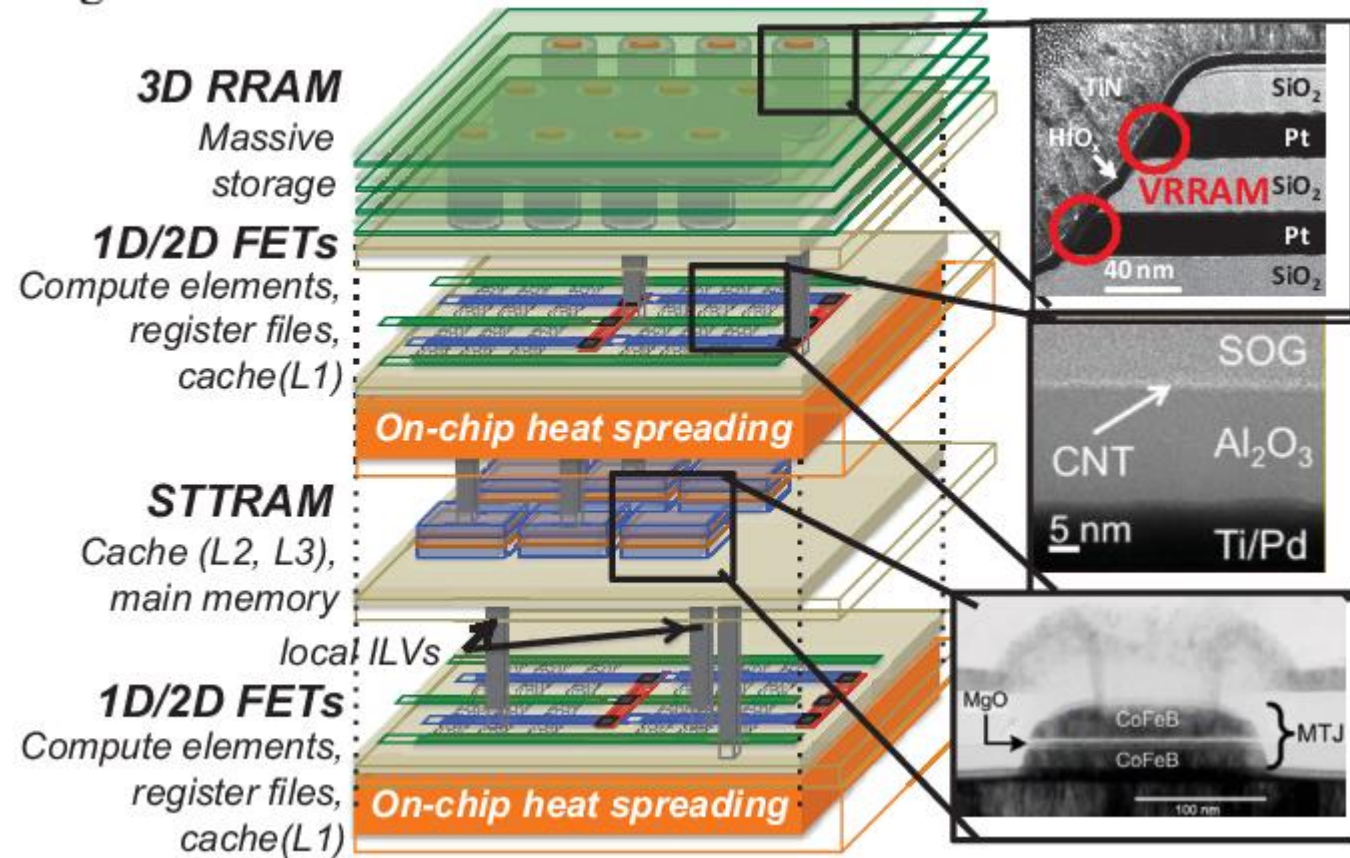
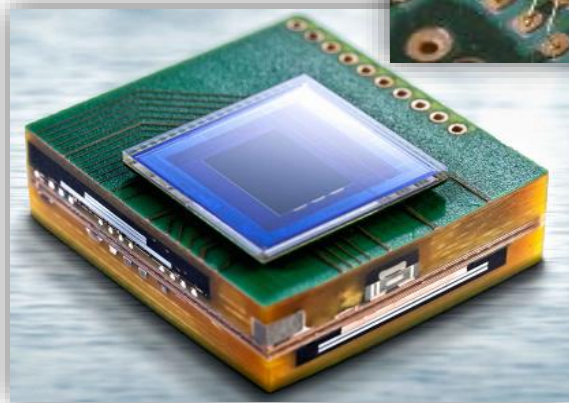
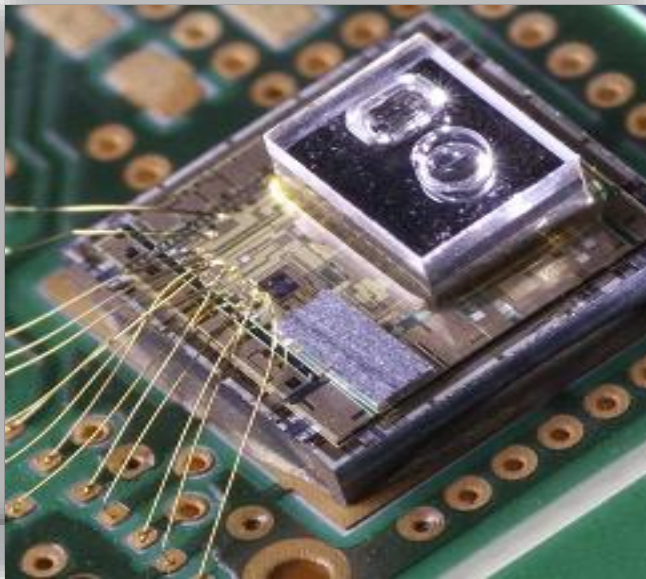


NEW - 2022
Intel – PowerVia Technology

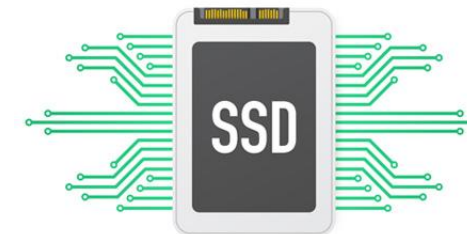


Heterogén integráció

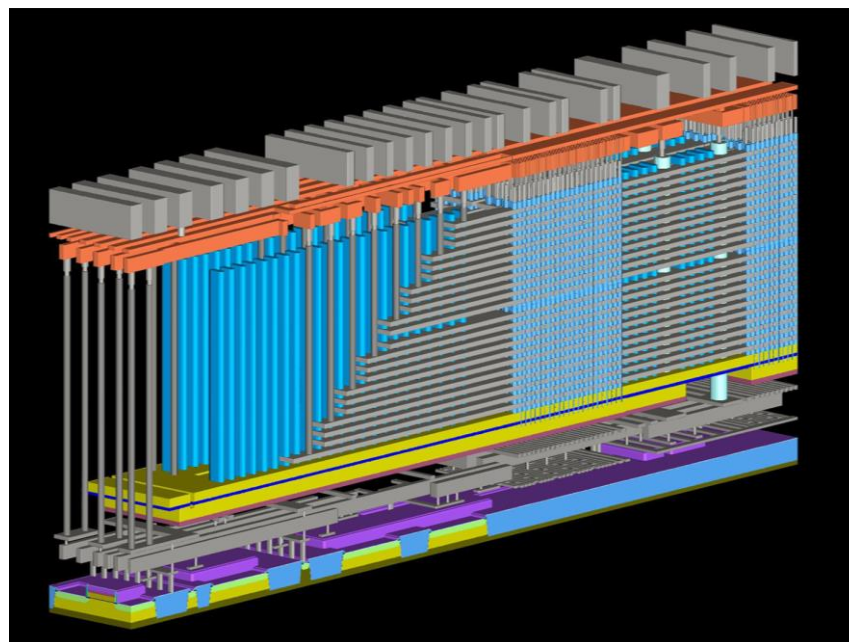
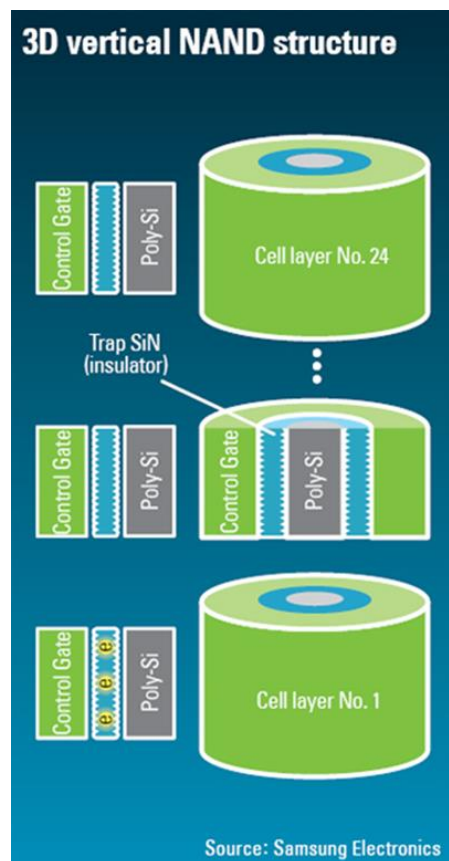
- Költséghatékony, kompakt méretek
- Különféle technológiával készült chipeket lehet integrálni



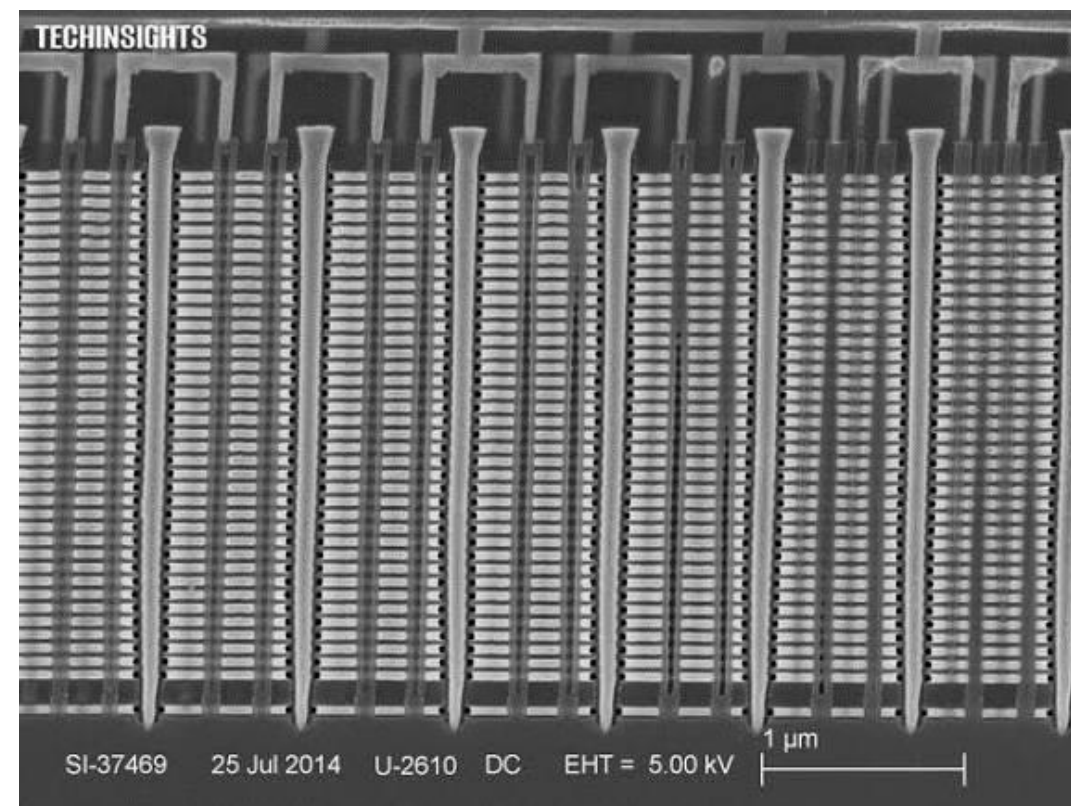
3D megoldások



SSD tárolók – VNAND technológia – nagy kapacitású tároló

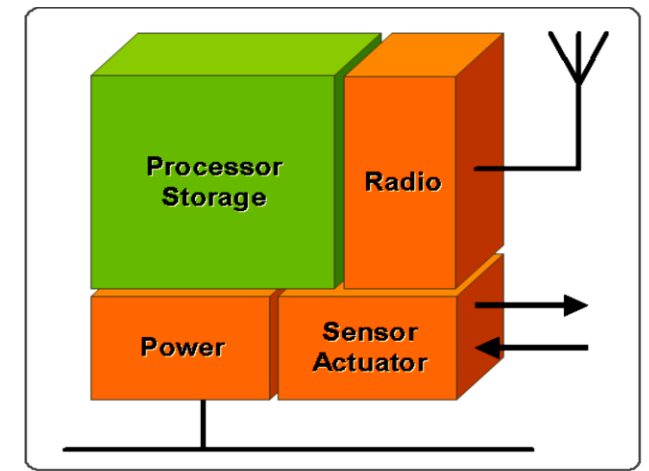
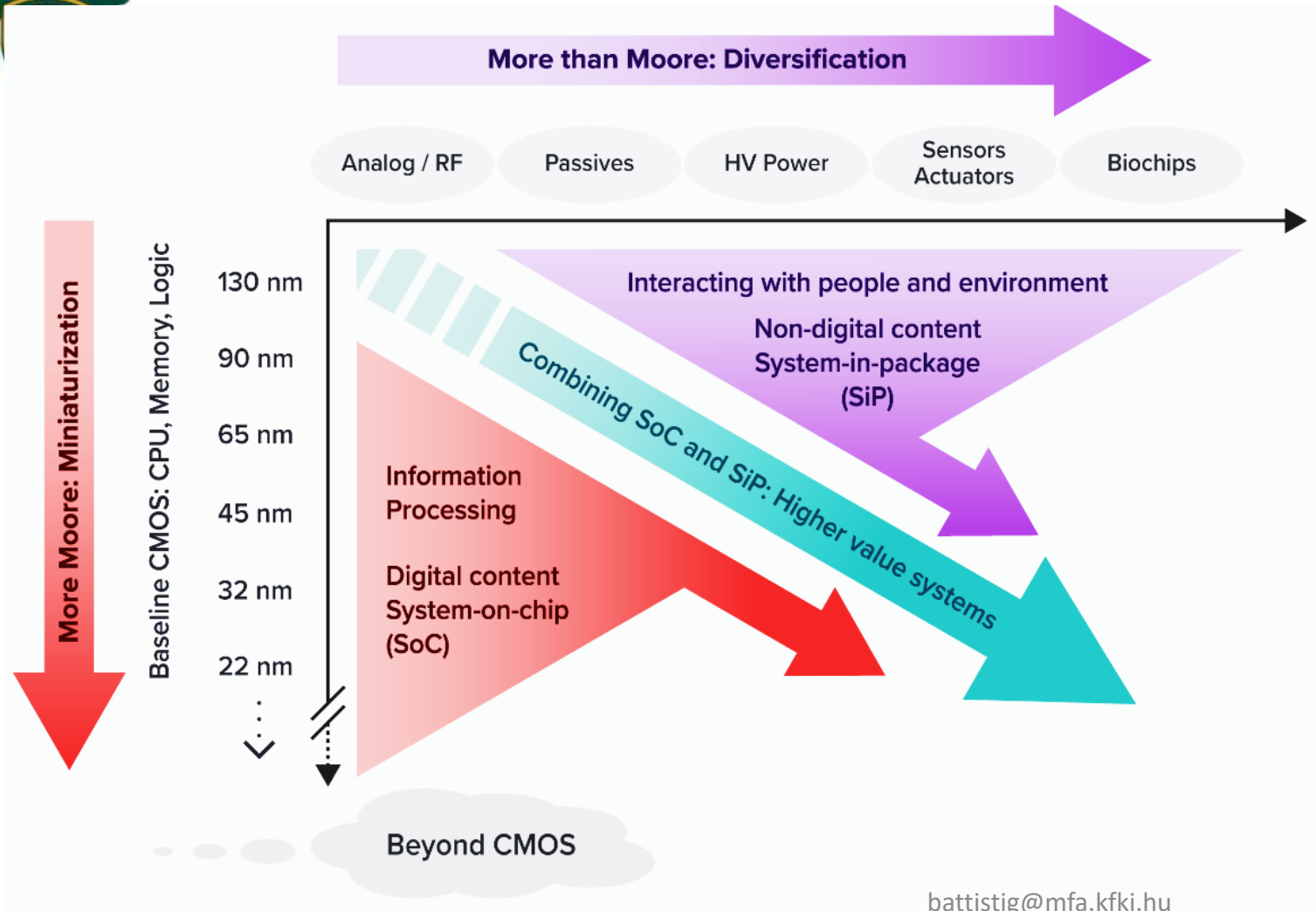


Akár 300 „emelet”



Moore törvény után ... A szingularitás előtt

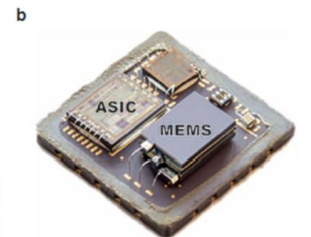
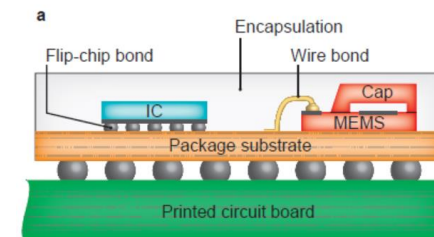
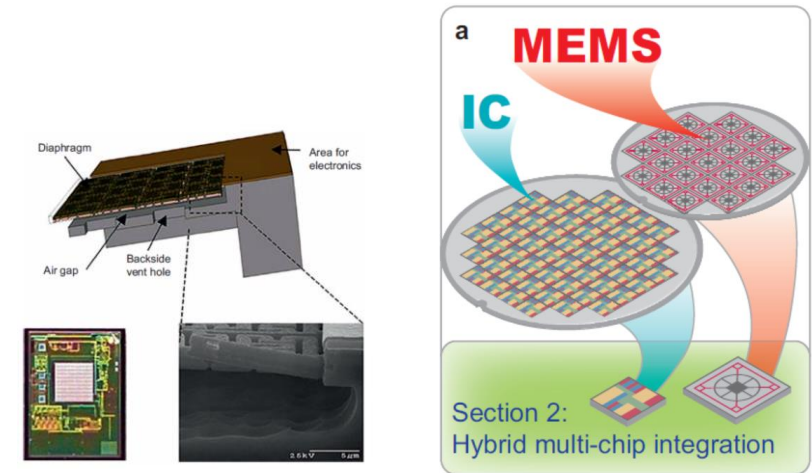
A 2020-as évekre elértük az atomi méreteket:
Si rácsállandója 0.5 nm !



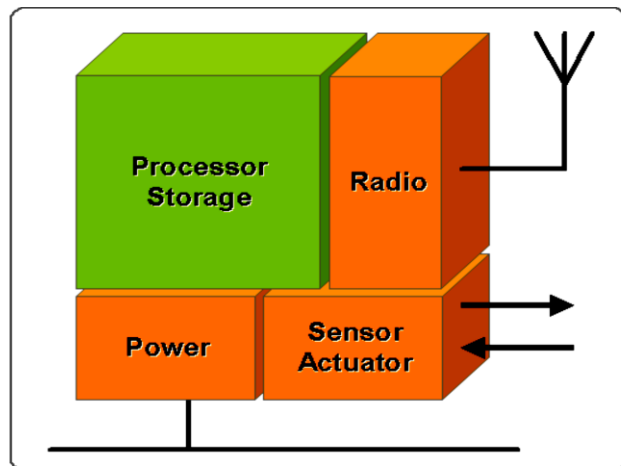
Intelligent systems need a Brain,
but they also need Ears, Eyes, Arms and Legs

More Moore

More than Moore



Kis kitérő: More than Moore - MEMS: az érzékelők forradalma



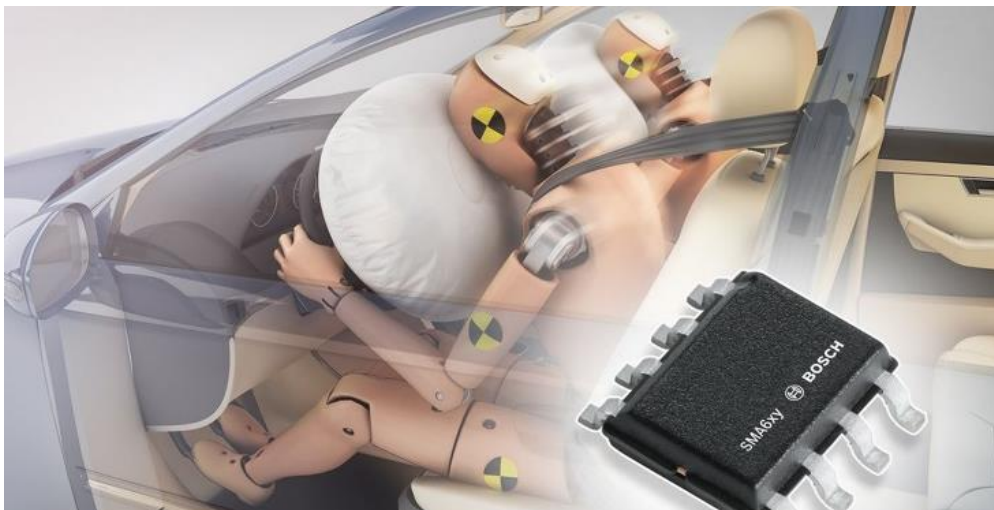
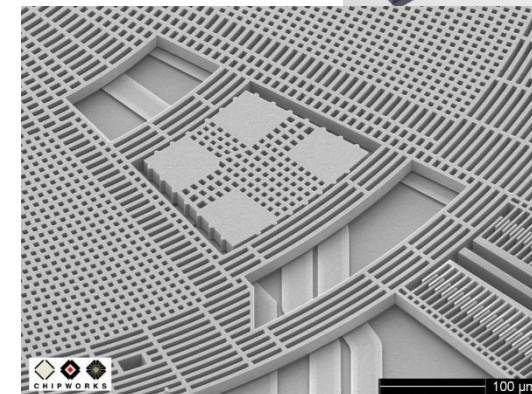
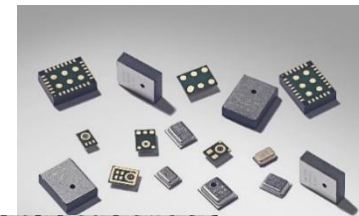
Intelligent systems need a Brain, but they also need Ears, Eyes, Arms and Legs

More Moore

More than Moore

Mindennapi életben tapasztalható alkalmazási területek:

- * Jármű – vezérlés, biztonság, autonómia
- * Mobiltelefon – funkciók bővülése
- * Orvosdiagnosztika és terápia
- * Megfigyelési rendszerek



Vehicle Sensors

Lane departure system

Night vision

Front object CCD camera

Front airbag sensors

ASCD

Nighttime pedestrian warning

Drowsiness sensors

Front object laser radar

Nighttime pedestrian warning IR sensor

Active park assist

Tire pressure sensor

Rear object monitor CCD camera

Rear camera

Side curtain sensor

Blind spot detection

Cross traffic alert

Central computer

Rear object laser radar

Wheel speed sensor

Tire pressure sensor

Collision sensor

Side airbag SRS

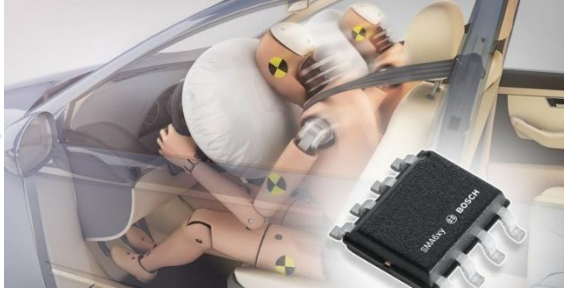
Adaptive cruise control

Steering Angle sensor

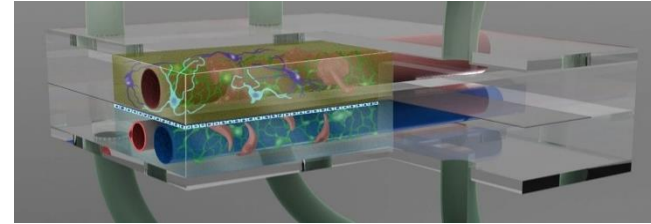
Automatic brake actuator

Wheel speed sensor

MEMS / NEMS: micro / nano-elektromechanikai rendszerek



ORGAN-ON-CHIP
▪ *terápia*

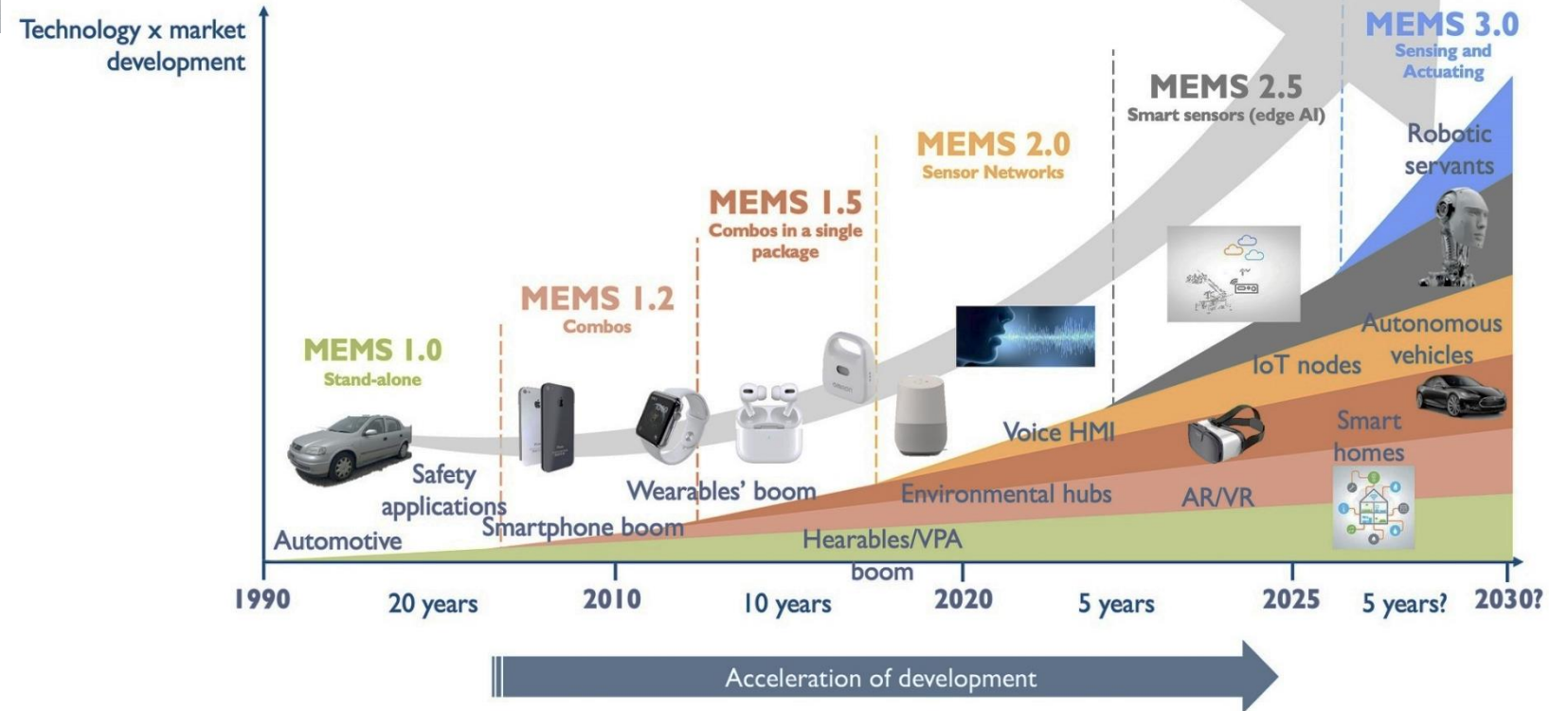


LAB-ON-A-CHIP
▪ *diagnosztika*

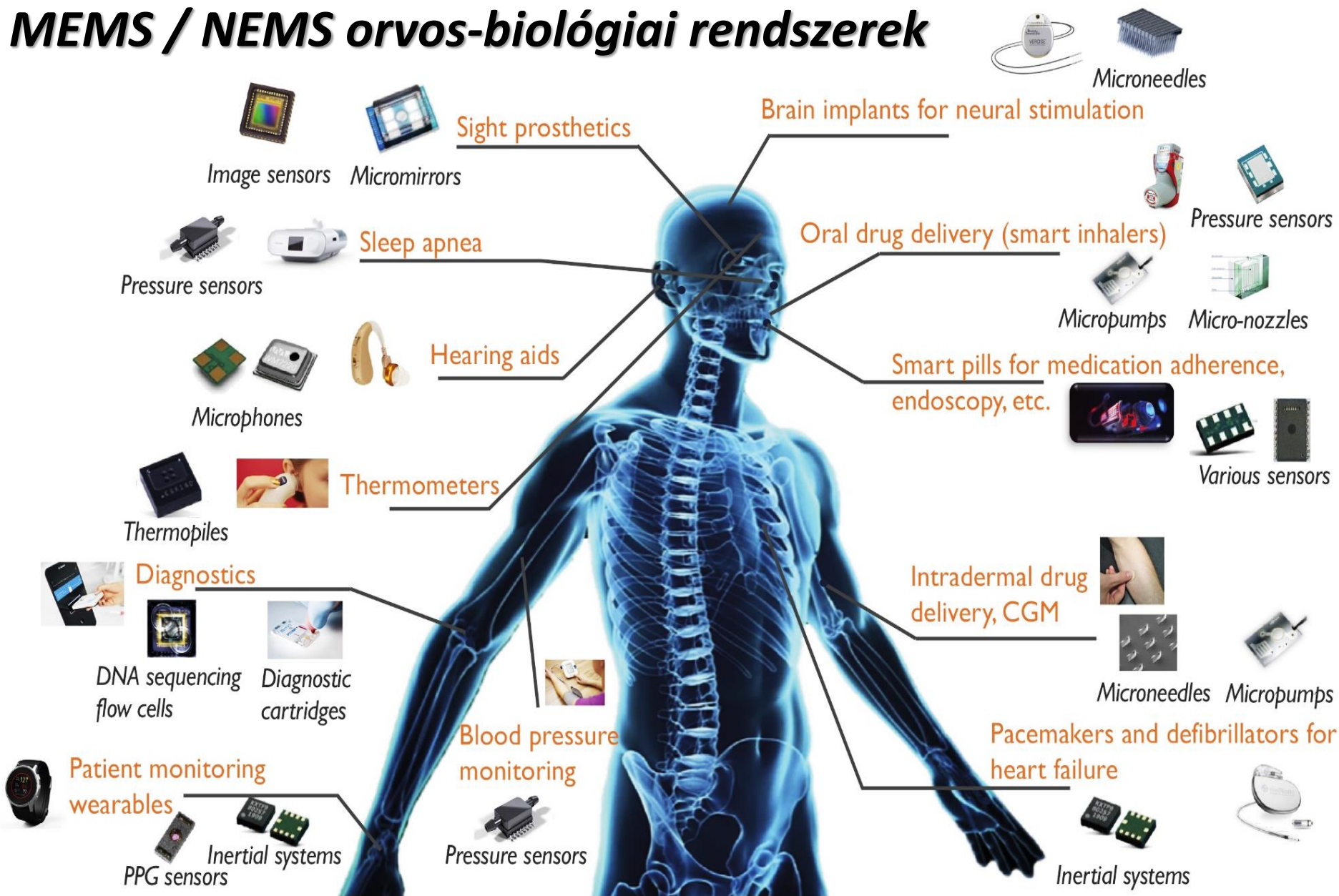
Philips – IVUS catheter



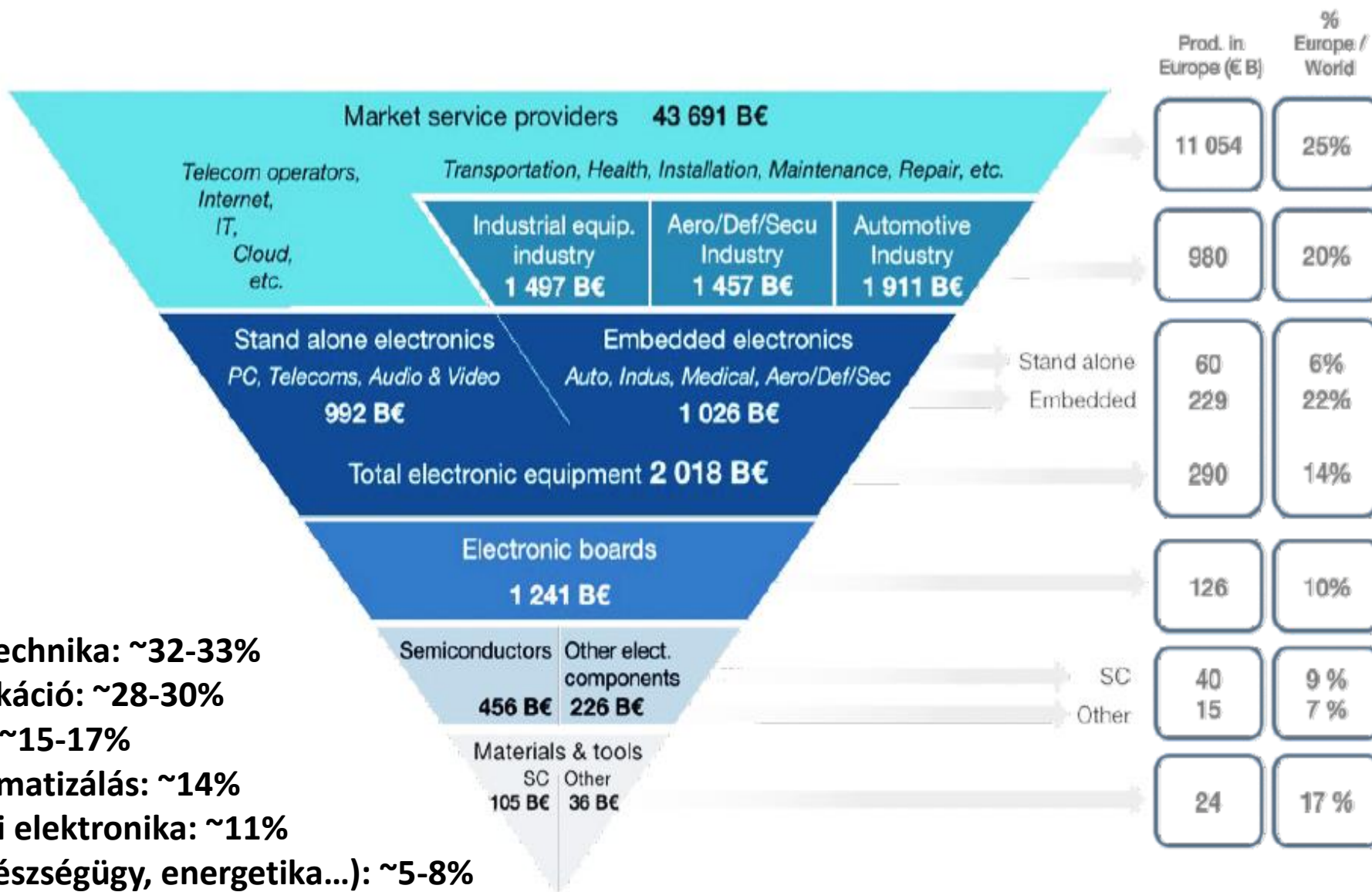
Brain-machine interfacing



MEMS / NEMS orvos-biológiai rendszerek



Az elektronikai ipar felépítése – Európa szerepe



Számítástechnika: ~32-33%

Kommunikáció: ~28-30%

Autóipar: ~15-17%

Ipari automatizálás: ~14%

Fogyasztói elektronika: ~11%

Egyéb (egészségügy, energetika...): ~5-8%

EU ChipAct

20% 2030-ig



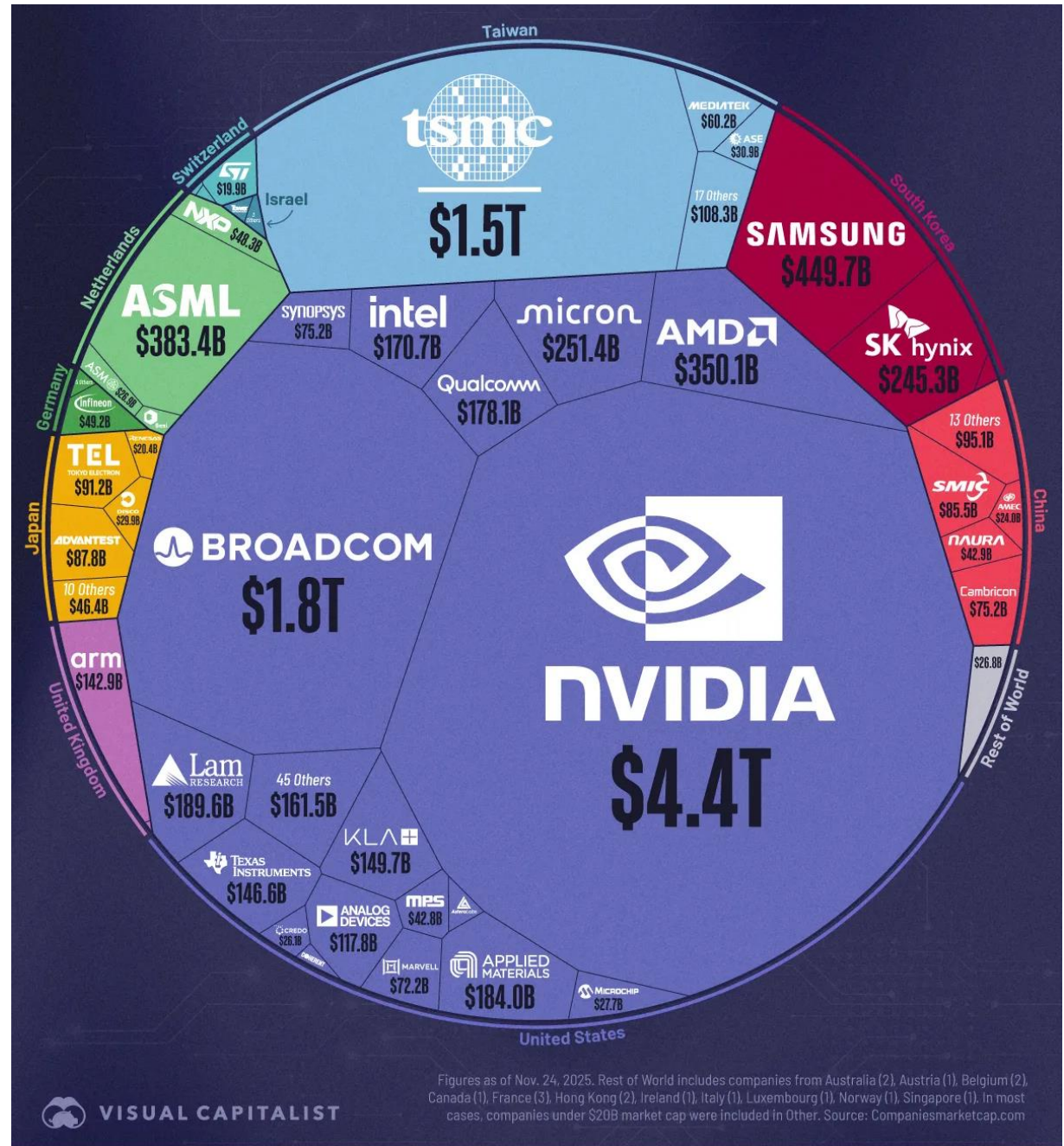
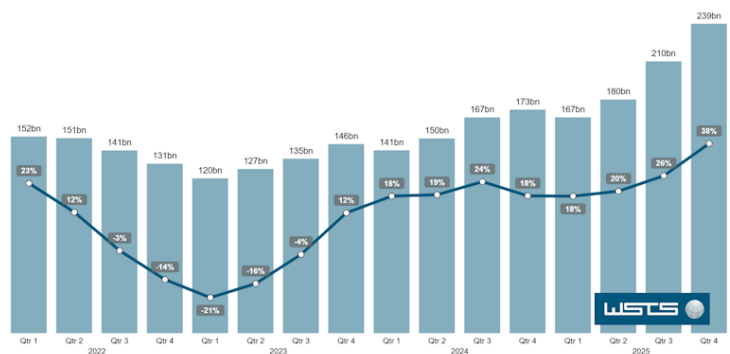
GLOBAL SEMICONDUCTOR COMPANIES BY MARKET CAP

Globális félvezetőipar
növekedése 2025-ben 26%

Előrejelzés 2026-ra:
20-30% növekedés

MI a hajtóerő!!!

Historic shipments by quarter
● Revenue in US\$ ● YoY growth in percent



Figures as of Nov. 24, 2025. Rest of World includes companies from Australia (2), Austria (1), Belgium (2), Canada (1), France (3), Hong Kong (2), Ireland (1), Italy (1), Luxembourg (1), Norway (1), Singapore (1). In most cases, companies under \$20B market cap were included in Other. Source: Companiesmarketcap.com



Company Name	Country	Full Year 2024 Revenue (USD Billion)	YoY Growth (%)
TSMC	Taiwan	87.80	34
SMIC	China	8.03	27
GlobalFoundries	USA	6.75	-9
Hua Hong	China	2.00	18
Tower Semiconductor	Israel	1.44	1
VIS	Taiwan	1.34	15
XFAB	Germany	0.82	-10

source: companies website

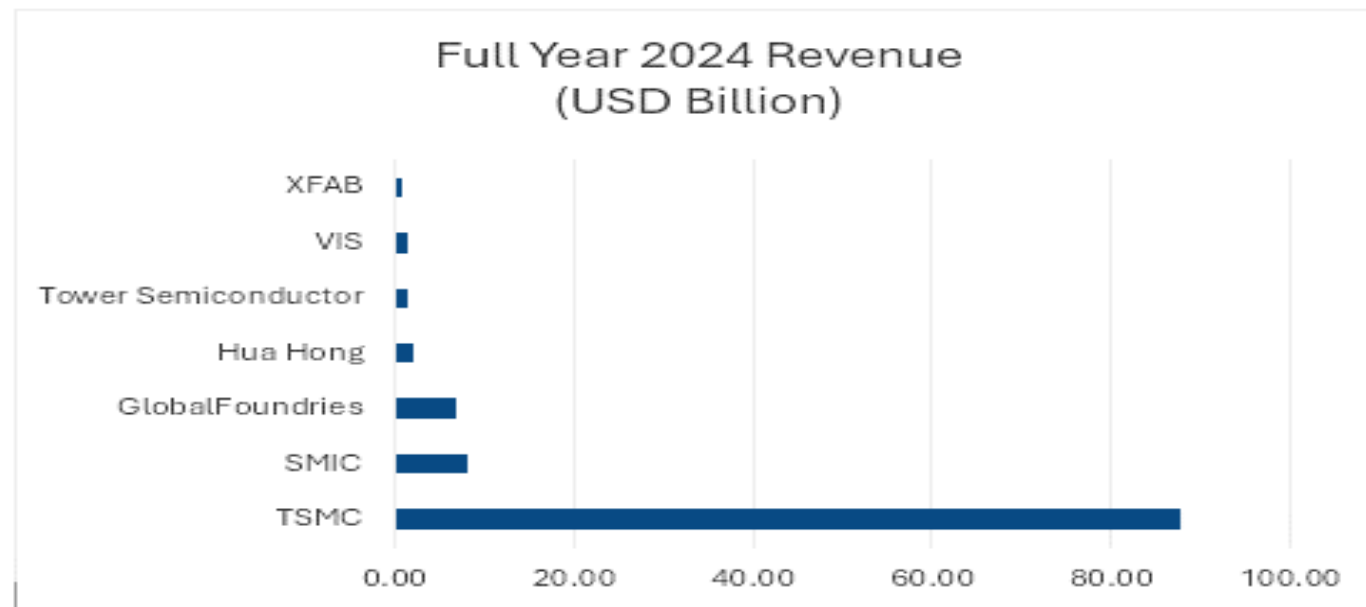
AnySilicon.com

Taiwan – **TMSC**

vezető félvezető bérnyártó

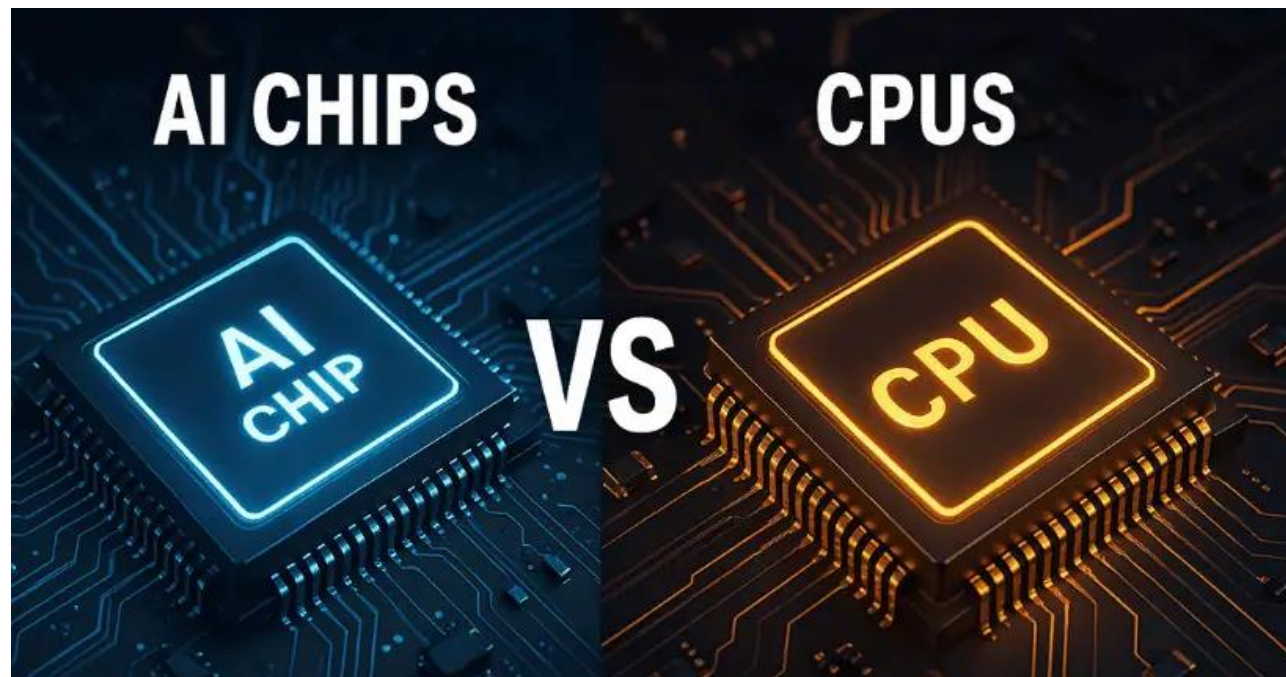
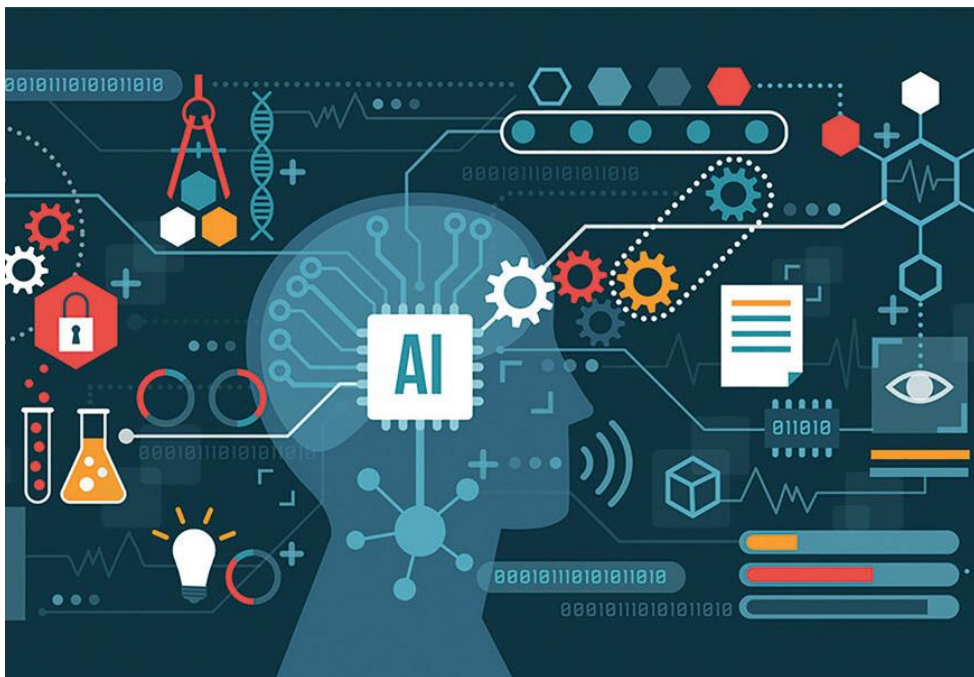
2 nm-es technológia

bérnyártás



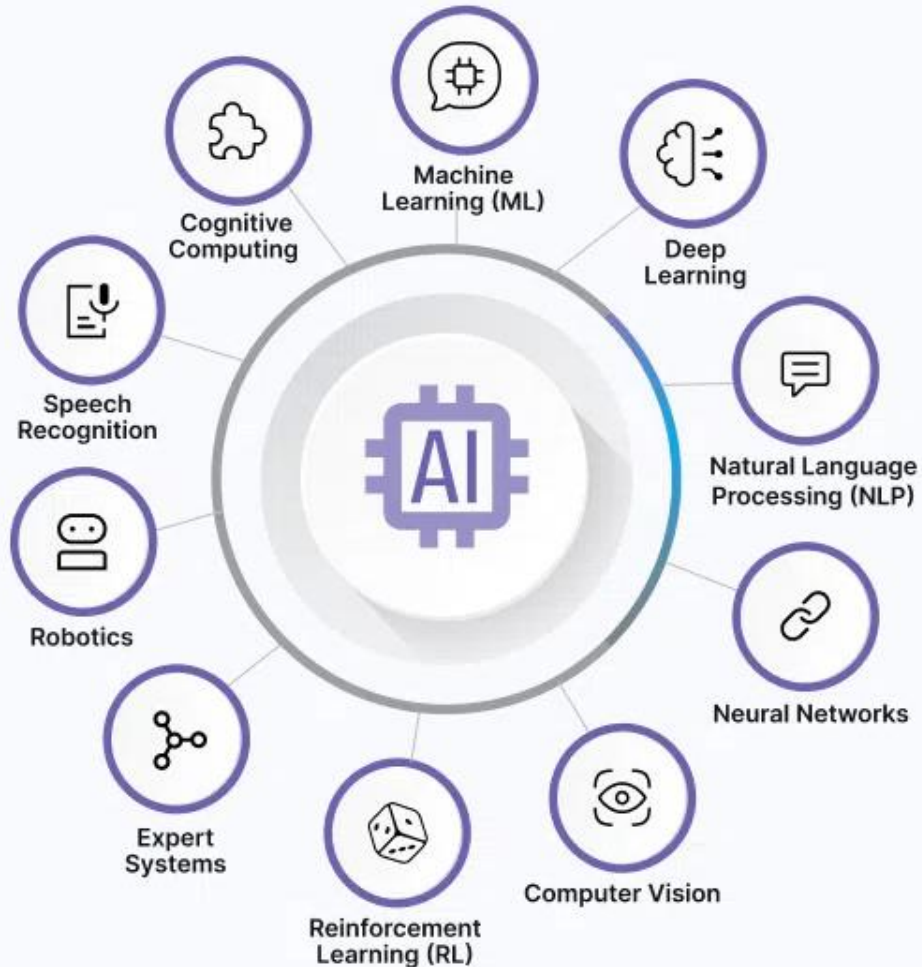
Mi húzza a félvezető piacot? – Mesterséges Intelligencia !

1. A mesterséges intelligencia számításának összetettsége és specifikussága
2. Igen nagy adathalmazok kezelése
3. A párhuzamos számítás iránti nagy igény – speciális célprocesszorok
4. Energiahatékonysági aggályok
5. Alkalmazkodóképesség és skálázhatóság
6. Speciális hardveres gyorsítás – nagysebességű memóriák
7. Piaci kereslet és alkalmazásvezérelt növekedés

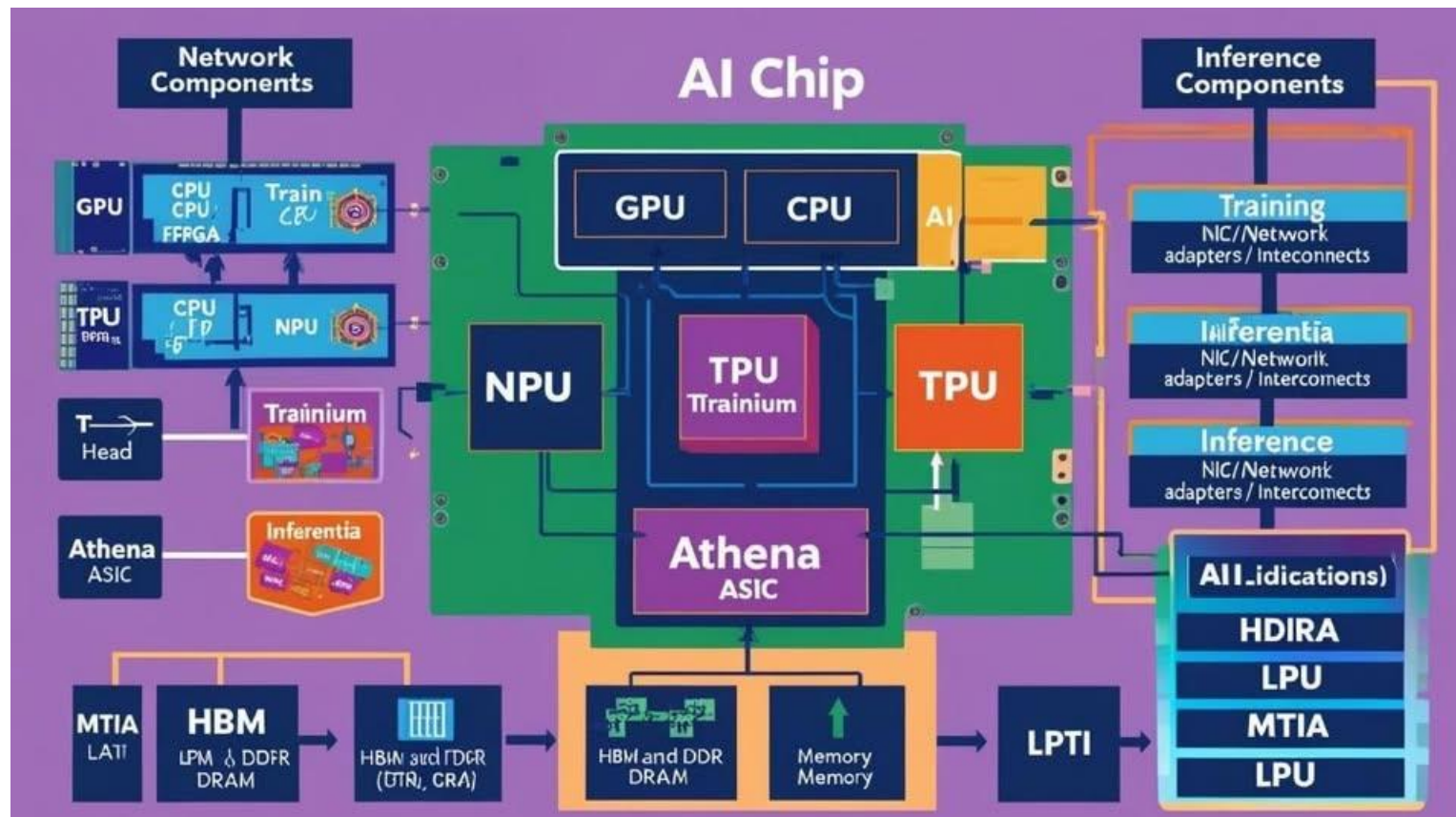


Mesterséges intelligencia

KEY COMPONENTS OF AI



- Gépi tanulás (ML)
- Mélytanulás
- Nyelvi modellek
- Gépi látás
- Robotika
- MI az egészségügyben
- MI etika
- MI a gazdasági folyamatokban
- Érthető és megbízható MI
- MI a játékokban

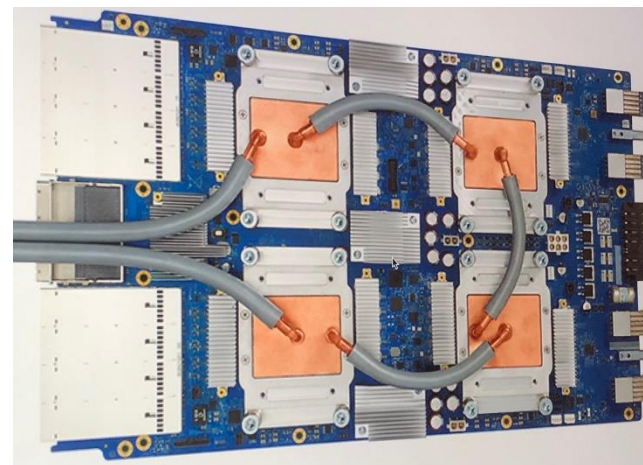
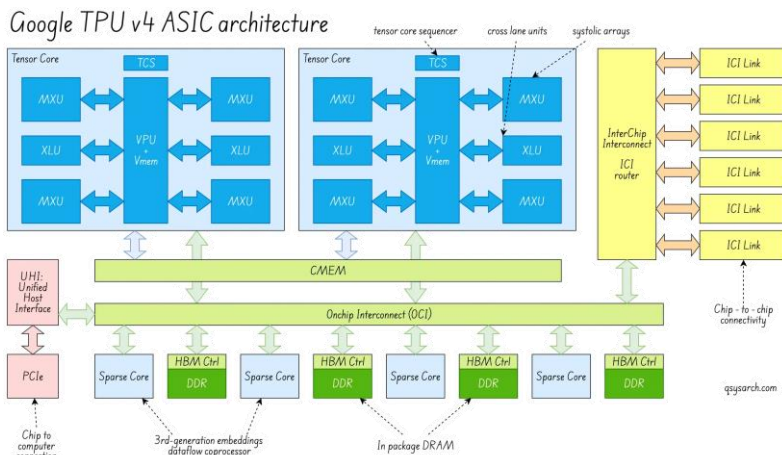


CPU: A central processing unit, **GPU:** Graphics processing unit, **TPU:** tensor processing unit, **NPU:** neural processing unit, **FPGAs:** Field-programmable gate arrays, **ASIC:** Application-Specific IC

RAM: Memory: Random access memory, **VRAM:** Video RAM, **HBM:** High bandwidth memory, **SSD:** Non-volatile memory

Nagyfokú párhuzamosítás – nagy memória és tárolási kapacitás igény - Energiahatékonyság

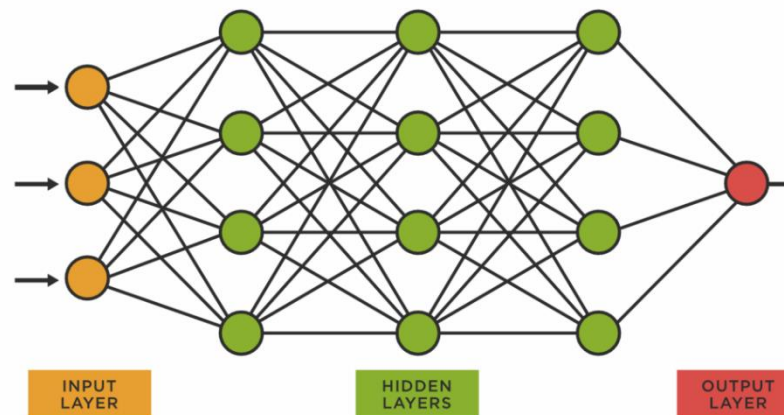
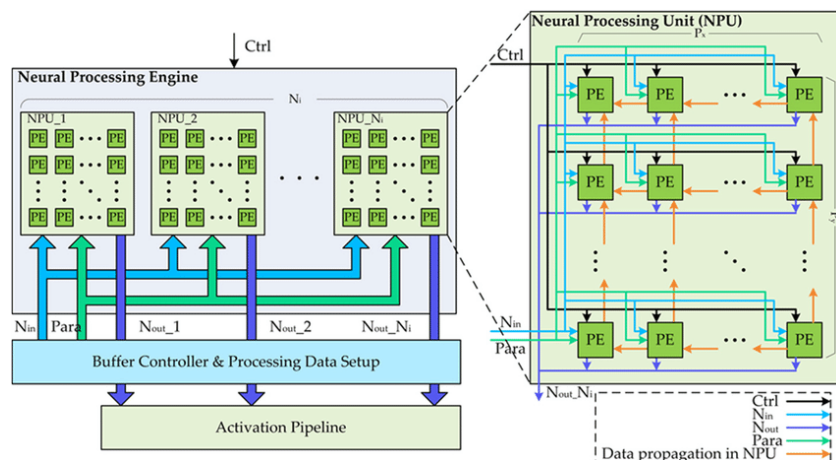
TPU



MI-re optimalizált
nagysebességű
tenzorműveletek, nagy
adattömbökön
párhuzamosan végzett
egyszerű műveletek.

Nagyvolumenű felhőalapú számításokra és modellek tanítására, óriási adathalmazok feldolgozására, valamint komplex neurális hálók betanítására (training) használják. Modulárisan összekapcsolható (podokba rendezhető), így extrém skálázható és elképesztő számítási kapacitást biztosít a fejlesztőknek. Energiafogyasztás?

NPU



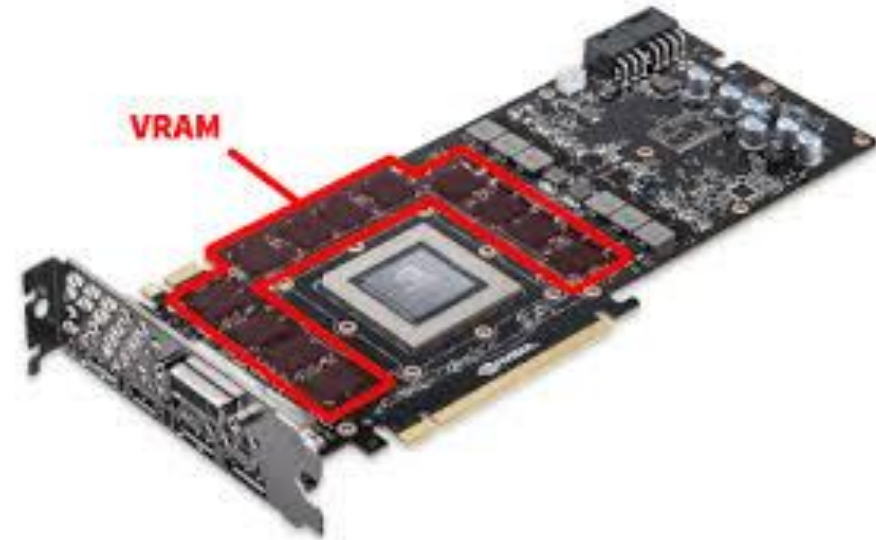
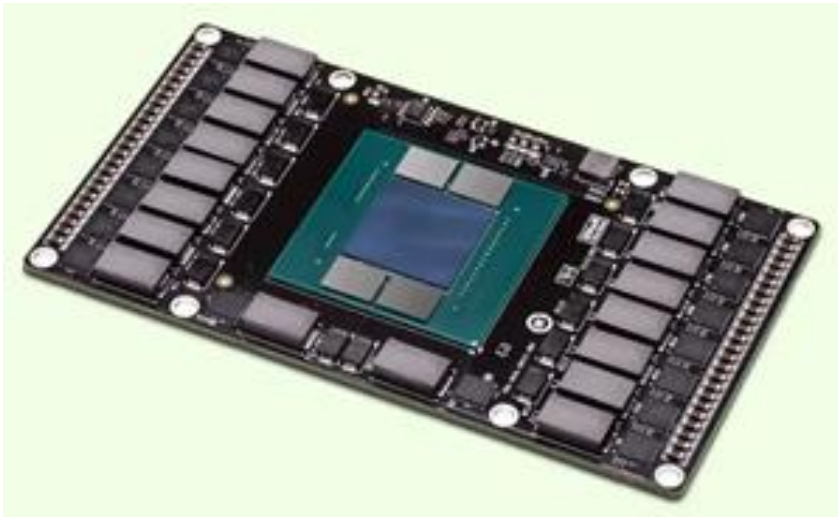
Energiahatékony
párhuzamos műveletek,
nagyszámú párhuzamos
művelet, főleg
tenzorszorzás.

Mindennapi, fogyasztói eszközökben (okostelefonok, PC-k) történő helyi AI-futtatásra specializálódott, kifejezetten az úgynevezett „következtetésre” (inference) optimalizálták, mint például az arcfelismerés, képjavítás, hangalapú asszisztensek vagy valós idejű fordítások. Nem skálázható, energiahatékonyságra optimalizált (akkumulátoridő, melegedés).

VRAM HBM

A GPU-nak hatalmas mennyiségű képi adatot (például 4K-s textúrákat) kell egyszerre mozgatnia, amihez óriási sávszélesség szükséges, lehetővé teszi, hogy a GPU a CPU-tól függetlenül, nagy sebességgel, párhuzamosan olvassa be vagy ki a képi információt.

Párhuzamos adatátvitel a GPU és a memória között: 1.2 TB/s-ot meghaladó sávszélesség 30%-kal kevesebb energiafogyasztással.



Adattárolás A szilárdtestalapú meghajtók (SSD-k): Az NVMe meghajtók gyors adathozzáférést biztosítanak, elérik a 4 TB-ot, míg a SATA SSD-k akár 8 TB-ot is képesek befogadni, besegítenek, amikor az adatok túl nagyok lesznek a rendszermemória számára.

A merevlemezek (HDD-k) költséghatékony tömeges tárolást biztosítanak: Gigabájtanként 4-5-ször olcsóbb, mint az SSD-k, 18 TB feletti kapacitás, legjobban hatalmas adathalmazok archiválási tároláshoz.



Különbségek: hagyományos számítógép ↔ MI rendszerek

- Egy MI algoritmus betanítása több hónapp is lehet, > 100 millió USD
- Számítási teljesítmény 2012 óta kb. 3.4 havonta duplázódik
- Sebesség: CPU: 1-2 TeraFlops ↔ GPU: > 100 TeraFlops
- Memória: hagyományos: 100GB/s ↔ VRAM: 1-2 TB/s 8-16 GB DRAM ↔ 80 GB - 1 TB VRAM
- Szemben a szekvenciális végrehajtással ↔ több ezer/milló számítás párhuzamosan
- Alacsony pontosságú aritmetika 64 bit ↔ 8 – 12 bit
- Energiaigény: 2024-ben az adatközpontok körülbelül 415 terawattóra (TWh) energiát használnak, a globális áramfogyasztás nagyjából 1.5%-a. Az elmúlt öt évben évente 12%-kal nőtt a fogyasztás.
- Az adatközpontok valószínűleg megduplázzák áramigényüket, mintegy 945 TWh-ra 2030-ra, a világ energiafogyasztásának közel 3%-a. A mesterséges intelligenciával működő szerverek évente 30%-kal nőnek.
- Új beruházások, chip gyártókapacitások kellenek: 2030-ig 3.1 billió USD-t prognosztizálnak.

TPU, NPU, GPU, VRAM és az MI-hoz köthető hardver elemek párhuzamos adatfeldolgozást és adatátvitelt végeznek, speciális feladatokra alkalmasak, nem általános célúak. Felépítésük és alkalmazásuk már nem felel meg a Neumann elvnek. Új, párhuzamosított architektúrákat kell megvalósítani – nagy elemsűrűséggel, 2-5 nm-es technológiák szükségesek. Az energiahatékonyság, a termál menedzsment, a melegedési problémák kezelése meghatározó.



Grönland

- USA már tervezi egy új MI adatközpont építését – természetes hűtés (szabadhűtés), megújuló energiaforrások (vízenergia) – **GreenMet Project**: több milliárd dolláros, óriási, akár 1.5 gigawattos kapacitású adatközpontot építenek a szigetre.

Kardcsörtetés Tajwan körül (Kína vs USA)

- **TSMC** – a világ vezető IC bérnyártója – gyakorlatilag majdnem mindenki ott gyártatja le a legfejlettebb IC-it.

Az ukrán háború milyen problémákat okoz a félvezetőiparban?

- Hozzáférés a fejlett félvezető gyártástechnológiákhoz egyre nehezebb – Embargók
- A fejlett chippek és áramkörök beszerzése nehézkes.
- Hiányok a drónokban alkalmazott áramkörök és érzékelők piacán – a polgári felhasználás kárára.
- Növekszik a titkolózás – nem lehet tudni Kína vagy Oroszország mire képes.
- A gyártási kapacitások még nagyobb koncentrációja.
- Árnövekedés



Az iráni háború milyen problémákat okoz a félvezetőiparban?

- A félvezető gyártástechnológia zöme Ázsiában található
- Az intenzív, precíz gyártási folyamathoz szükséges nyersanyagok nagy része a Közel-Keletről származik + Energia
- **Hélium** kulcsfontosságú anyag a technológiai folyamatokban – földgáz kitermelés mellékterméke – ára duplázódott, szállítási nehézségek
- Földgáz szállítási nehézségek – Folyamatos gyártásban nehézségek
- A legnagyobb mesterséges intelligencia-vállalatoknak tavaly közel 450 milliárd dollárt költöttek adatközpontok kiépítésére, idén 700 milliárd dollárt terveznek – elegendő pénzük van ahhoz, hogy ellenálljanak ezeknek a zavaroknak, és megvásárolják működtetéséhez szükséges chipeket – bármi áron is.
- Félvezető hiány miatt mindennek megy fel az ára.

A félvezetők folyamatos áramlásának jelenlegi zavarai felgyorsíthatják a mesterséges intelligencia-gazdaság buborékának (?) kipukkadását.

Köszönöm a figyelmet.

