

# More than Moore vagy more Moore? A Moore törvény 60 éve és a félvezetők fizikájának alapjai

**Simon Ferenc**

*BME TTK*

*Wigner Fizikai Kutatóközpont*



M Ű E G Y E T E M 1 7 8 2



*Támogató:*

Semilab Félvezető Fizikai  
Laboratórium Zrt.



# köszönetnyilvánítás



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI  
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL



# EGYÉB PROGRAMOK, ELÉRHETŐSÉGEK

Science Campus rendezvénysorozat

Előadások kari YouTube csatornán

Science Camp nyári tábor

Matematikaverseny: <https://alfa.bme.hu/>

Szakkörök

Lányok napja

**Információkat találsz:**

Kari felvi honlap: [felvi.ttk.bme.hu](https://felvi.ttk.bme.hu)

Kari honlap: [ttk.bme.hu](https://ttk.bme.hu)

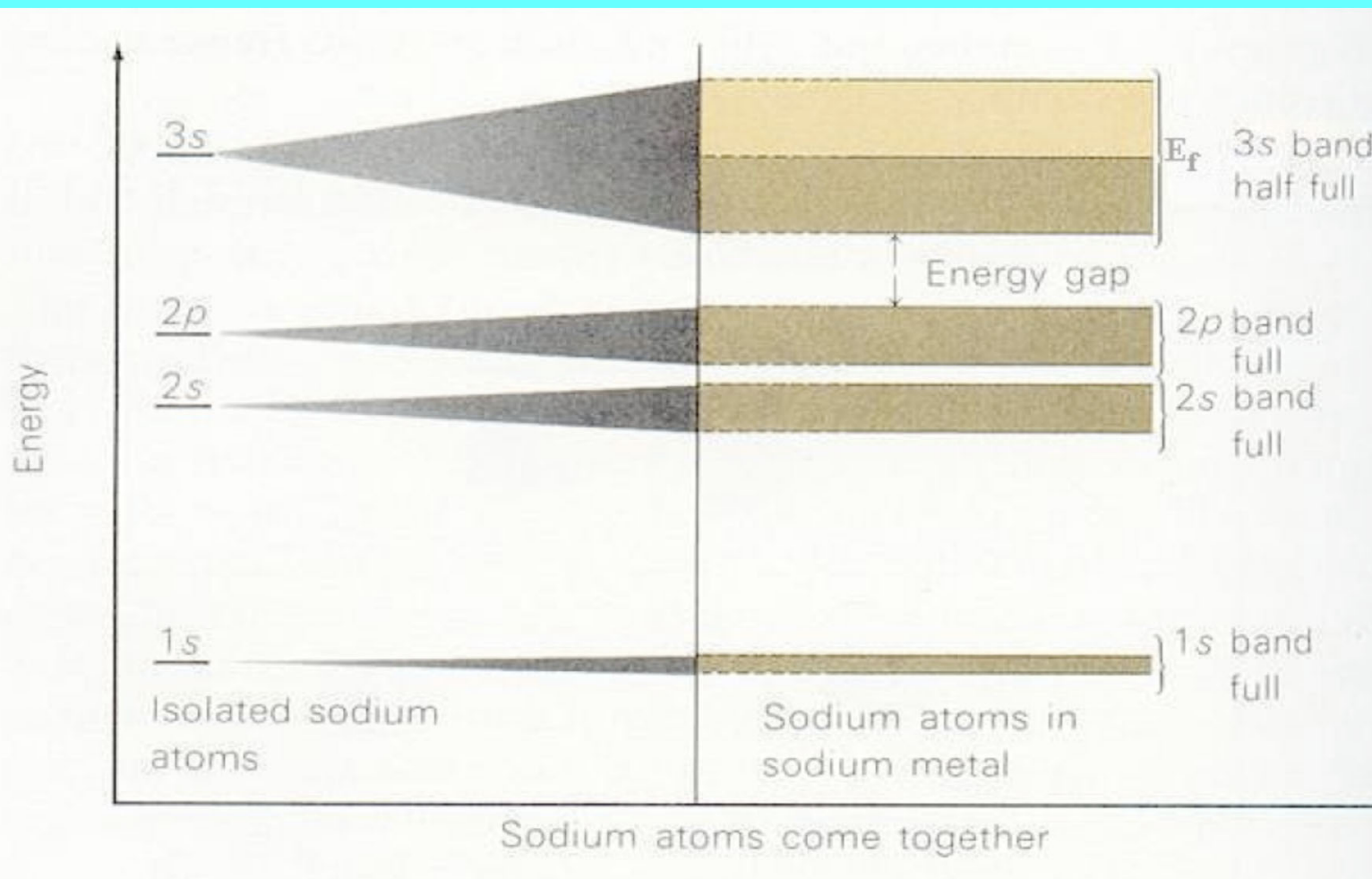


# A sávszerkezet alapjai

Electron Configurations in the Periodic Table

1 H 1s																	2 He 1s
3 Li 2s	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na 3s	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K 4s	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb 5s	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs 6s	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr 7s	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110	111	112	113	114				
		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu		
		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr		

# Atomoktól a szilárd testekig: a Pauli elv



Ún. vezetési sáv

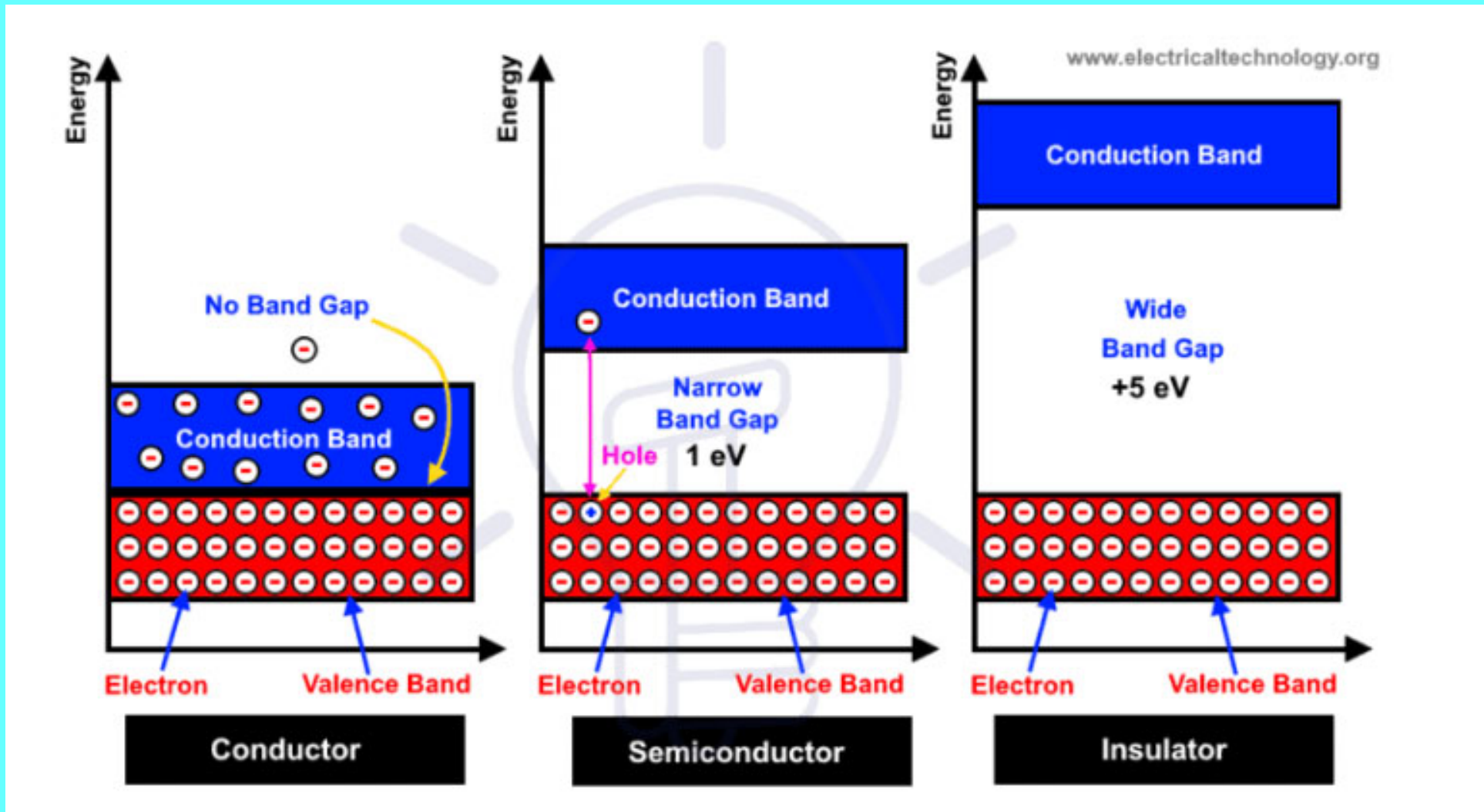
Tiltott sáv

Valencia sáv

Tiltott sáv

A szilárdtestekben a Pauli-elv miatt lesznek sávok. Ezek követik az atomi nívók szerkezetét. Ez a tiltott sávok kialakulásának oka is.

# Fémek, félvezetők, szigetelők



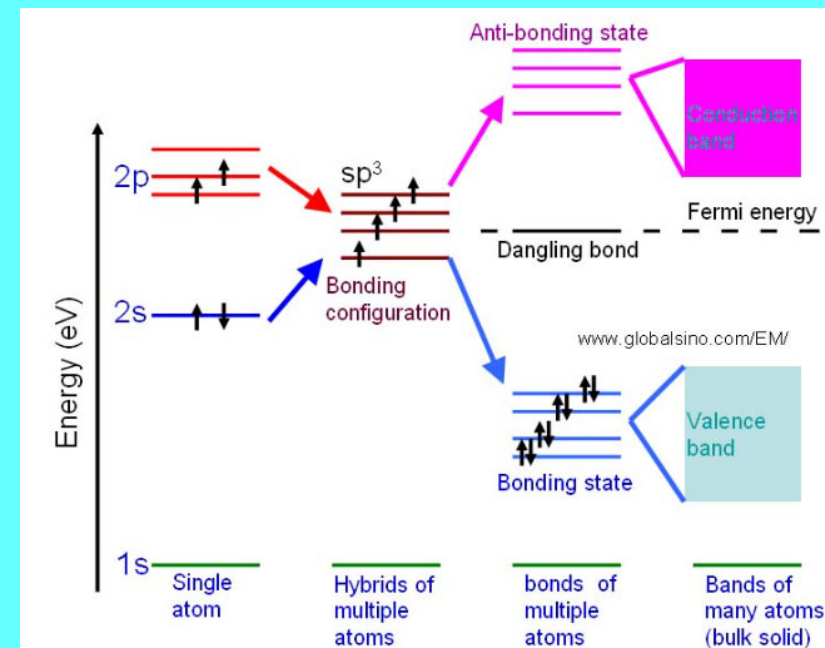
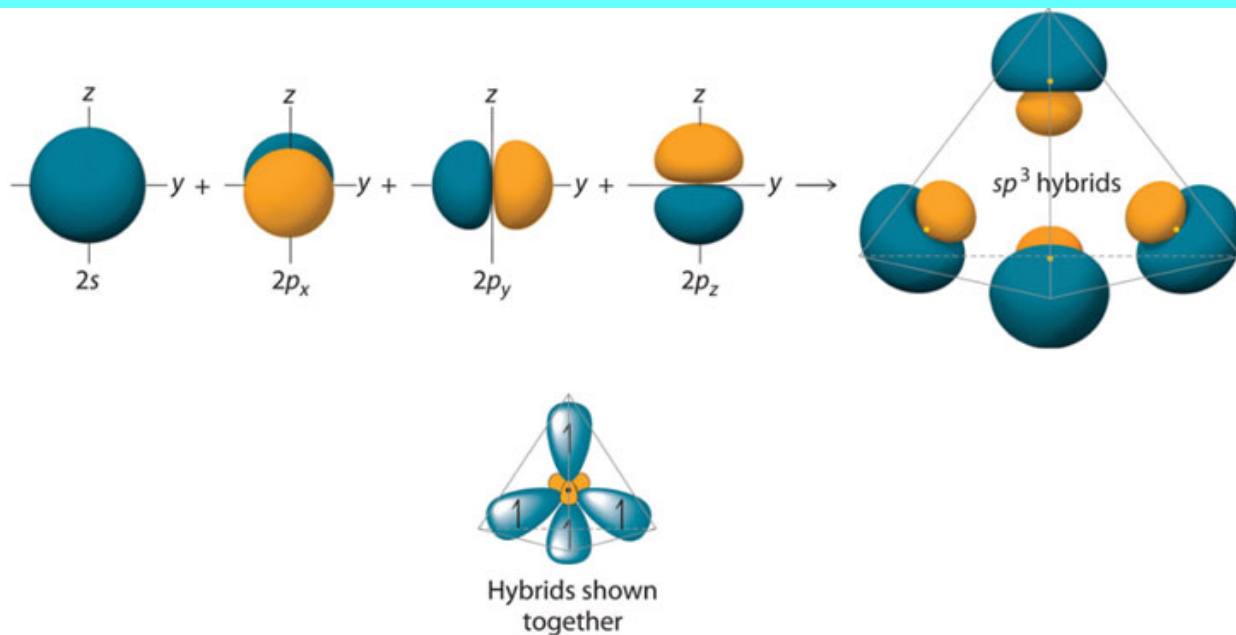
Félvezető: félig-vezető (Halbleiter, semiconductor)

# Szilícium: hibridizáció

Electron Configurations in the Periodic Table

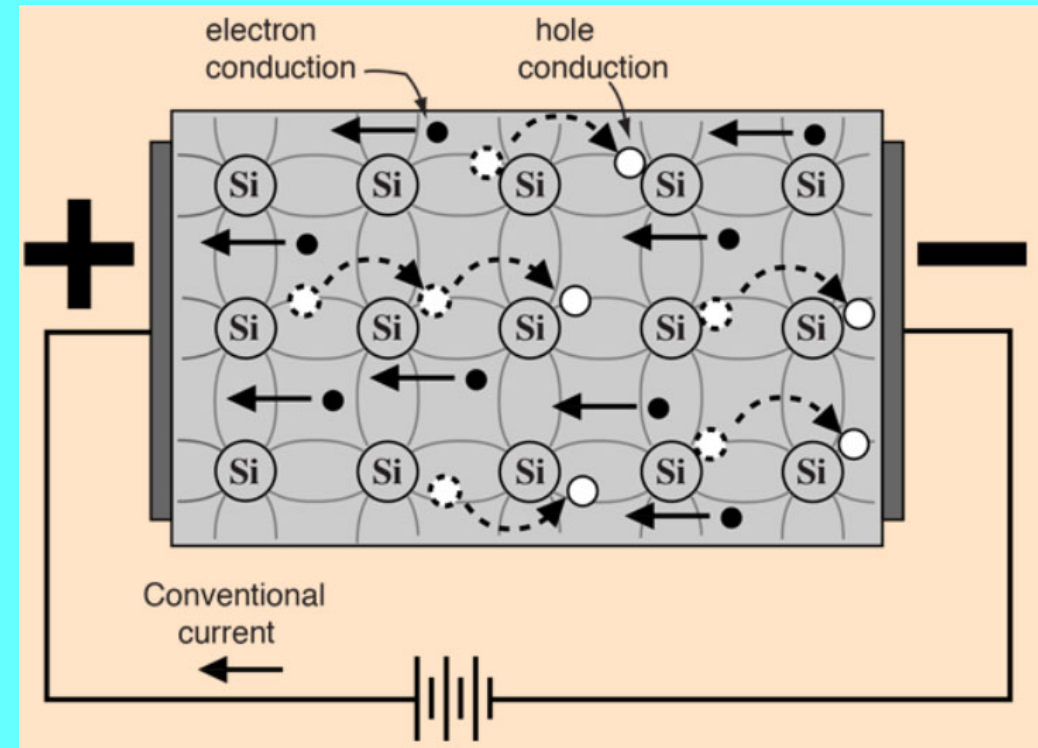
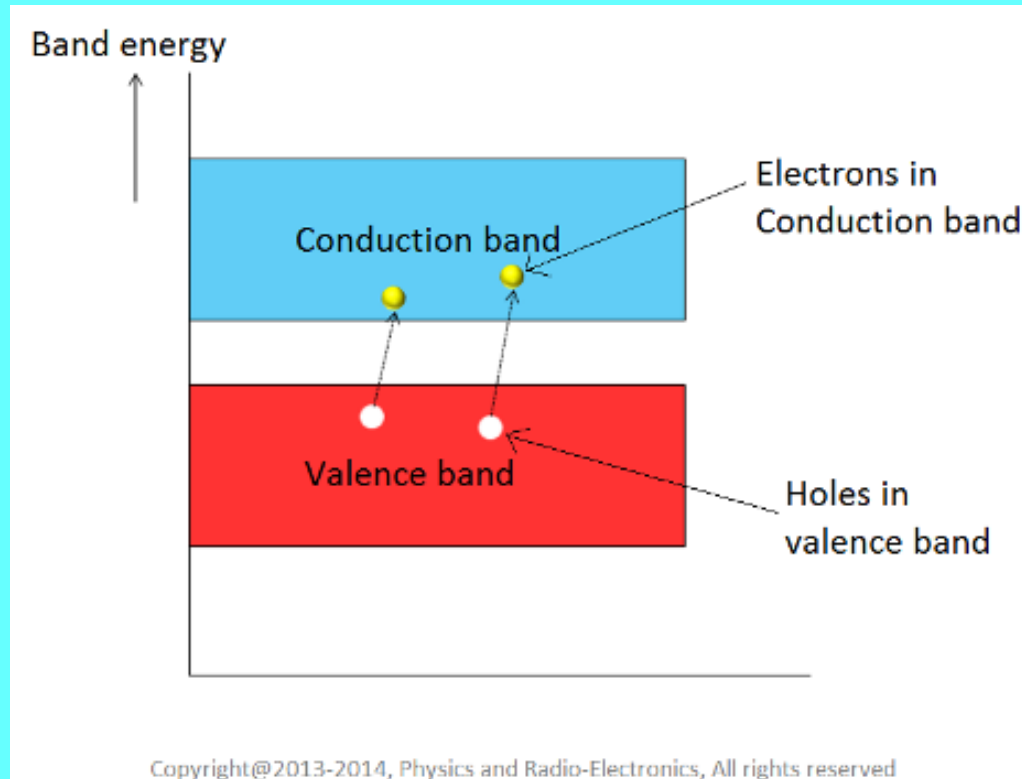
1 H 1s											2 He 1s	
3 Li 2s	4 Be			5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne	2p		
11 Na 3s	12 Mg				13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar	3p	

Szilíciumnak alaptól fémnek kellene lennie!



*A hibridizáció miatt kapunk egy teljesen betöltött valencia és egy üres vezetési sávot, tiltott sávval elválasztva.*

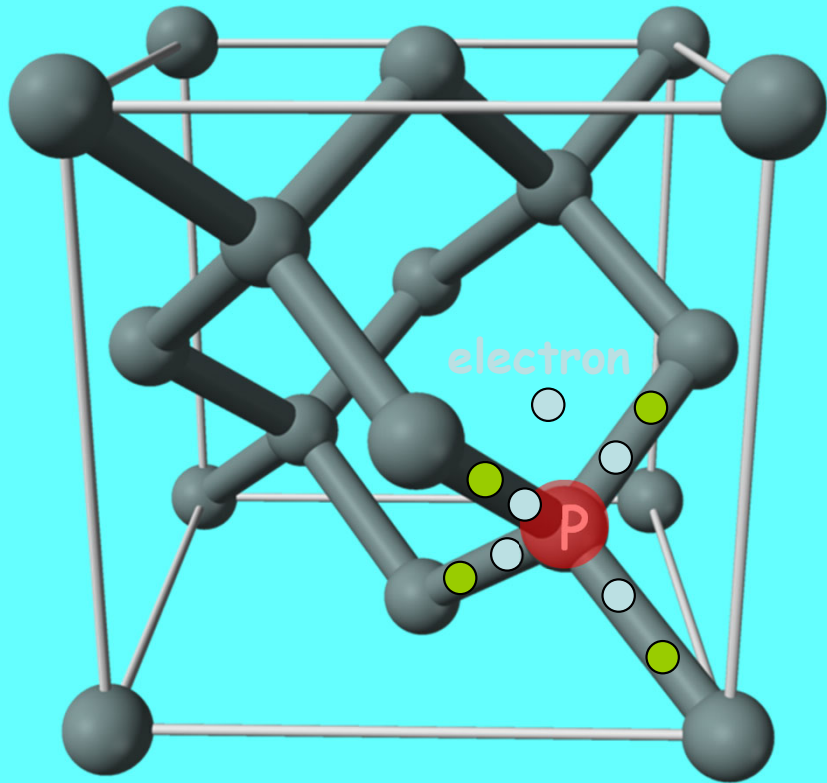
# Elektron és lyukvezetés (hőmérsékleti gerjesztés)



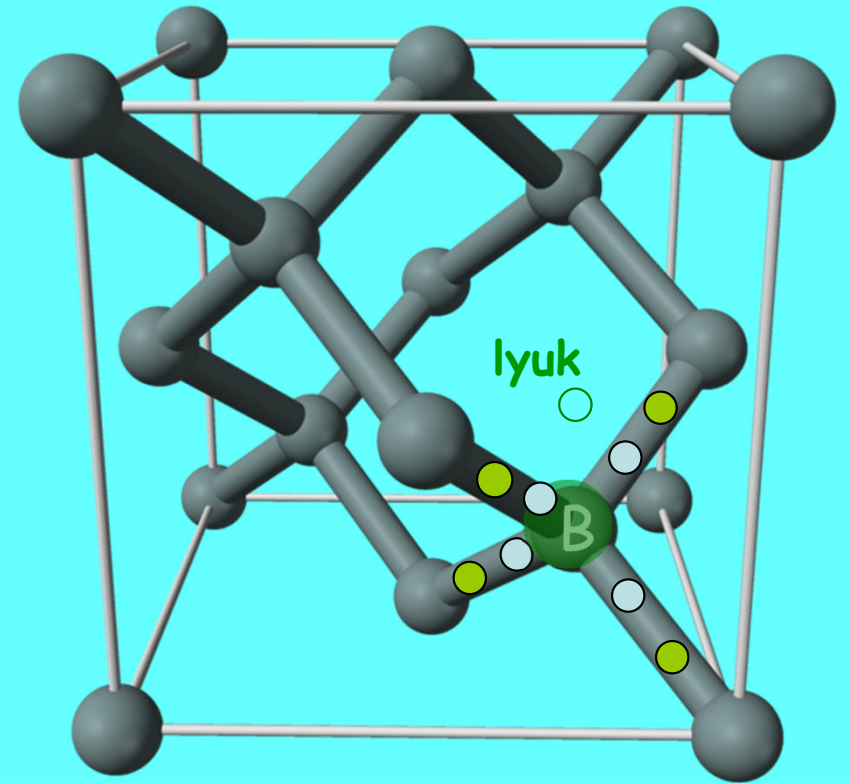
*Az elektronok és lyukak árama azonos irányú: egy balra haladó negatív töltés (elektron) árama ugyanolyan mintha egy pozitív töltés (lyuk) jobbra haladna.*



# Adalékolás (dópolás)



Donor

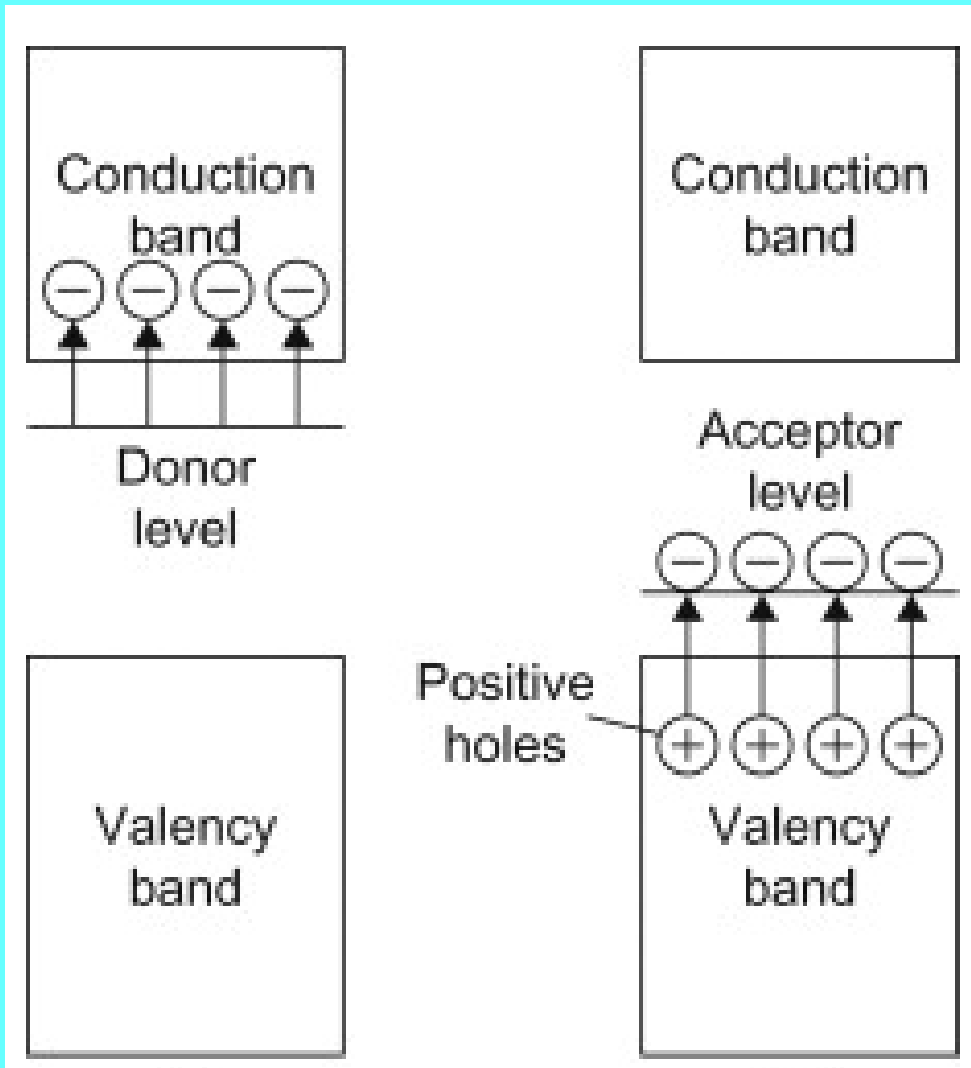


Akceptor

Electron Configurations in the Periodic Table

1 H 1s									2 He 1s								
3 Li 2s	4 Be							5 B	6 C	7 N 2p	8 O	9 F	10 Ne				
11 Na 3s	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P 3p	16 S	17 Cl	18 Ar

# Adalékolás (dópolás)



n-típusú félvezető

p-típusú félvezető

Kisebbségi, többségi töltéshordozó

n típusúban: elektron többségi, lyuk kisebbségi

p típusúban: lyuk többségi, elektron kisebbségi

**A tömeghatás törvénye:**

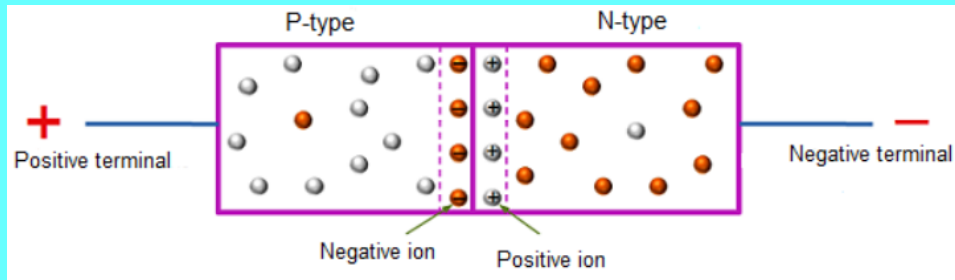
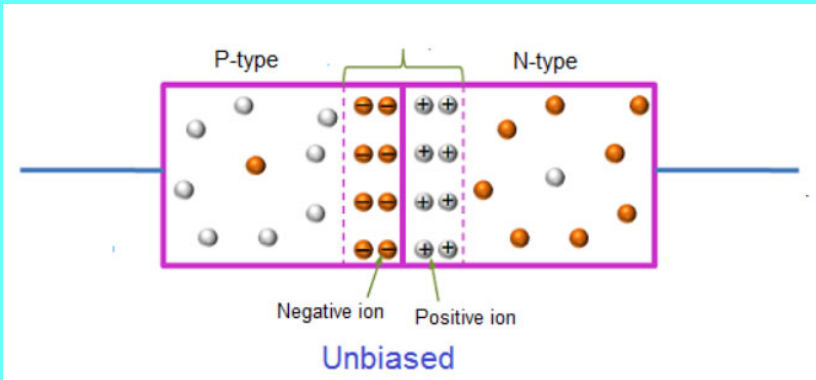
Elektronok száma \* lyukak száma = állandó

Analógia, vedd össze: víz pH-ja:



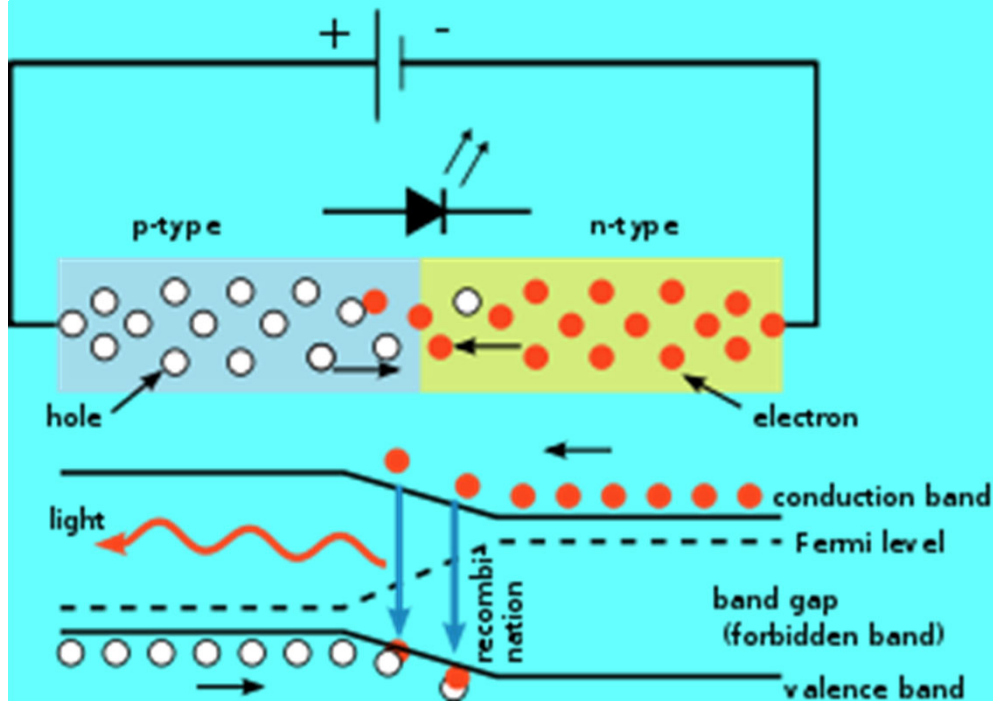
# A dióda

Kiürített réteg



Nyitóirány, kiürített réteg csökken áram folyik

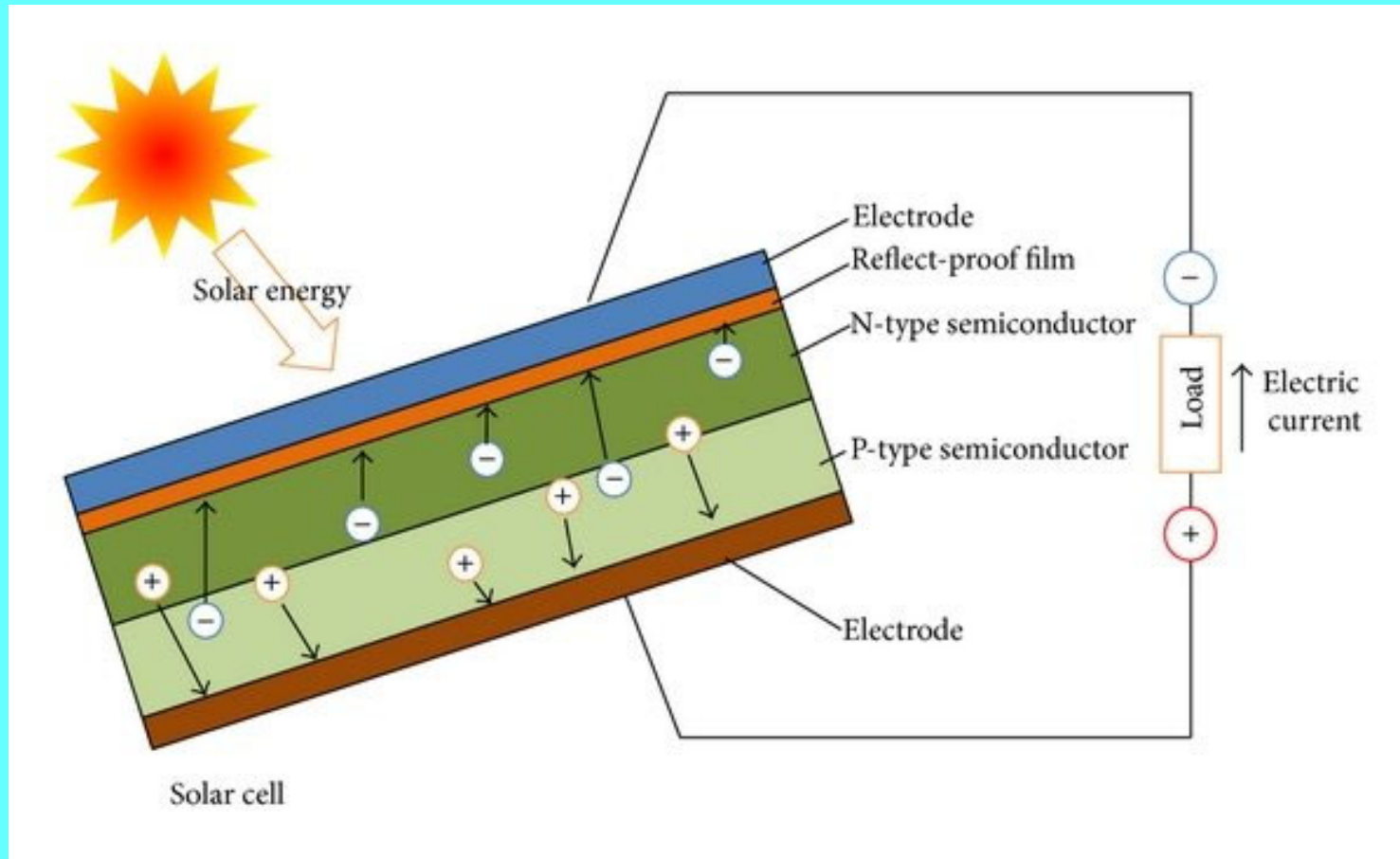
Záróirányban kiürített réteg nő, áram nem folyik  
**EGYENIRÁNYÍTÁS**



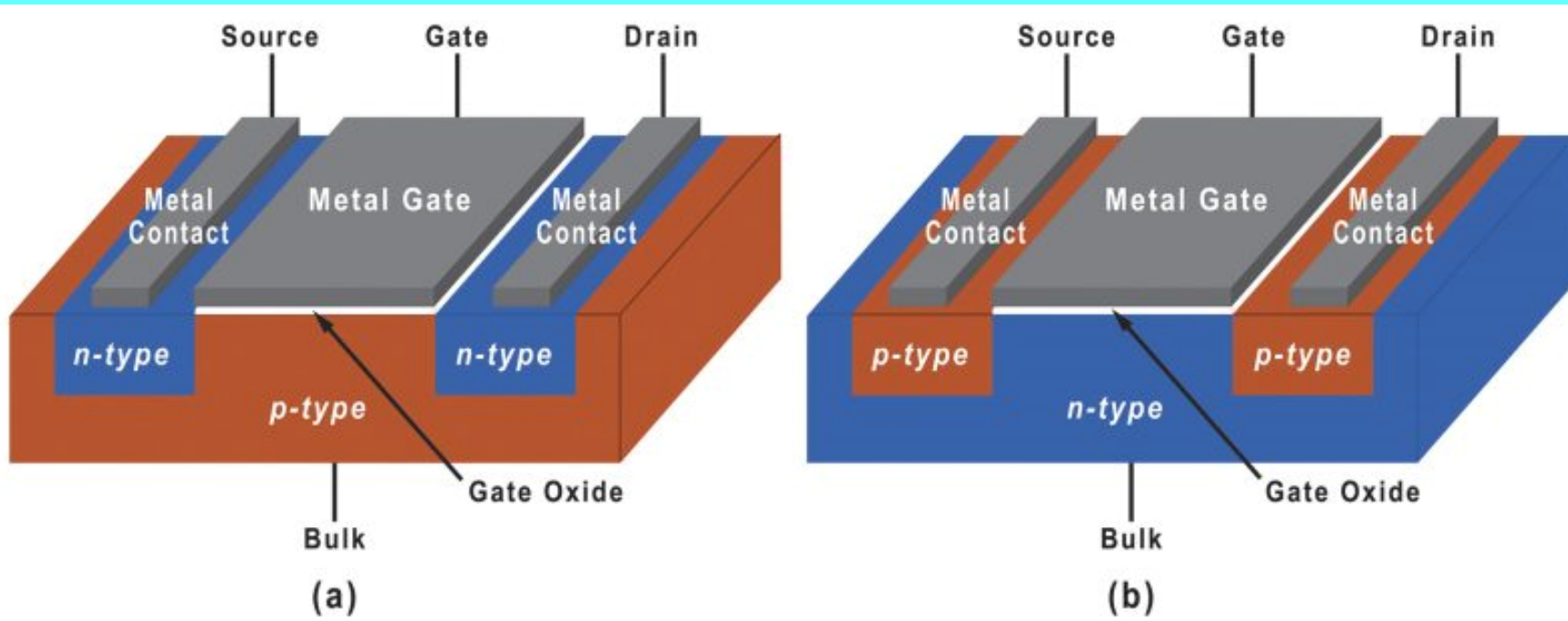
LED: light emitting diode

Napelemben: ugyanez a folyamat megfordítva játszódik le

# A napelem/photovoltaic cell



# Tervezérelt tranzisztor (FET)



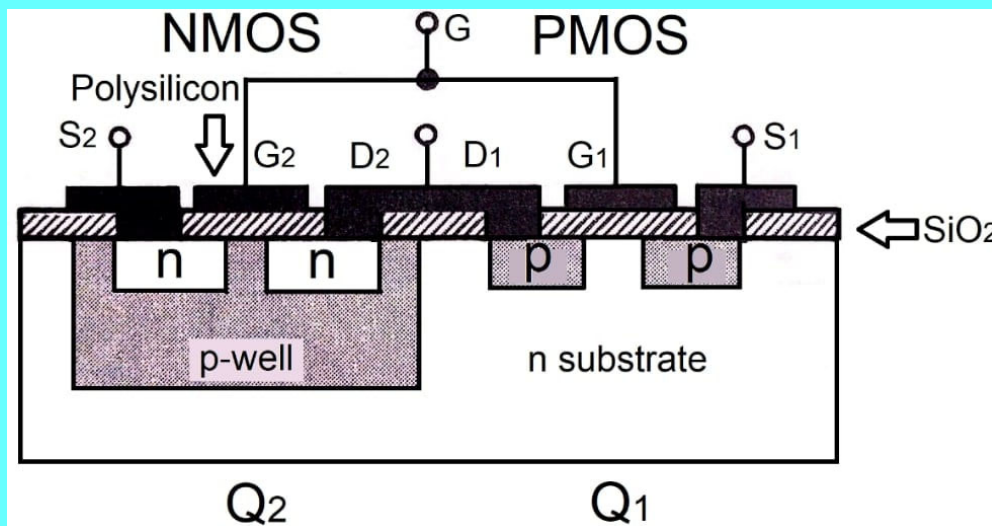
Source  
Drain  
Gate

Forrás  
Nyelő  
Kapu

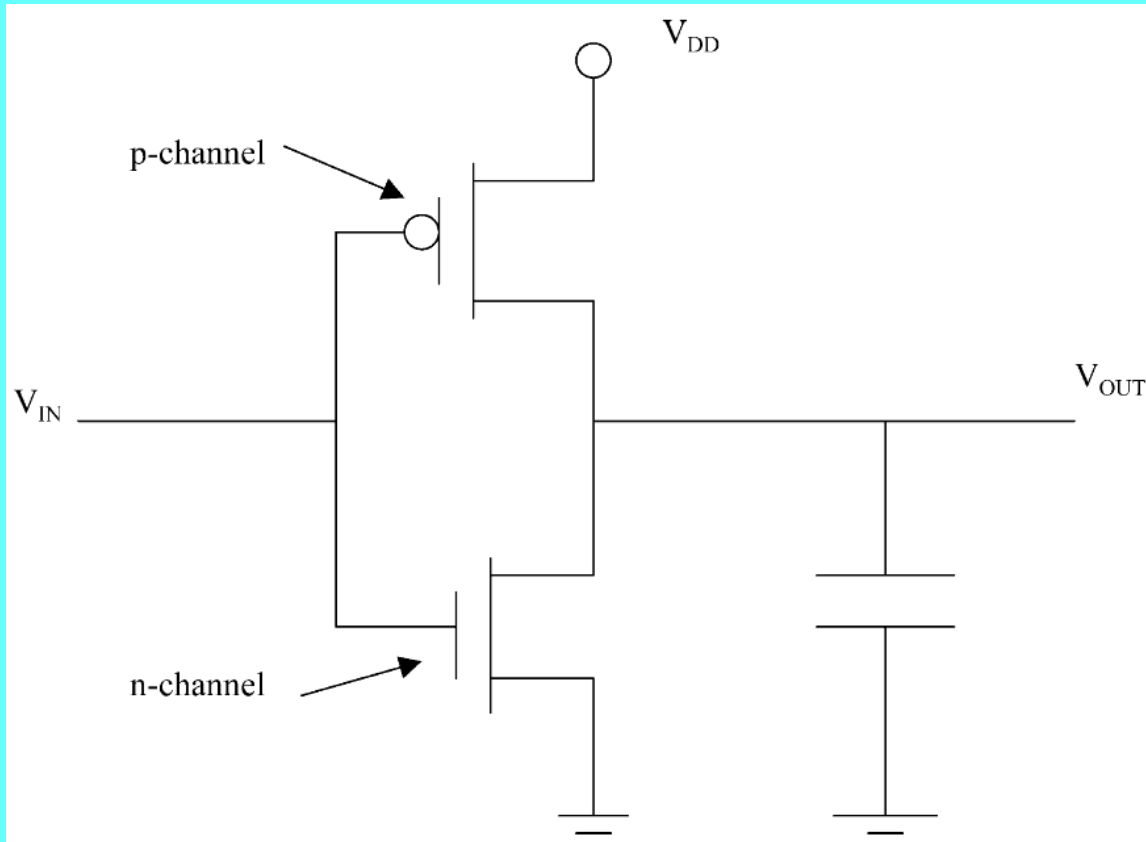
n-csatornás FET

p-csatornás FET

CMOS: nem folyik áram (Complementary Metal Oxide FET)



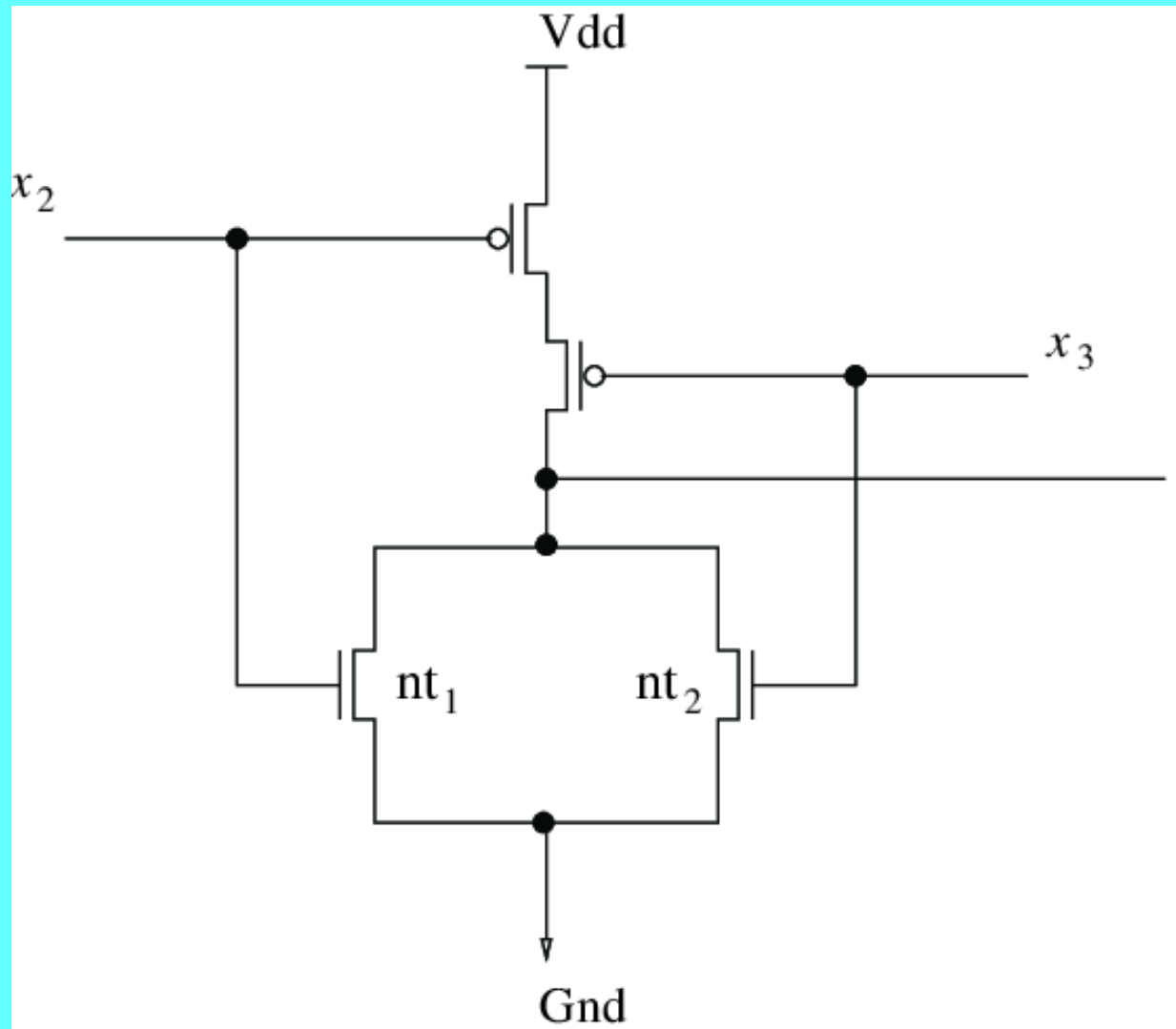
# CMOS logika 1.



$V_{dd}$  magas  
 $V_{ss}$  alacsony

$V_{in}$  magas: n chan. nyitva, p chan. zárva:  $V_{out}$  low  
 $V_{in}$  alacsony: n chan. zárva, p chan. nyitva:  $V_{out}$  low

# CMOS logika 2.

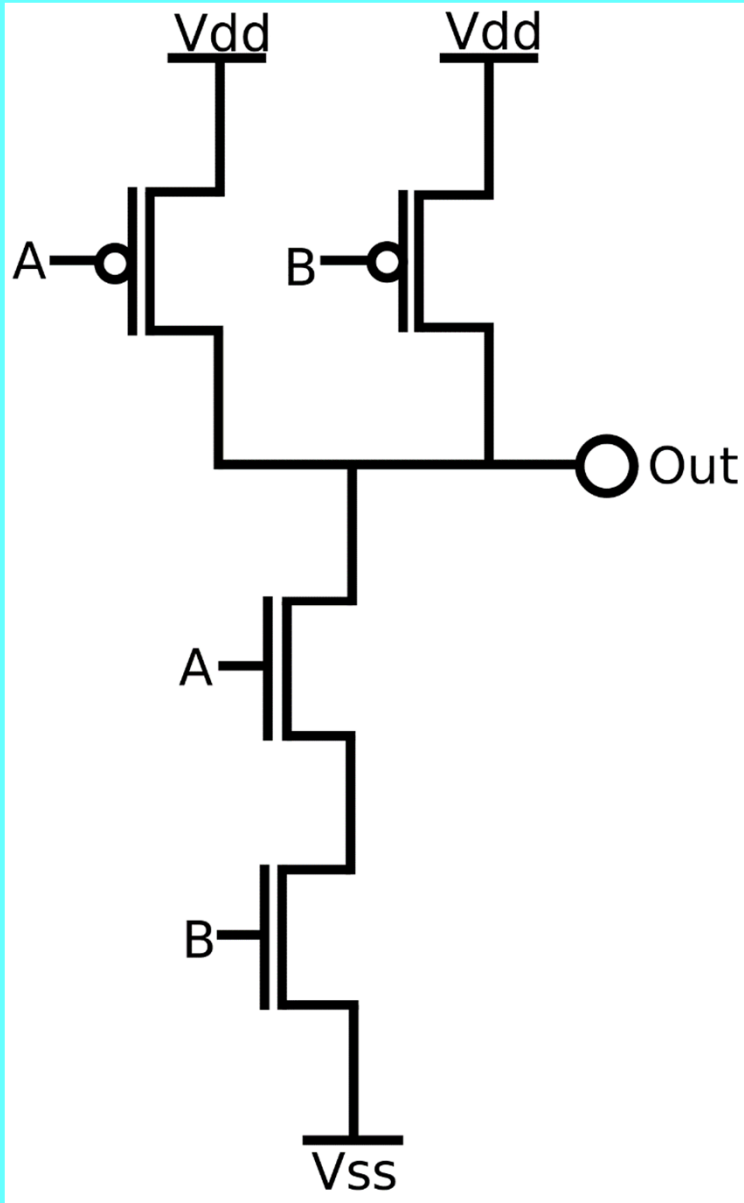


Input		Output	
A	B	OR	NOR
0	0	0	1
0	1	1	0
1	0	1	0
1	1	1	0

$$y = \overline{x_2 \vee x_3}$$

**NOR kapu**

# CMOS logika 3.

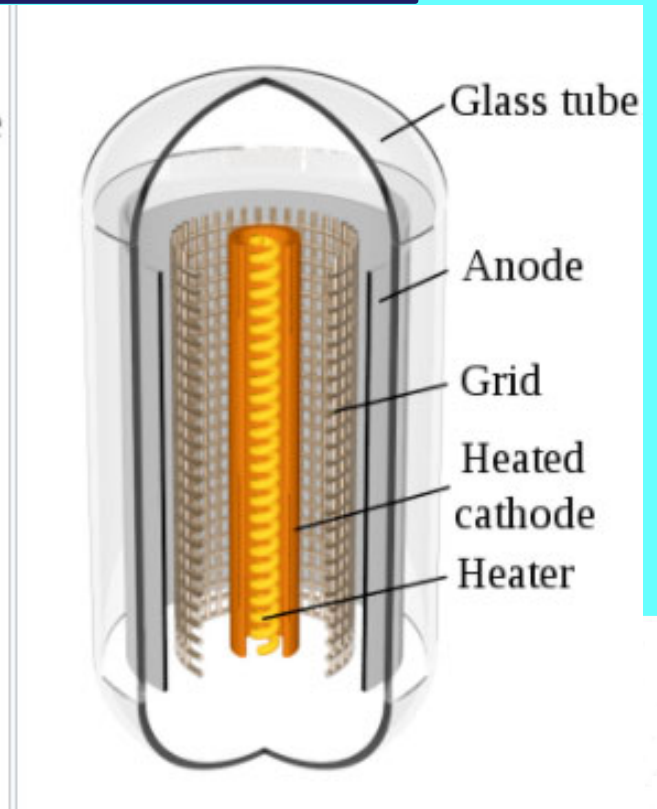
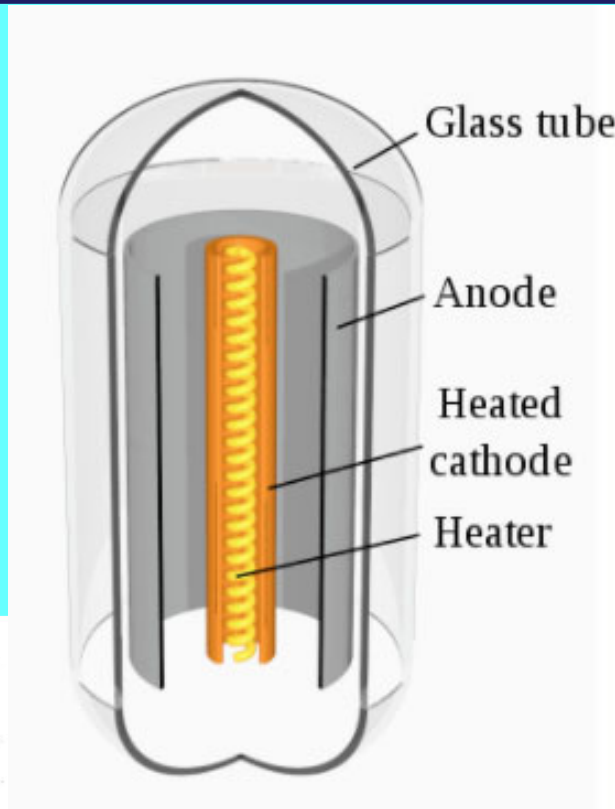


Input		Output	
A	B	AND	NAND
0	0	0	1
0	1	0	1
1	0	0	1
1	1	1	0

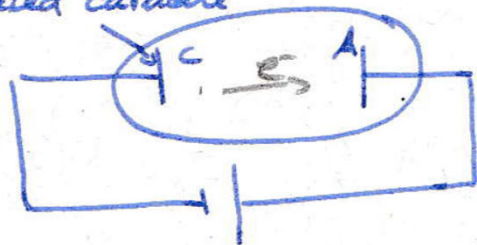
**NAND kapu**



# 1910-1940: Vákuumcsövek

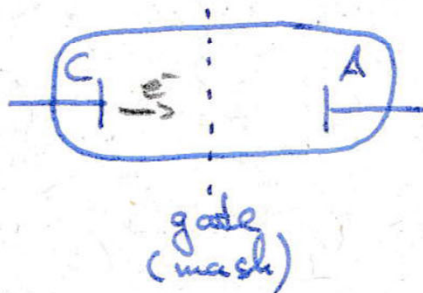


heated cathode



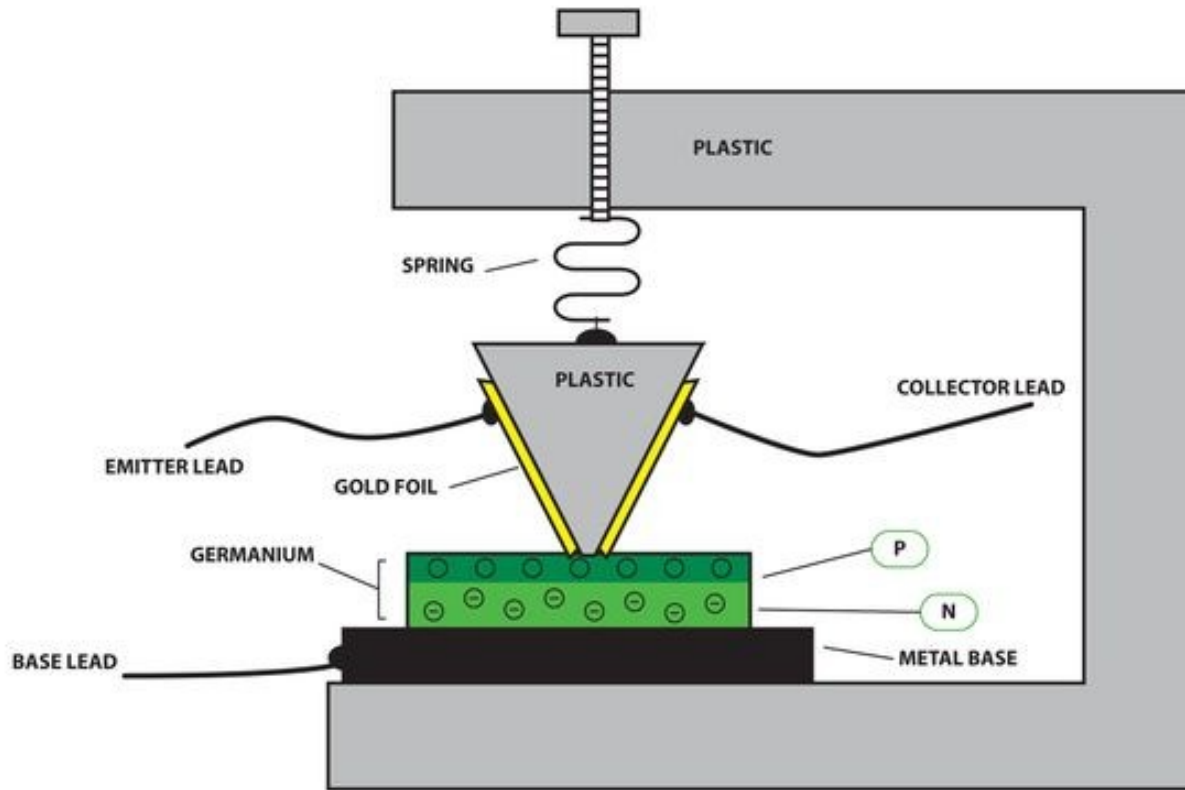
first diode: in reverse bias there is no current

• triode (1906.)



anode current is controlled by  $V_{CG}$  (cathode-gate voltage)  
 high impedance control device,  $I_G = \phi$

# Az első tranzisztor



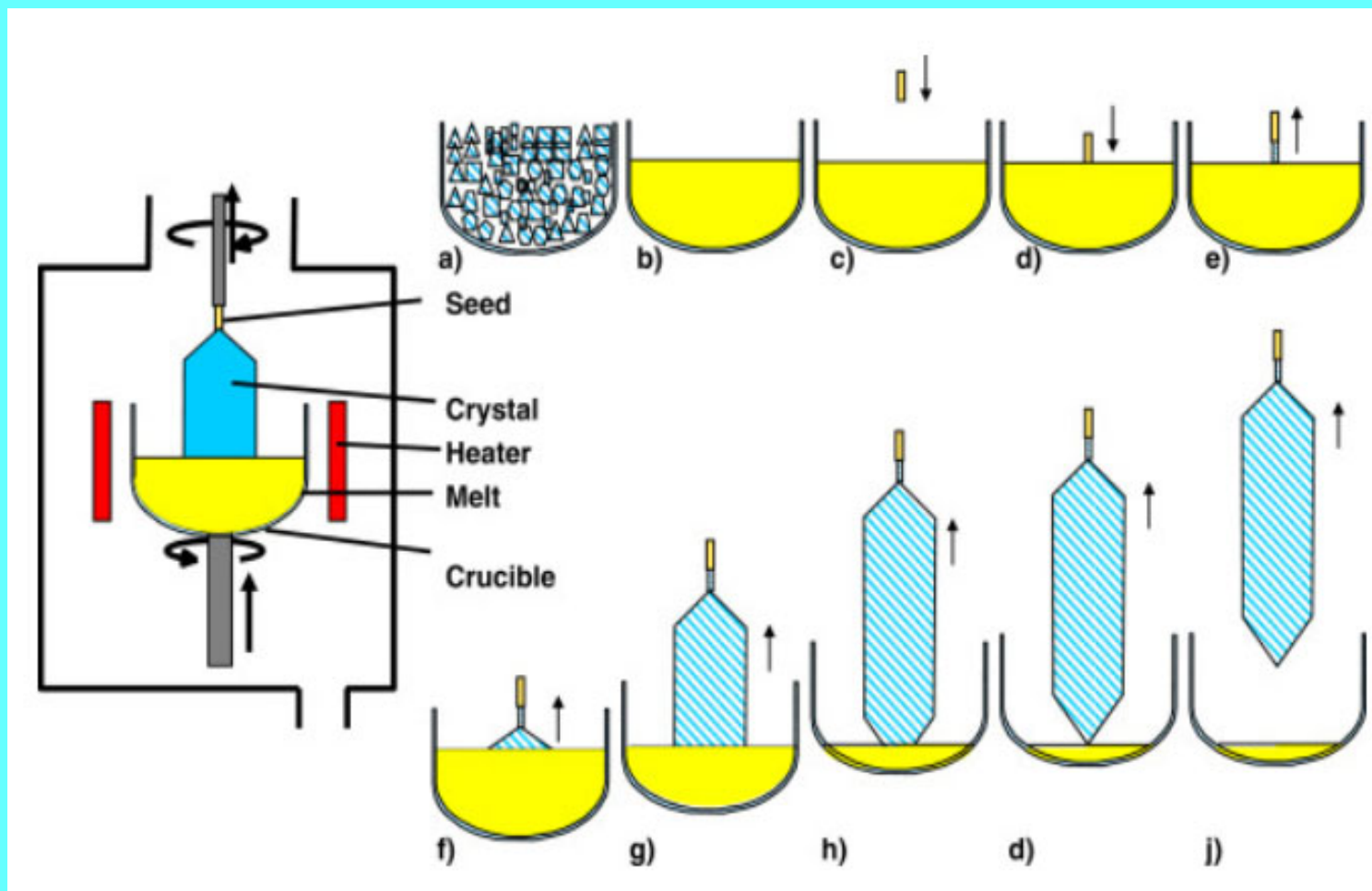
John Bardeen  
Walter Brattain  
William Shockley  
1947

## Nobel prizes

1956	Bardeen, Brattain, Schockley	1 <sup>st</sup> point contact transistor, then BJT
1973	Esaki, Giaver	Tunnel diode
1985	von Klitzing	quantized Hall effect
2000	Alferov, Kroemer, Kilby	semiconductor laser, microchip (IC)
2007	Fert, Grünberg	GMR, giant magnetoresistance
2009	Boyle, Smith	CCD sensor
2010	Geim, Novoselov	graphene
2014	Akasaki, Amano, Nakamura	blue LED, GaN

# Szilícium kristály növesztése: *Czochralski* módszer

1500 Celsiuson Si olvadék  
„forgatva húzás”



Ára: 4000 USD/kg (arany: 2000 USD/kg)

# IC készítés, litográfia

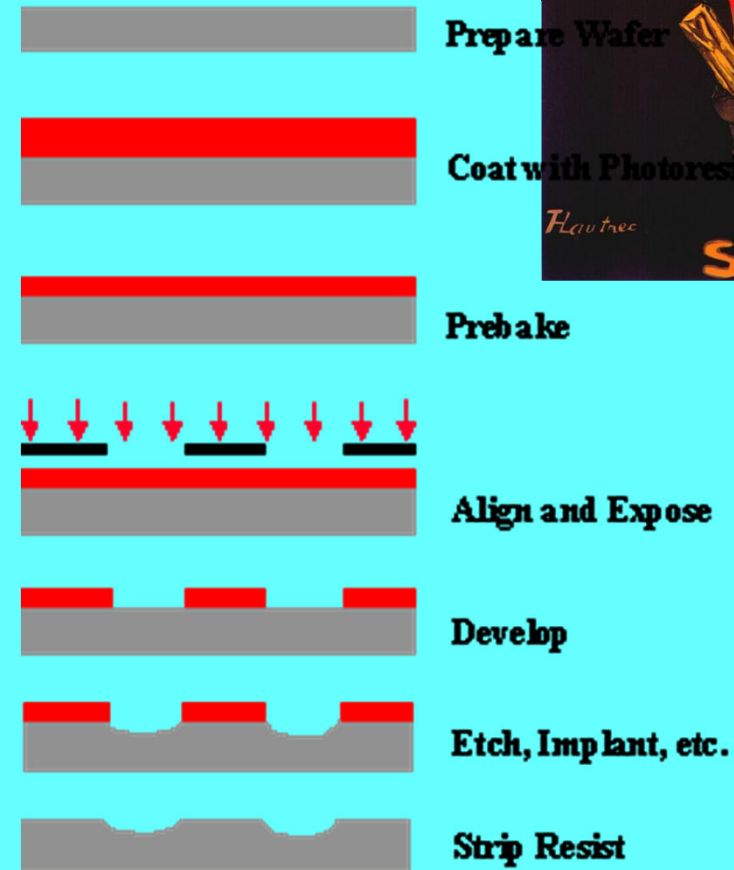
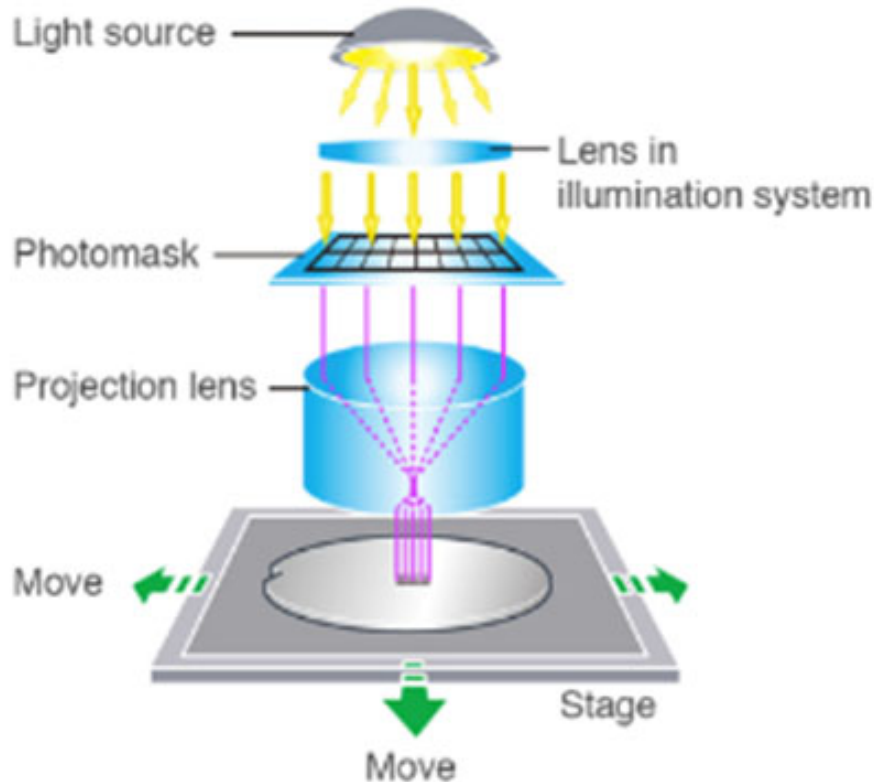
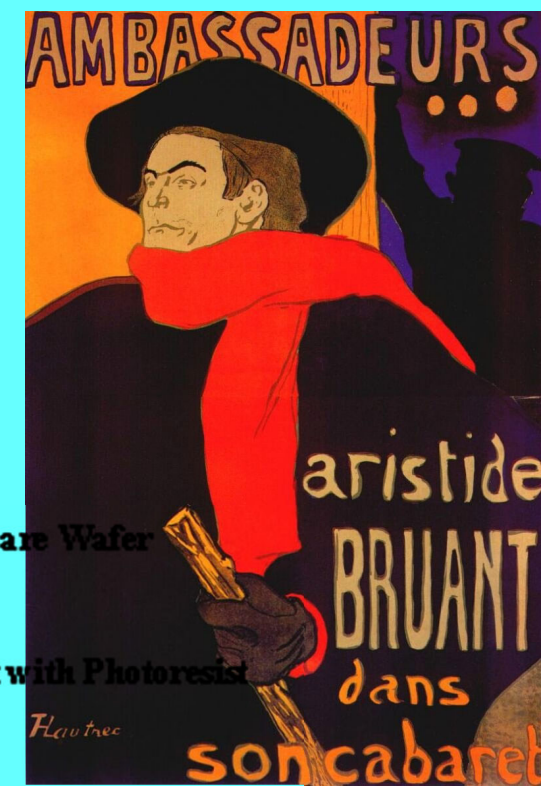


LITHOGRAPHY

Görög: kő+írás

Rézkarca: réz+viasz megkarcolva, savval marva

*A modern félvezetőipar ezt az évszázados technikát használja!*

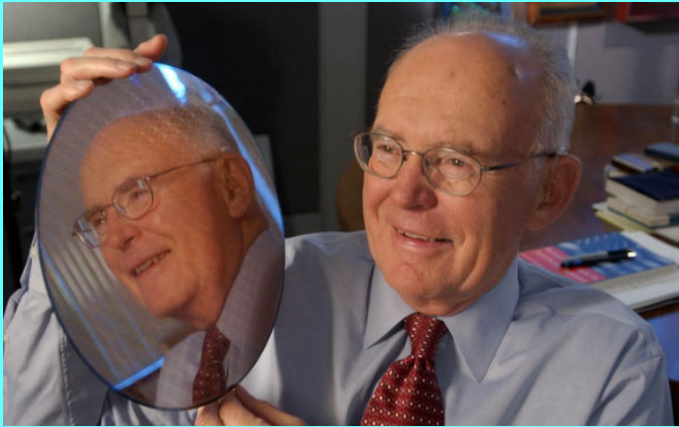


<https://www.lithoguru.com/>

# A Moore törvény(ek)

Gordon E. Moore (1929-2023), megfigyelés 1965: A tranzisztorok száma másfél évente duplázódik (később 1975: kétévente)

*A megfigyelés megdöbbentő, hiszen exponenciális növekedést vetít előre!*



## Exponenciális növekedés

Példák: „rizsszemek a sakktáblán és a császár”  $2^{63}$



Szent István, a „jó bankár”

1000 évre, 1 forintot betesz 5 %-os kamatra



$10^{19}$  darab

100 MRd tonna rizs

**$1.05^{1000} = 1.5 \cdot 10^{21}$  Ft, azaz kb.  $5 \cdot 10^{18}$  USD**

**Föld teljes értékének kb. 100 szorosa**

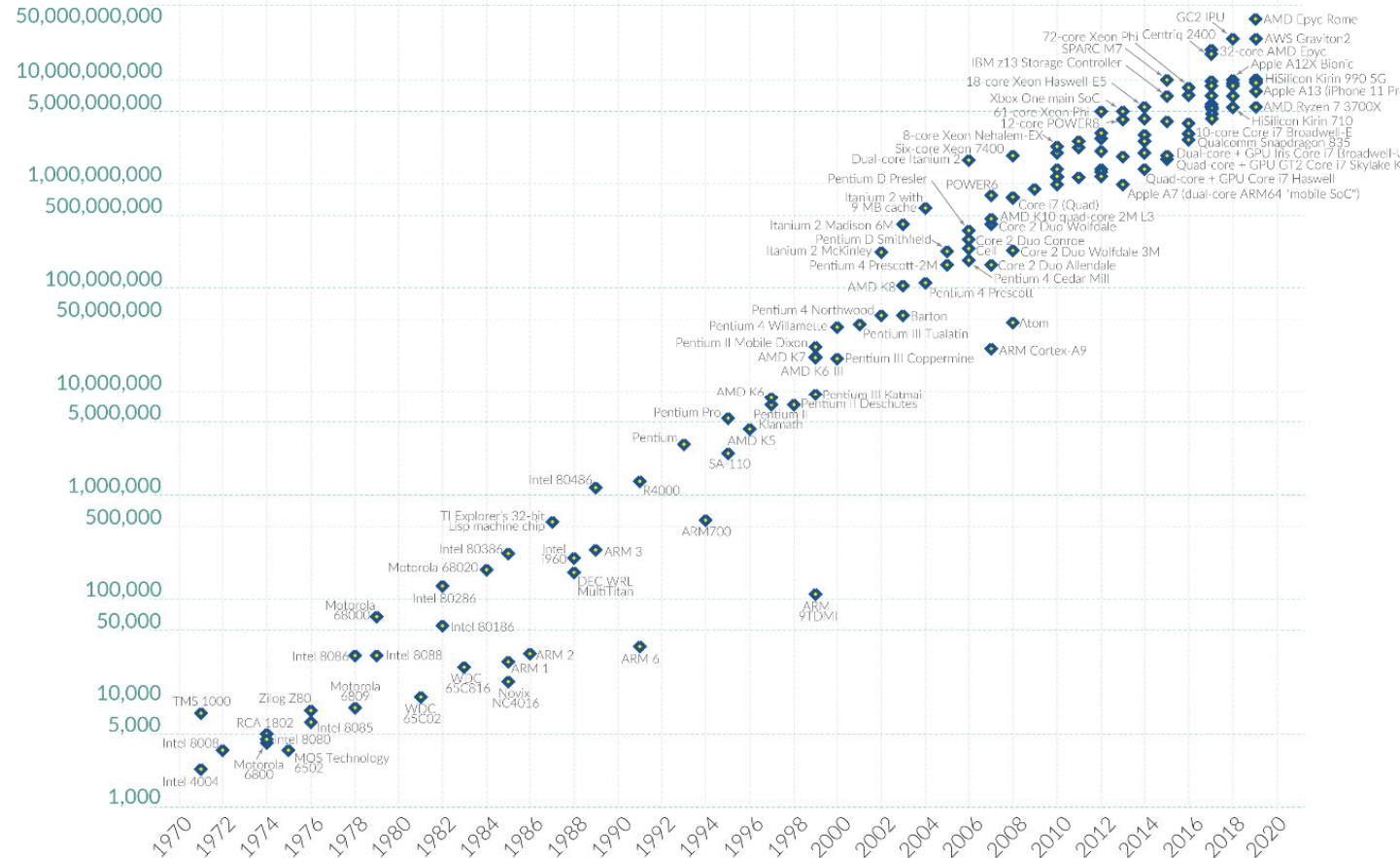
# A Moore törvény

## Moore's Law: The number of transistors on microchips doubles every two years

Moore's law describes the empirical regularity that the number of transistors on integrated circuits doubles approximately every two years. This advancement is important for other aspects of technological progress in computing – such as processing speed or the price of computers.

Our World  
in Data

### Transistor count



Data source: Wikipedia (wikipedia.org/wiki/Transistor\_count) Year in which the microchip was first introduced  
OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world's largest problems. Licensed under CC-BY by the authors Hannah Ritchie and Max Roser.

SF 1988 C64: 50 000 tranz.  
(1 micron, 1 MHz)

SF 2023 Samsung A54:  
5 000 000 000  
(5 nm, 2.5 GHz)

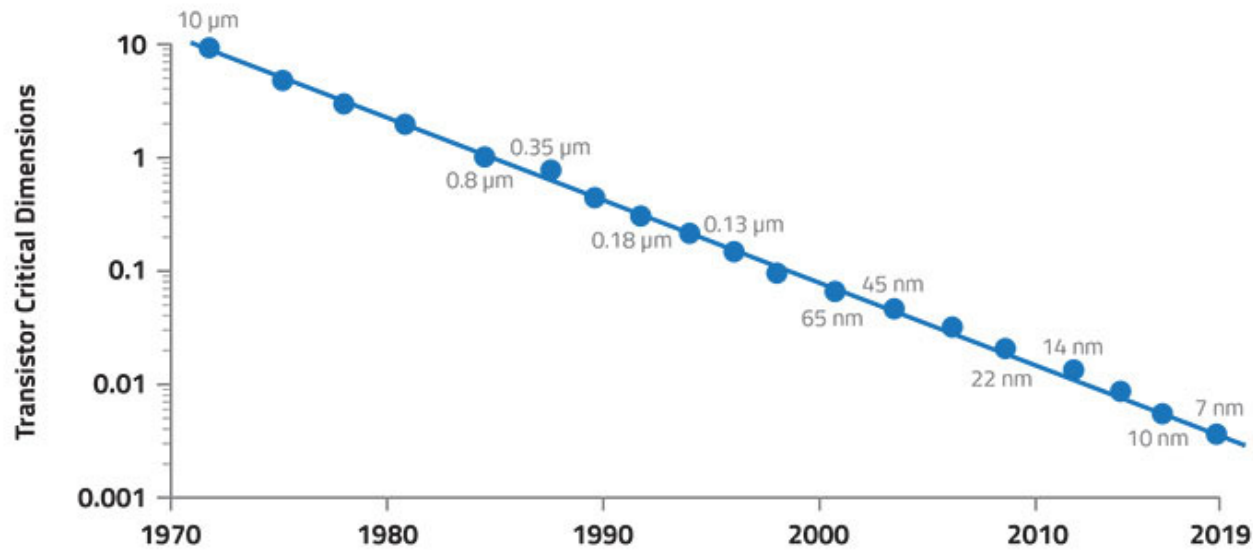
iPhone 17:  
19 MRd tranzisztor  
3 nm

**log<sub>2</sub> 100 000 = 17**  
**Eltelt 35 év, *stimmel***  
**Moore-törvénnel!**

# Önbeteljesítő jóslattá vált!

*Ezért nevezhetünk egy kísérleti megfigyelést törvénynek*

# A Moore törvény(ek)



## Power up —

From space landings  
to supercomputers  
to smartphones

Apollo 11  
Guidance Computer



12,250 FLOPS\*

CRAY-2  
1980s Supercomputer



1.9 billion FLOPS\*

Approximately  
155,000 times faster  
than the Apollo 11  
guidance computer

Apple iPhone 12  
Smartphone



11 trillion FLOPS\*

Approximately 5,000 times faster  
than the CRAY-2 supercomputer  
and about 900 million times  
faster than the Apollo 11  
guidance computer.

FLOPS: floating point operations per second

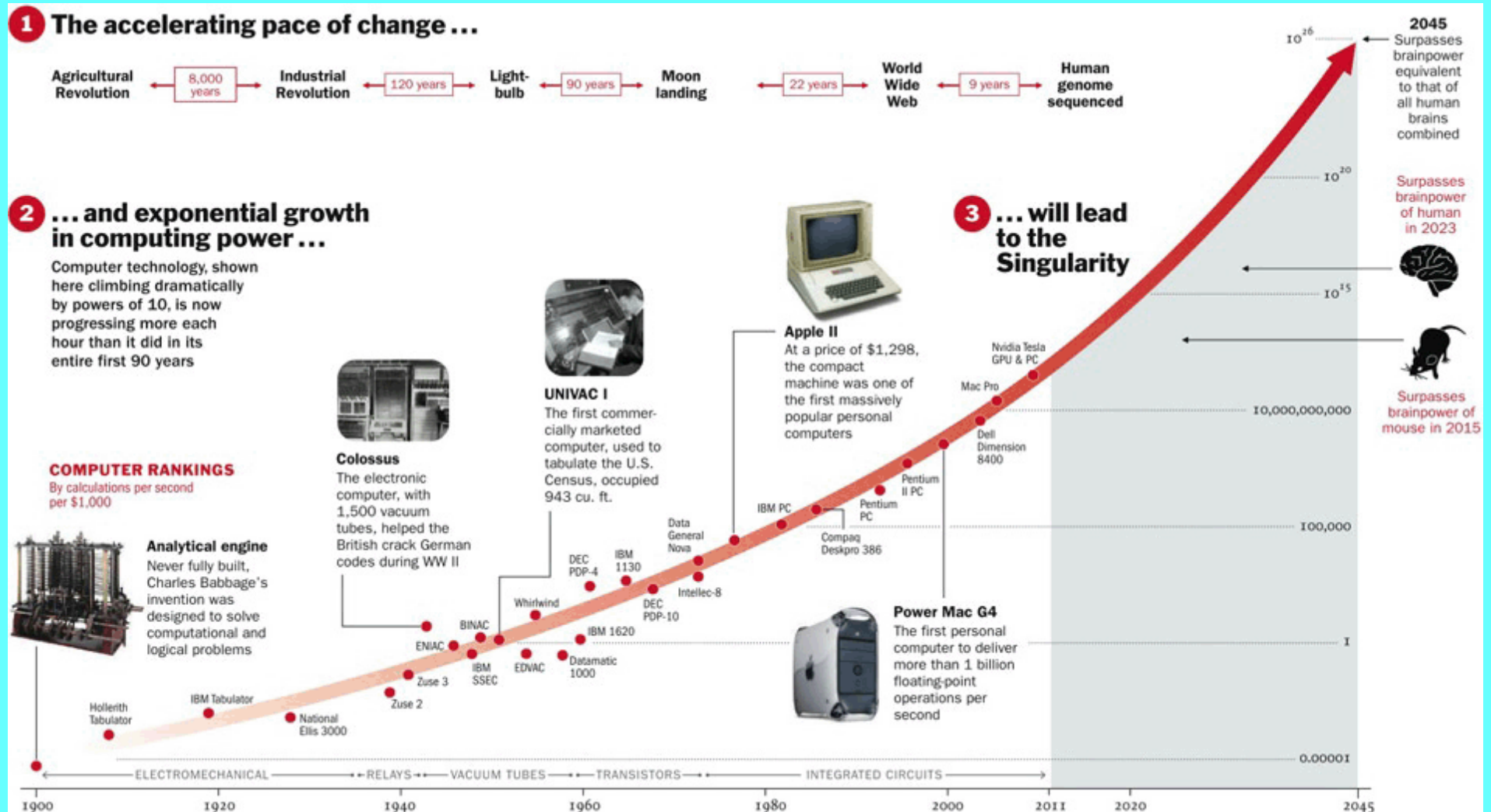
- Csíkszélesség
- Számítási kapacitás
- Telj. sűrűség per felület
- Tárolási kapacitás
- Internet sebesség
- Napelem költsége (75 %/10 év)

Mennyi a 10 nm?

1 m-hez viszonyítva:

mint 1 m vs Föld átmérője

# A Moore törvény(ek)

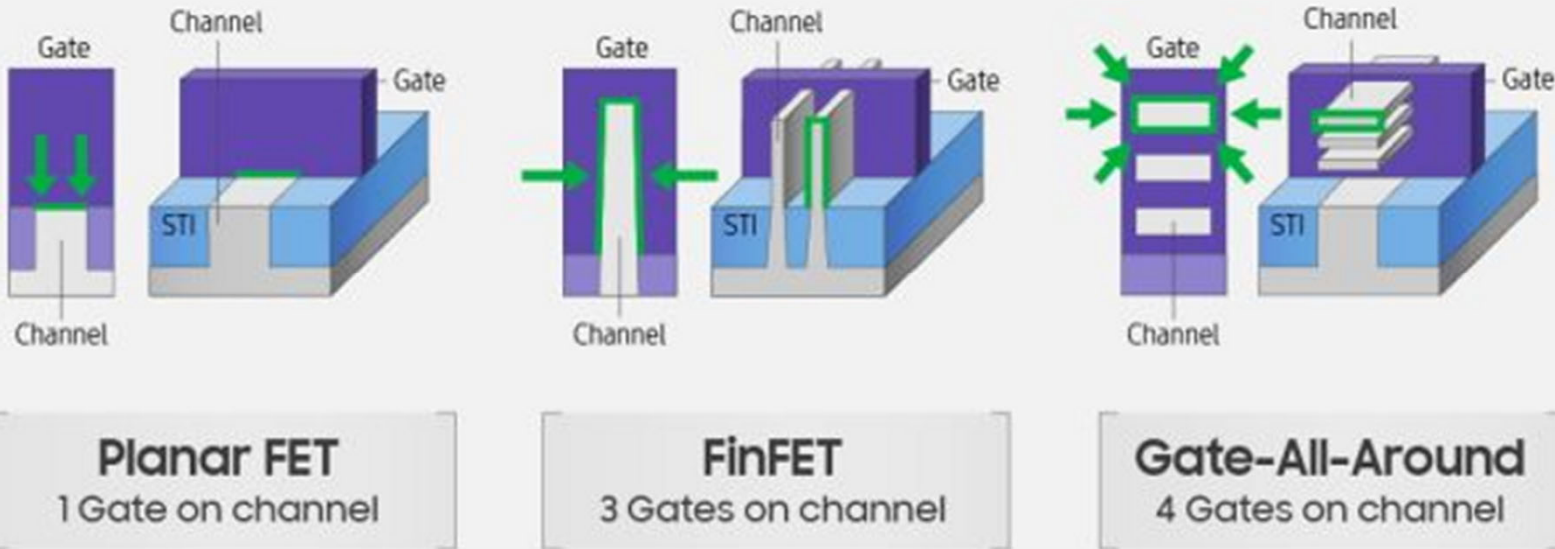


<https://humansworld.files.wordpress.com/2014/01/moores-law-graph-gif.png>

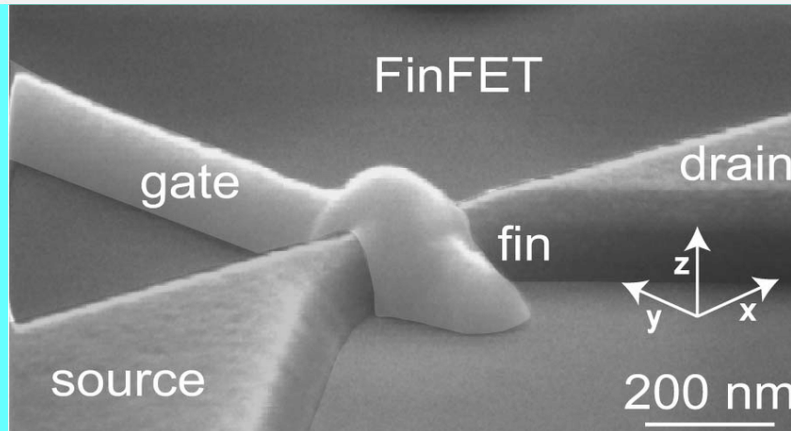
*A számítási kapacitás is exponenciálisan nő. Egy mai mobil 1 milliárdszor gyorsabb mint az a számítógép ami a holdraszállást irányította. Mindig azt hitték a Moore törvény már nem tartható, de mindig meg tudott a technológia újulni.*



# A Moore törvény vége vagy mégsem? More Moore



Planar FET probléma:  
Szivárgó áramok  
Homogén vs. tűszerű tér  
*Megoldás: FinFET*  
*Fin: „uszony”*



FinFet 3 nm

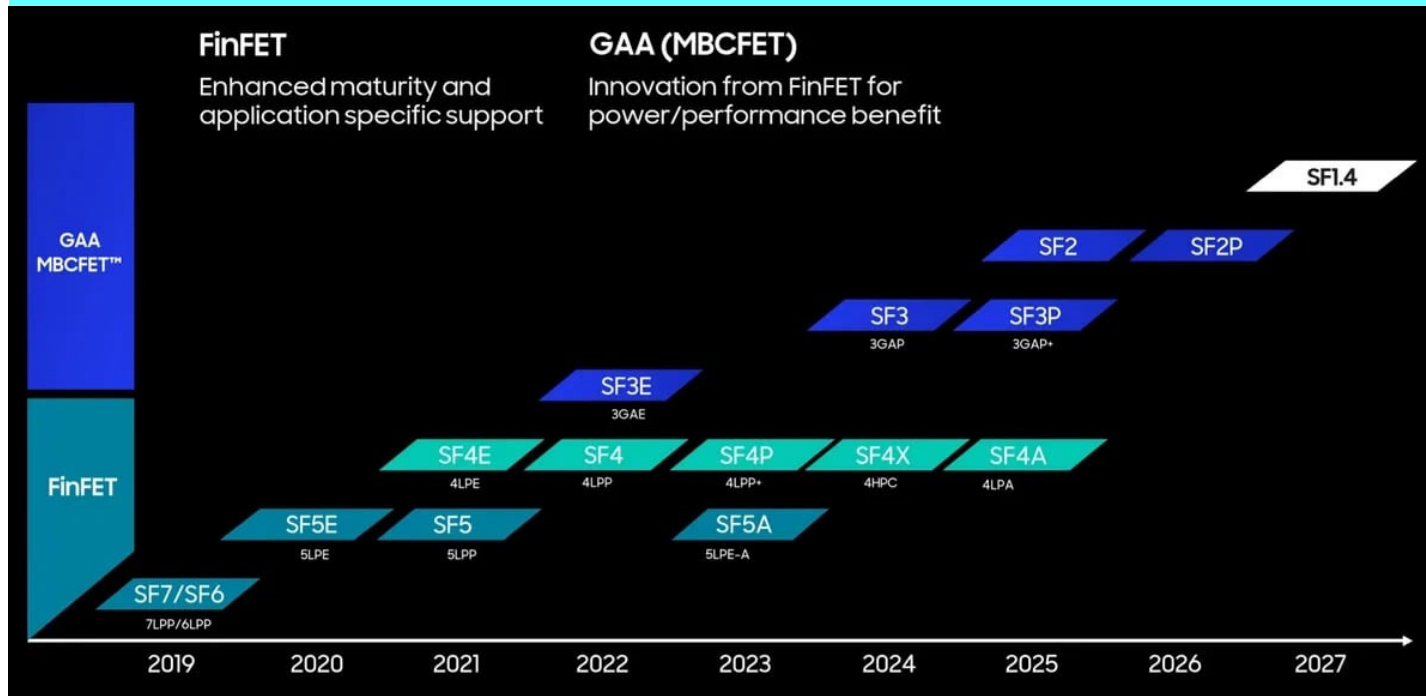
labor prototípus: 1999

ipari prototípus: 2006

kereskedelemben: 2022

*A technológiai megújulás tette lehetővé a Moore-törvény lekövetését*

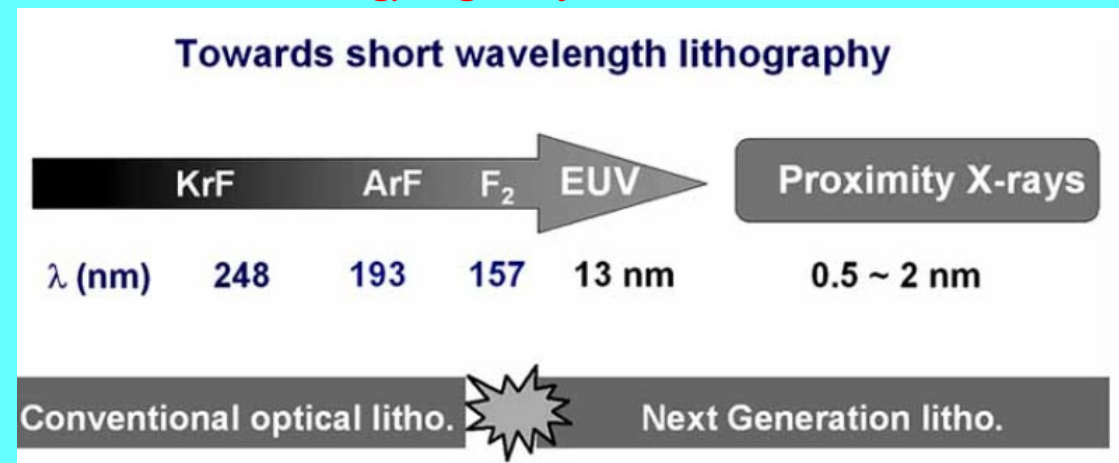
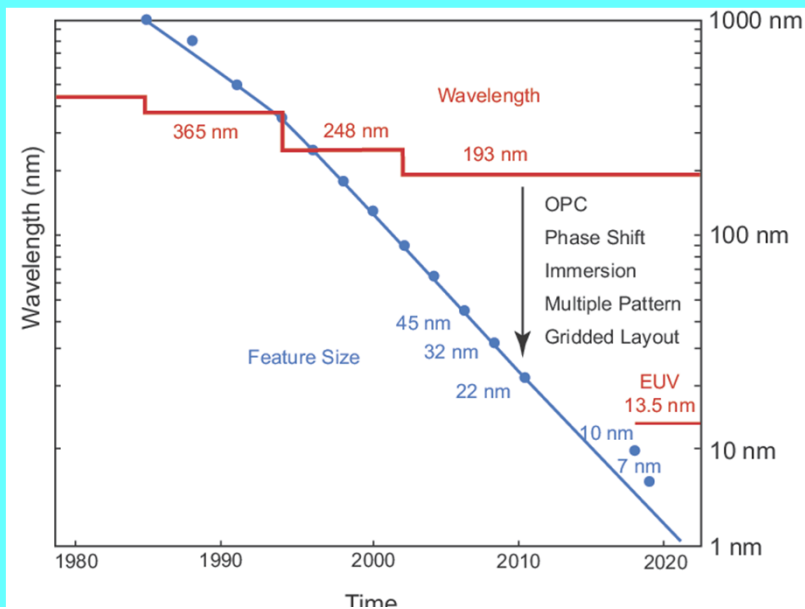
# A Moore törvény vége vagy mégsem? More Moore



*Az iparban mindig megvan az utiterv a következő 10 évre.*

<https://www.sammobile.com/news/samsung-1-4nm-chips-manufacturing-2027-2nm-chips-2025/>

*Az Abbé-limit (diffrakciós limit): legkisebb méret a hullámhossz nagyságrendje*

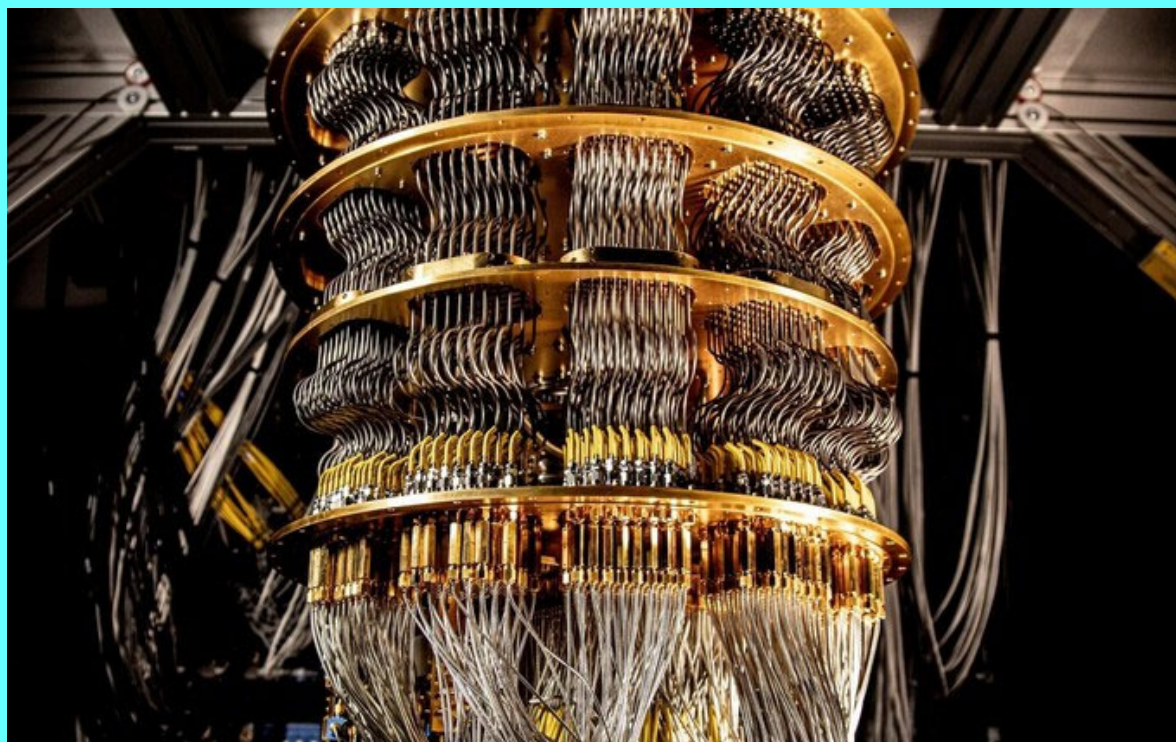


[WR Timeg ere }ekeg](#)

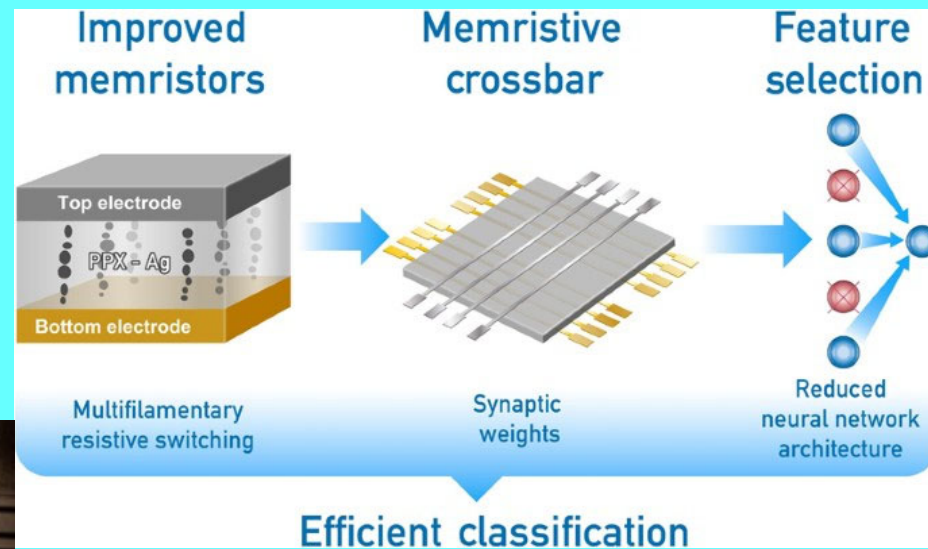
# A jövő: „More than Moore”

Új architektúrák:

- Memriszorok (neurális hálók szimulációja)
- Kvantum technológia (párhuzamosítás)
- Spintronika (újfajta információtárolás)
- Mélyebben integrált eszközök



The Google quantum computer



<https://link.springer.com/article/10.1007/s12274-022-5027-6>

BME TTK:

- Fizika BSc
- Fizikus-mérnök BSc (angolul)