

NANO



MIKRO- ÉS NANOTECHNIKA II

Dr. Pődör Bálint

Óbudai Egyetem KVK Mikroelektronikai és Technológia Intézet

7. ELŐADÁS: NANOELEKTRONIKA I



2012/2013 1. félév

Nem-szerkesztett (ideiglenes) változat!

1

NANORÉSZECSKÉK KÜLÖNLEGES TULAJDONSÁGAI

A nanovilág különbözik az eddigiektől.

A hétköznapi méretű anyagban megszokott fizikai tulajdonságok lényegesen megváltoznak. A tulajdonságok méretfüggőek lesznek. Ez már a kvantumfizika világa.

A nanotartomány részecskéi tehát bár összetevő atomjaik azonosak, a makrorészecskékhez képest egészen új tulajdonságokkal rendelkeznek.

A meghatározó méretskála: De Broglie hullámhossz:

$$\lambda = h/p$$

h – Planck állandó ($6,6 \times 10^{-34}$ VAs²)
 p = mv – impulzus

2

NANOELEKTRONIKA

A **nanoelektronika** az elektronikának az a területe, ahol az eszközöknek legalább egy jellemző mérete 100 nanométer alá esik. Ez a jellemző méret lehet a tervezési szabály (*design rule*) mérete is. Az eszközök mind molekuláris elektronikai módszerekkel, mind a ma használatos félvezető technológiai eljárásokkal előállíthatóak.

A nanoelektronika fogalmát széles körűen értelmezzük, azaz beleértjük a mikroelektronikai áramkörök méretcsökkenése révén létrejövő, méretük folytán már a nanovilágba tartozó tervezési szabály szerint elkészített integrált áramköröket (IC) és a valódi, kvantumjelenségeken alapuló, áramköri struktúrákat is. Ez utóbbiak azért tekinthetők struktúráknak, mert lényegében csak az optoelektronika terén beszélhetünk kereskedelmi forgalomban is lévő félvezető eszközökről.

3

NANOELEKTRONIKA

A széles értelemben vett nanoelektronikai áramkörök alapvetően ma még a mikroelektronikai áramkörök méretcsökkenésével jönnek létre, alapvetően CMOS-típusúak és szilíciumalapúak, a dielektrikumot illetően széleskörű keresés folyik, hogy a SiO_2 3,9-es dielektromos állandójánál kisebb értékkel rendelkező anyagot találjanak, amely illeszkedik a fémezéshez is, ahol a fémezés terén is le kell cserélni a jól bevált alumínium fémezést, ezt rézzel, illetve rézalapú ötvözetekkel helyettesítik, azaz az epitaxiális szilícium alapanyagként megmaradni látszik, de lényeges a szűkebb értelemben vett kvantumhatásokon alapuló, és leggyakrabban a nanoelektronika másik nyersanyagaként számon tartott nanocső, ebből lényegében mindenki az egyfalú szén nanocsövet részesíti előnyben, amelynek felhasználásával az elemi áramkör-készlet megvalósítható.

4

A MIKROELEKTRONIKA KEZDETEI ÉS FEJLŐDÉSE

A mikroelektronikai forradalom és a mikroelektronika mint ipar lényegében azután kezdődött, hogy Bardeen, Brattain, és Shockley 1947-ben egy szilárdtest eszközt fedeztek fel mely helyettesítette majd rövidesen véglegesen kiszorította az elektroncsöveket.

A mikroelektronikai ipar, az 1950-es évekbeli megszületése óta egy a technika történetében azelőtt soha nem látott immár hat évtizede tartó robbanásszerű fejlődést mutatott, melyet talán két meghatározó tényezőre lehet visszavezetni.

A planáris integrált áramkör és technológia felfedezése (Noyce, Fairchild és Kilby, Texas Instruments).

és

A szilárdtest (félvezető) eszközök folyamatosan tartó méretcsökkenéséből adódó előnyök messzemenő kihasználása és érvényesítése.

A TRANZISZTOR ÉS AZ IC

A tranzisztor a 20. századot leginkább meghatározó találmány.

Kétféle tranzisztor elképzelés:

külső térrel vezérelni az elektronok áramát:
térvezérlésű tranzisztor (FET, MOSFET, stb.)

az anyag (félvezető) belsejében létrehozni a „vezérlő elektródát”: bipoláris tranzisztor (BJT)

FET

MOS

BJT

TRANSISTOR

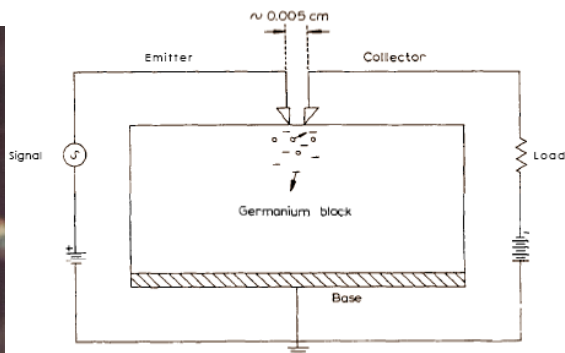
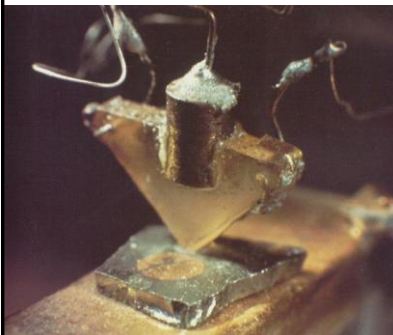
Field Effect Transistor

Metal-Oxide-Semiconductor

Bipolar Junction Trasistor

TRANSfer resISTOR

THE POINT CONTACT TRANSISTOR: THE FIRST SEMICONDUCTOR AMPLIFIER



William Bradford **SHOCKLEY**, John **BARDEEN**, Walter Houser **BRATTAIN**, physics Nobel prize in 1956

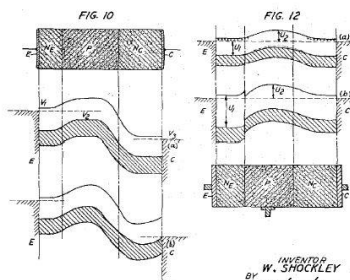
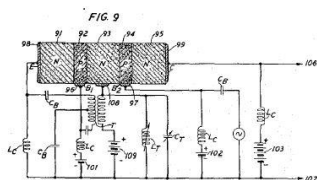
TRANSISTOR

TRANSfer **resISTOR**

7

THE BIPOLAR TRANSISTOR PATENT

Sept. 25, 1951 W. SHOCKLEY 2,569,347
CIRCUIT ELEMENT UTILIZING SEMICONDUCTIVE MATERIAL
Filed June 26, 1948 3 Sheets-Sheet 2



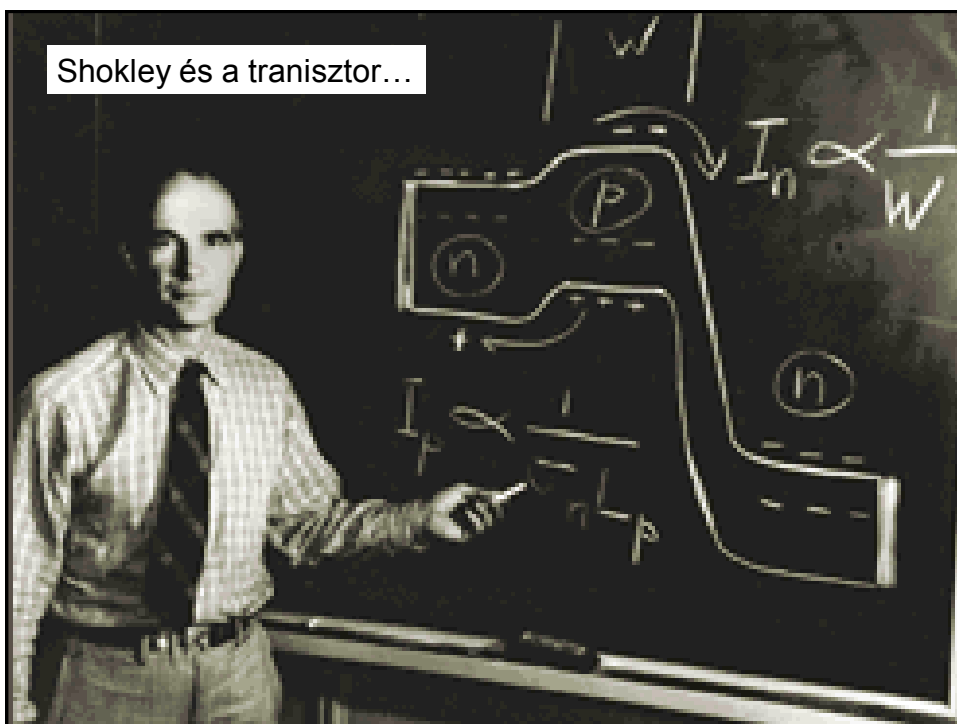
INVENTOR
W. SHOCKLEY
BY *[Signature]*
ATTORNEY

A page from the original patent
by W. Shockley:

**CIRCUIT ELEMENT
UTILIZING SEMICONDUCTOR
MATERIAL**

Filed: June 26, 1948
Published: Sep 25, 1951,
2569347

A Shockley-féle szabadalmi bejelentés egy ábrája, a tranzisztor sávdiaagrammja. Lényegében így és ez látható a mai tankönyvekben is...



INTEGRÁLT ÁRAMKÖR

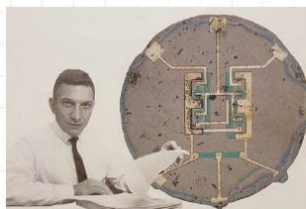
Első germánium
integrált áramkör

Jack St.Clair Kilby 1958 (TI)



Első szilícium
integrált áramkör

Robert Noyce 1959 (Fairchild)



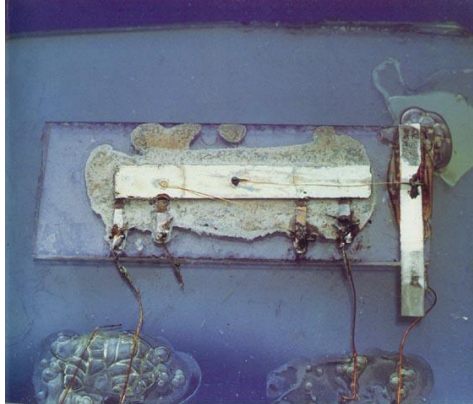
Kilby: Fizikai Nobel díj 2000

The Nobel Prize in Physics 2000:

"for basic work on information and communication technology"

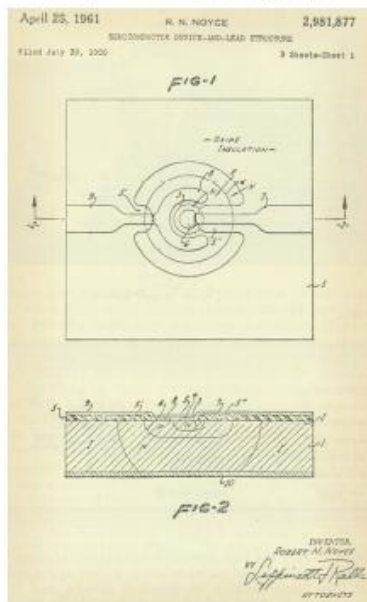
"for his part in the invention of the integrated circuit"

1958: INTEGRATED CIRCUIT



1958: first integrated circuit (Ge) Jack Kilby, Texas Instruments
Physics Nobel Prize 2000 (shared with Zhores I. Alferov and H. Kroemer)

1960: THE Si IC PATENT (FAIRCHILD)

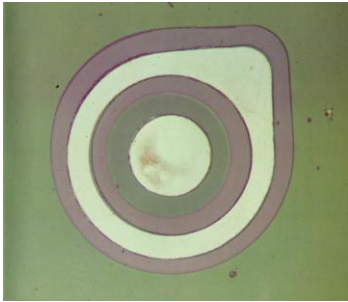


A page from the original patent
by R. Noyce:

**SEMICONDUCTOR DEVICE-
AND-LEAD STRUCTURE**

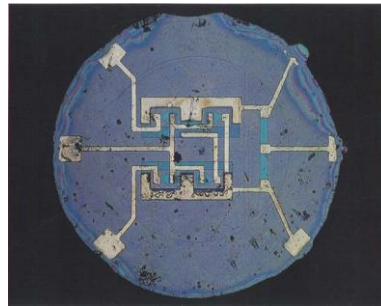
Filed: July 27, 1960
Published: April 25, 1961,
2981877

Si INTEGRATED CIRCUIT



1959: planar process
Jean Hoerni and Robert Noyce

1961: first commercial planar IC
(two transistors in a flip-flop circuit)
Fairchild



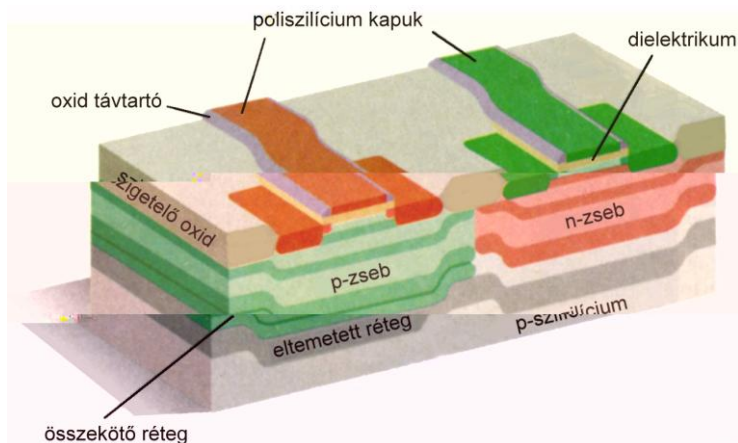
THE MOSFET AND CMOS INTEGRATED CIRCUITS: RELEVANCE

The [Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect-Transistor](#) (MOSFET) is the prevailing device in microprocessors and memory circuits.

The MOSFET's advantages over other types of devices are its (i) mature fabrication technology, (ii) its successful scaling characteristics and (iii) complementary MOSFETs yielding CMOS circuits.

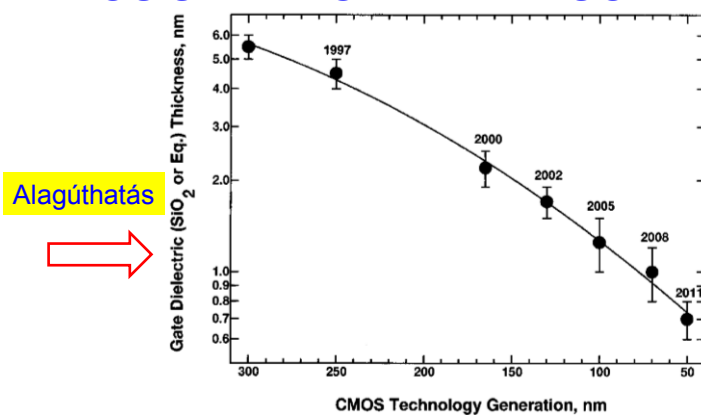
The fabrication process of silicon devices has evolved over the last 30 years into a mature, reproducible and reliable integrated circuit manufacturing technology.

COMPLEMENTARY MOS, CMOS



A mai (és holnapi?) Si technológia alapeszköze, vezérlőelektróda hossza < 40-50 nm, és kb. kétfévente tovább feleződik. Az elektronok deBroglie hullámhossza Si-ban kb. 12 nm!

MOS SCALING: MÉRETCSÖKKENÉS

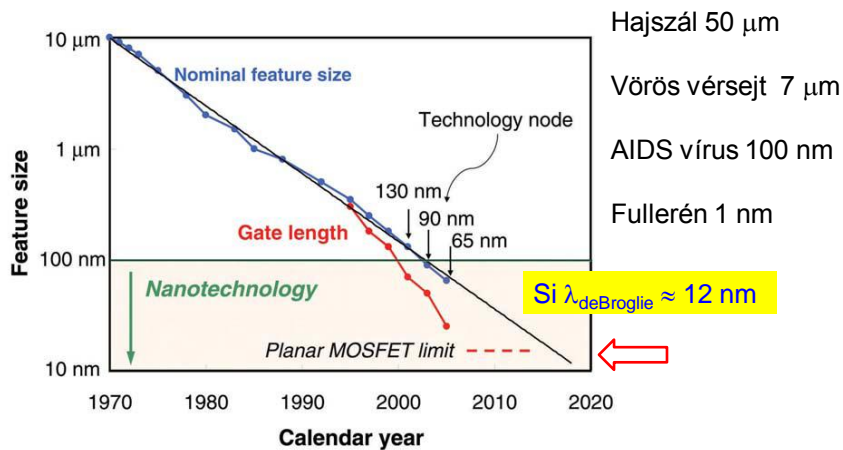


Decrease in gate SiO_2 thickness with device scaling (technology generation). Actual or expected year of implementation of each technology generation is indicated

Fizikai határok: 0,07 μm → 30 Si atom, MOS csatornában egyszerre ~30 elektron

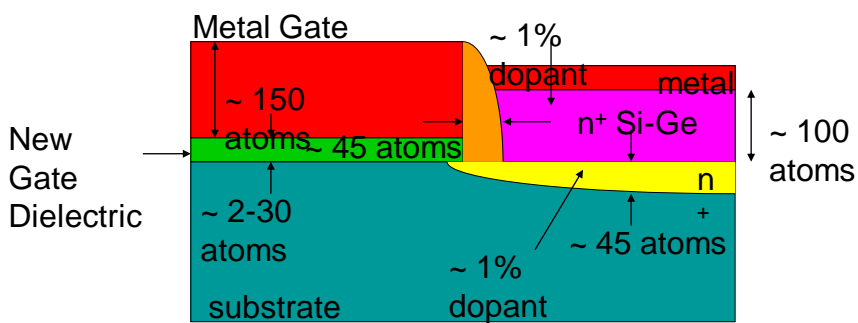
1-2 nm SiO_2 vastagság: egyre erősebben fellép a kvantummechanikai alagúthatás

SI TECHNOLOGIA: MÉRETEK CSÖKKENÉSE



Logic technology node and transistor gate length versus calendar year.
 Note mainstream Si technology is nanotechnology.

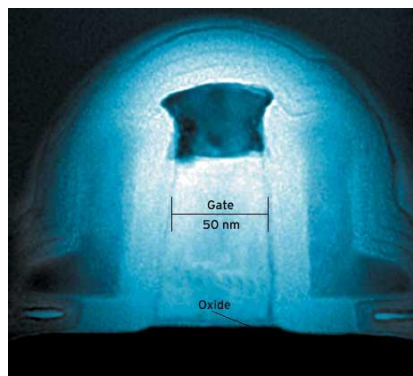
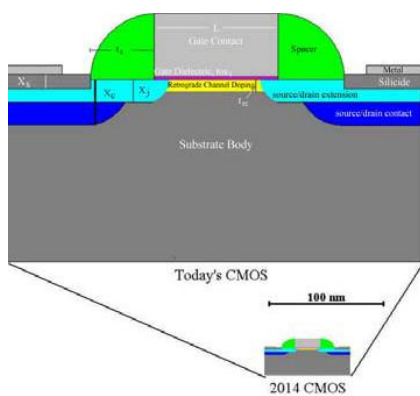
Si MIKRO- ÉS NANOELEKTRONIKA



S/D Contact
 Advanced CMOS Contact Structure at 50 nm

Si NANOELEKTRONIKA

Hol áll az ipar ma, és mi várható a közeljövőben?



CMOS ma (tegnap?): INTEL

19

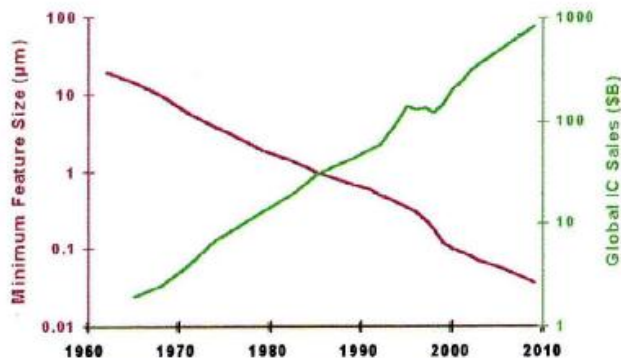
MOORE'S LAW

Gordon Moore made his famous observation in 1965, just four years after the first planar integrated circuit was discovered. In his original paper Moore predicted that the number of transistors per integrated circuit would double every 18 months.

He forecast that this trend would continue through 1975. Moore's Law has been maintained for far longer, it has become a universal law of the entire semiconductor industry. It still holds true as we enter the new century.

Moore's law is about human ingenuity not physics

MOORE SZABÁLY



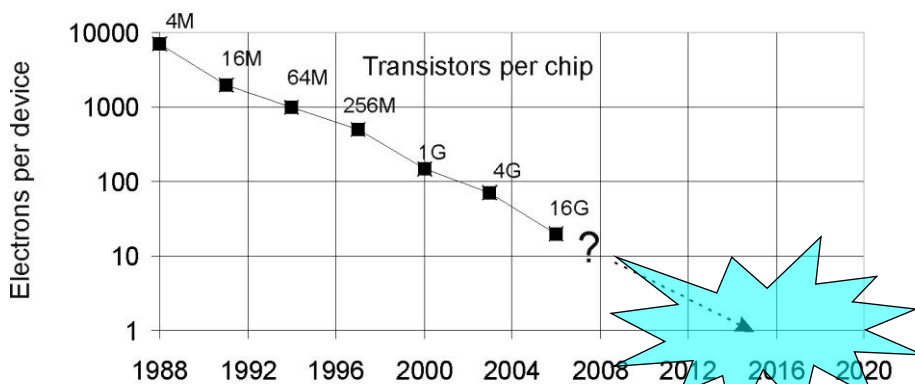
G. Moore (Fairchild/Intel) 1960-as években fogalmazta meg de még 2006-ban is működik (!):
90/130 nm csomópont

Jellemző méretek 1,8-2 évente feleződnek

21

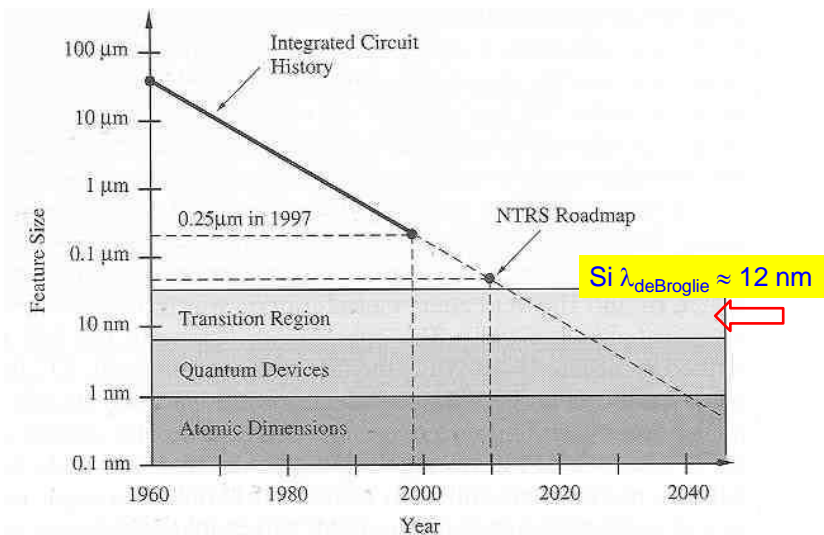
A KVANTUM HATÁR FELÉ

Méretcsökkenés \Rightarrow nanoszerkezetek \Rightarrow kvantumos hatások

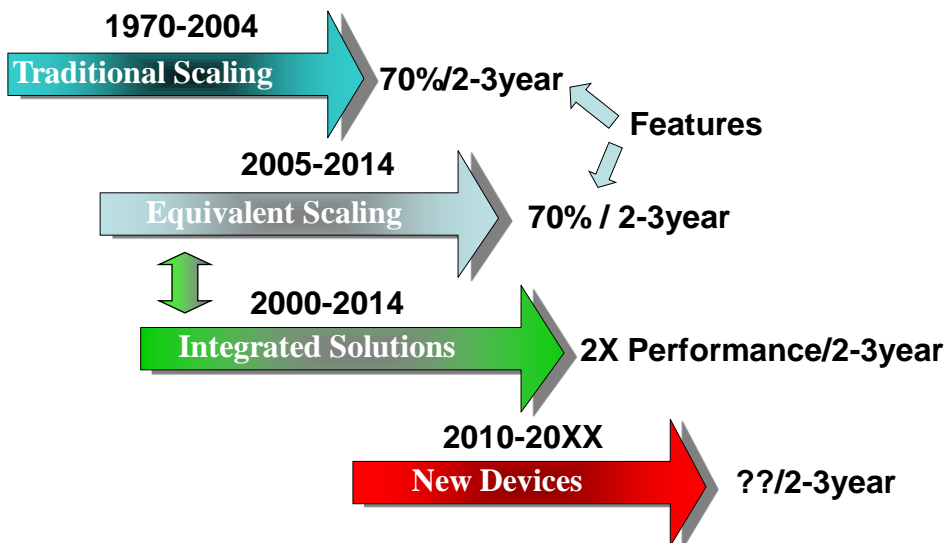


Kvantum technológia²²

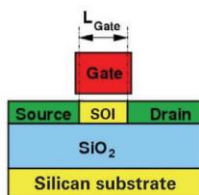
MOS VLSI TRENDS



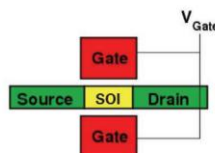
CMOS Future Directions and Beyond



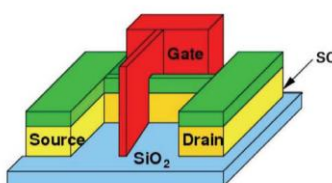
CMOS A NANOTARTOMÁNYBAN



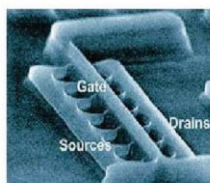
a. Ultrathin body SOI MOSFET



b. Double-gate MOSFET



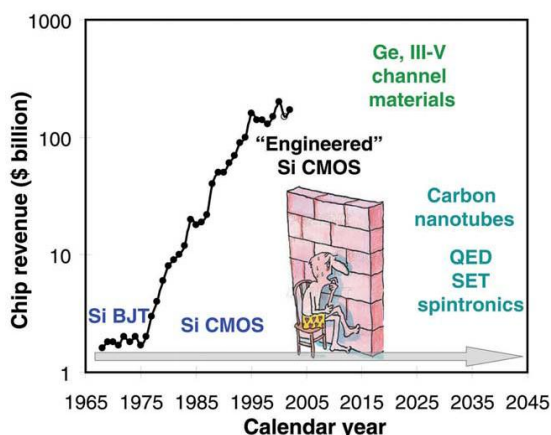
c. Double gate on Si Fin



d. Multigate transistor on multiple fins

Emerging alternative fully depleted CMOS structures for continued scaling: (a) one-, (b, c) two-, and (d) three-gate fully depleted devices.

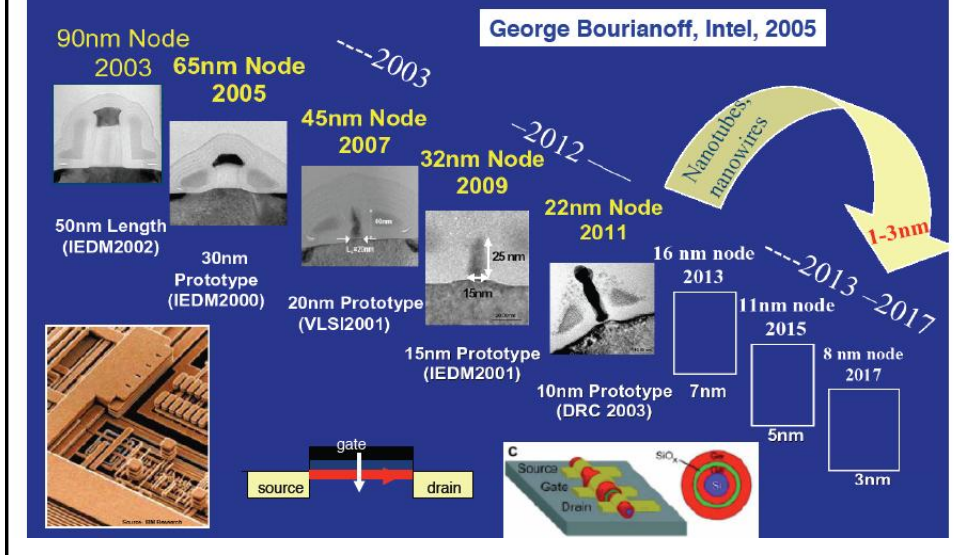
SI TECHNOLÓGIA MEGÚJULÁSA: NANO- ÉS KVANTUMOS ESZKÖZÖK



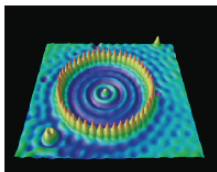
Si technology industry time line showing semiconductor revenue and the evolution of new devices and possible time frame for new device types (BJT – bipolar junction transistor, QED – quantum electronic device, and SET – single electron transistor).

NANOTECHNOLÓGIA SZEREPE

Nanotechnology will extend CMOS scaling

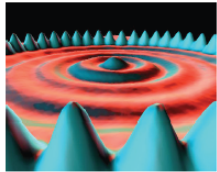


KVANTUMJELENSÉGEK: ELEKTRONOK HULLÁMTERMÉSZETE



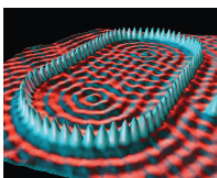
Quantum corral
Fe-atom pallsade on Cu metal surface
STM-fabricated. Lutz, Eigler, Crommie, IBM, 1993

deBroglie wave length for a free particle,



$$\lambda = h/p = h/mv = h/\sqrt{(2mE)}; \quad h = \text{Planck's const.} \\ (\text{cf. photons: } E=h 2\pi f)$$

Electron diffraction demonstrated by
Davidson and Germer 1923



At the Fermi level, $E = E_F$:
→ Interference of electron waves at the Fermi level
→ **This is a hallmark of Quantum Effects in solids**

ELEKTRONOK "TERMÍKUS" HULLÁMHOSSZA

Free electrons: $E = p^2/2m = \frac{1}{2} mv^2$; $p = \sqrt{2mE}$

Typical Fermi velocity in metals $v \approx 10^6$ m/s

Typical Fermi velocity in semiconductors $v \approx 10^4$ m/s

Si $\lambda_{\text{deBroglie}} \approx 12$ nm

GaAs $\lambda_{\text{deBroglie}} \approx 26$ nm

Electron wave length (de Broglie): $\lambda = h/p = h/mv = h/\sqrt{2mE}$

In a classical electron gas, the kinetic energy $E \approx k_B T$

→ **Thermal wavelength:** $\lambda = h/p = h/\sqrt{2mE} = h/\sqrt{2mk_B T}$

$$h = 6.62 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$$

$$m = 9.1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

$$k_B = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2 \text{ kg s}^{-2} \text{ K}^{-1}$$

$$\lambda_{\text{Th}} = 1.32 \cdot 10^{-7} / \sqrt{T} \text{ (m)} = 132 / \sqrt{T} \text{ (nm)}$$

$T = 10$ mK (0.01K) → $\lambda_{\text{Th}} \approx 1.32 \cdot 10^{-6} \approx 1.32 \mu\text{m}$

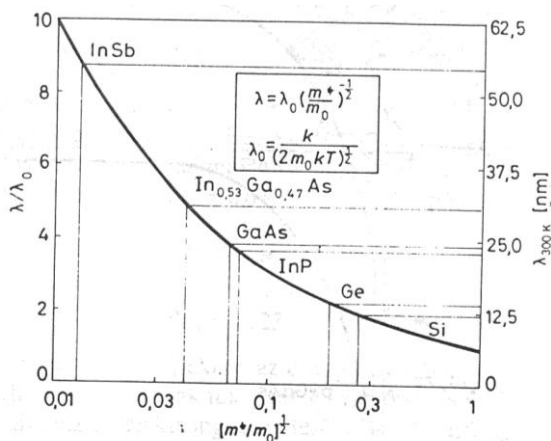
$T = 300$ K → $\lambda_{\text{Th}} \approx 7.6$ nm

$T = 10000$ K → $\lambda_{\text{Th}} \approx 1.32 \cdot 10^{-10} \text{ m} = 0.132 \text{ nm} \approx 1 \text{ \AA}$ (electrons at E_F in metal)

Classical gas → quantum gas: $\lambda_{\text{Th}} \approx$ average distance between particles

29

MÉRETKVANTÁLÁS FÉLVEZETŐBEN

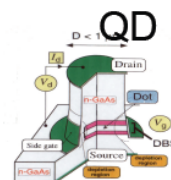


4.4. ábra. A de Broglie-hullámhossz (λ) függése a töltéshordozók (elektronok vagy lyukak) effektív tömegétől (m^*). A bal oldali skála a λ/λ_0 -t, a jobb oldali skála pedig λ szobahőmérsékleten felvett értékeit mutatja

KVANTUMOS HATÁSOK

Everything about solids (metals, semiconductors, insulators) is quantum, in principle!

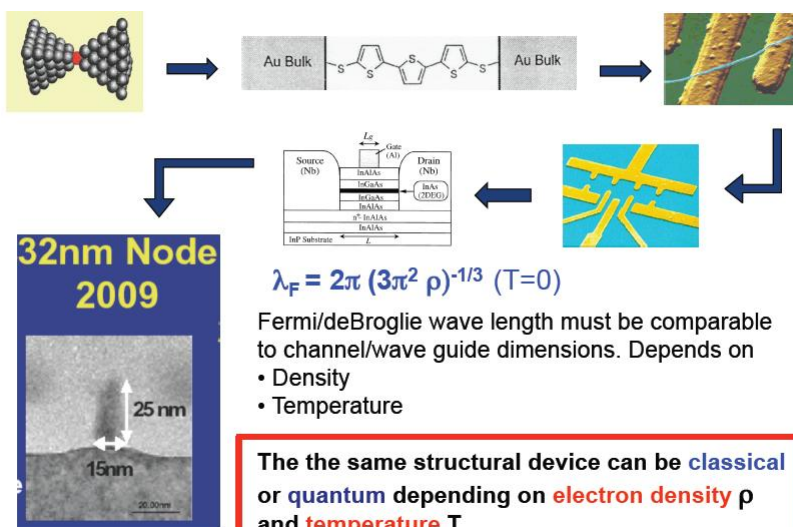
- Particles have a de Broglie wave length $\lambda = h/p$
- Solids have band structure due to electron diffraction by the lattice
- The Fermi wave length is of decisive importance
- **Electronic circuits (e.g. LC oscillator) can be quantized at very low temperatures**
- **Mechanical oscillators can be quantized at very low temperatures**
- Quantum dots (QD), quantum wells, quantum wires can be quantized at **room temperatures**



Low temperatures $\ll 1$ K (typically 10-100 mK)

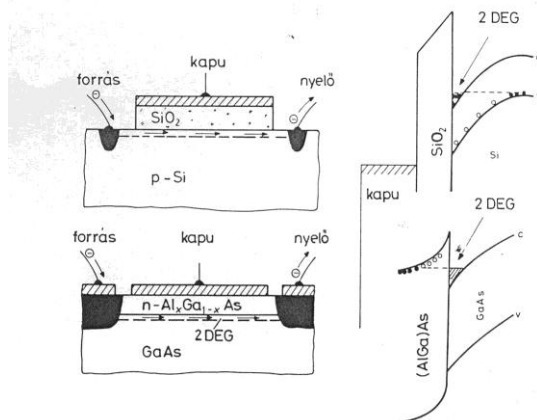
The reason for quantum effects NOT showing up in the today's smallest transistors is the high (room) temperature

KLASSZIKUS ILLETVE KVANTUMOS VISELKEDÉS



32

KÉT-DIMENZIÓS ELEKTRONGÁZ: N-MOSFET ÉS HEMT SZERKEZET



Kvázi-háromszög alakú potenciálgödör kialakulása SiO_2/Si határfelületen (Si n-MOSFET), és GaAlAs/GaAs heteroátmenetben (nagy-elektronmozgékonyosságú tranzisztor, high electron mobility transistor, HEMT).

KÉT-DIMENZIÓS ELEKTRONGÁZ: N-MOSFET ÉS HEMT SZERKEZET

Kvázi-háromszög alakú potenciálgödör alakul ki pl. a SiO_2/Si határfelületen (Si n-MOSFET), és GaAlAs/GaAs heteroátmenetben (nagy-elektronmozgékonyosságú tranzisztor, high electron mobility transistor, HEMT). A potenciálgödör alakja (a mélységgel lineárisan változó potenciál meredeksége a vezérlőelektródára adott feszültség által indukált térerősség függvénye).

Mindkét szerkezetben a határfelület mentén (vezető csatorna) az elektrongáz két-dimenziós rendszerként viselkedik, és a potenciálgödör kvantumos energianívóin helyezkedik el.

HÁROMSZÖG ALAKÚ POTENCIÁLGÖDÖR FIZIKÁJA

Energianívök: (F a térerősség, n = 1,2,3,... a kvantumszám)

$$E_n = \left(\frac{\hbar^2}{2m^*} \right)^{1/3} \left(\frac{3}{2} \pi eF \right)^{2/3} \left(n + \frac{3}{4} \right)^{2/3}$$

Kétdimenziós elektrongáz réteg "vastagsága" (függ a térerősségtől illetve a térerősség által indukált elektronkoncentrációtól) a deBroglie hullámhossz nagyságrendjébe esik

néhány nanométer - néhányszor tíz nanométer

KVANTUM GÖDÖR

The properties of a semiconductor are altered by quantum size effects; at least one of the dimensions of material is on the order of De Broglie's wavelength of an electron:

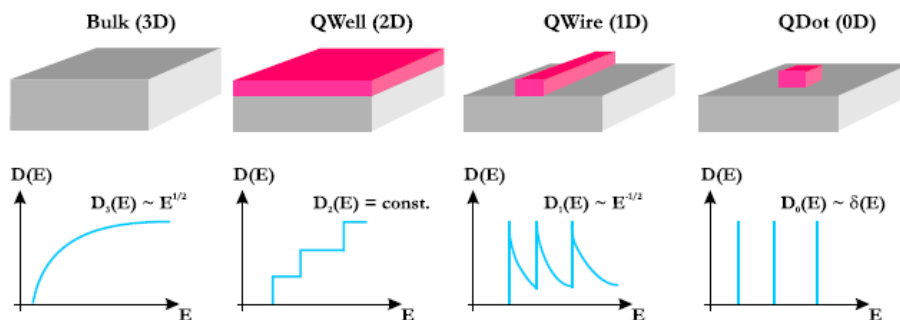
$$\lambda = h/p; \text{ if } p \sim eV \Rightarrow \lambda \sim \text{a few nm};$$

1D confinement: quantum wells; structures consisting of a thin well materials sandwiched between two layers of a barrier materials

2D confinement: quantum wires; structures consisting of a thin and narrow well materials surrounded by barrier materials

3D confinement: quantum dots; nano-size particles in a barrier material. The quantum confinement \Rightarrow allowed electron and hole states are quantized in the well region \Rightarrow energy required to generate $e-h$ pair or radiation emitted from the process of $e-h$ pair recombination is modified \Rightarrow wavelength tuning of the radiation (used in LED or laser)

AÁÁALPOTSÚRÚSÉG: 3D, 2D, 1D, 0D



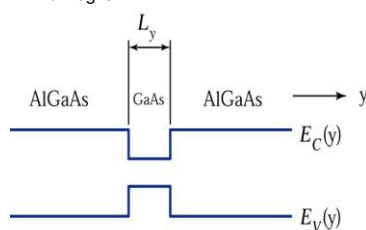
Density of states of the bulk, quantum well, quantum wire, and quantum dot.

(For the general case of n-dimensions see Gombos, Tuza, Pődör, phys. stat. sol. (b) 169 K23 1992)

37

KVANTUM GÖDÖR ENERGIASPEKTRUMA

$L = \text{néhány } 10 \text{ nm}$
 $\text{GaAs } \lambda_{\text{dBroglié}} \approx 26 \text{ nm}$



Végtelen potenciálgödör:

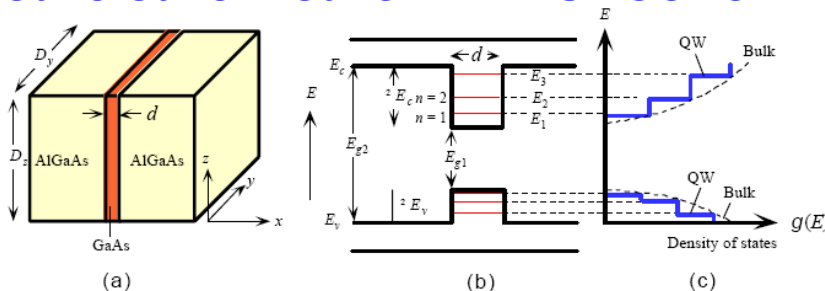
$$E_n = (\hbar^2/2m^*)(\pi n/L)^2$$

Véges potenciálgödör (alapállapot GaAlAs/GaAs sávszerkezeti paramétereivel):

$$E_{gr} = 4.93 \hbar^2/(m^*L^2)$$

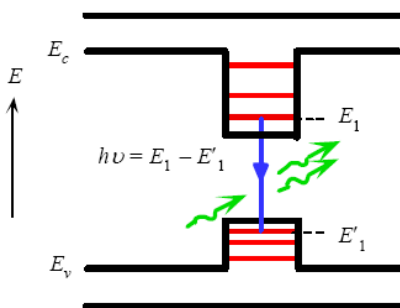
38

ELEKTRONOK ÉS LYUKAK AlGaAs/GaAs/AlGaAs KVANTUMGÖDÖRBEN



Kvantum gödör (QW) eszköz. (a) Kvantum gödör (QW) "szendvics" szerkezet: vékony GaAs réteg két nagyobb tiltott sávú félvezető réteg (AlGaAs) között. (b) A GaAs réteg vezetési sávjában a kialakuló d szélességű és ΔE_c magasságú potenciálgödörbe vannak bezárva, ha d elég kicsi a potenciálgödörben kvantált (diszkrét) energiaszintek alakulnak ki. in the x -direction to a small length d so that their energy is quantized. Analóg a helyzet a valenciasávban is. (c) Állapotsűrűség energiatfüggése a két-dimenziós kvantumgödörben. Az állapotsűrűség állandó az egyes kvantált energiaszinteken.

ELEKTRONOK ÉS LYUKAK EGY KVANTUNGÖDÖRBEN

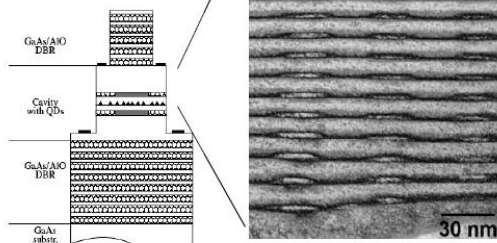


In single quantum well (SQW) lasers electrons are injected by the forward current into the thin GaAs layer which serves as the active layer. Population inversion between E_1 and E'_1 is reached even with a small forward current which results in stimulated emission.

Ha az aktív réteg vastagsága összemérhető az elektronok és lyukak deBroglie hullámhosszával akkor méretkvantálás következtében az energiaszintek fel- illetve lefelé eltolódnak, így a kisugárzott foton energiája megnő, tehát a lézertény hullámhossza rövidebb lesz.

KVANTUMPÖTTY (QD) LÉZERDIÓDÁK

Az aktív réteg 3D elrendezésben kvantumpötytyöket tartalmaz.



Előnyös tulajdonságok:

1. Hangolhatóság részecskemérettel
2. Alacsony **fogyasztás**, kis **méret**
3. Keskeny **vonalszélesség**

Keresztmetszeti TEM kép
InAs nanopötytyök (5 nm)
GaAs rétegek (10 nm) között

VÉGE