Félvezetők és a digitális világ: anyagtudományi vonatkozások

Horváth Zsolt József

Óbudai Egyetem
Kandó Kálmán Villamosmérnöki Kar
Mikroelektronikai és Technológia Intézet

1., Bevezetés

„Félvezetők és a digitális világ” – megmutatni a kapcsolatot: félvezetők, mikroelektronika nélkül nem léteznék a mai tudomány és technika.

„anyagtudományi vonatkozások” - Anyagtudományi Doktori Iskola.

Anyagtudomány tárgya:
1., az anyagok összetétele, szerkezete, tulajdonságai és előállítása közötti kapcsolat felderítése és megértése,
2., anyagkiválasztás az új feladatok megvalósításához, és
3., új tulajdonságokkal bíró anyagok és szerkezetek létrehozása.

A félvezetőkkel kapcsolatos összes kutató és fejlesztő tevékenység ide tartozik.

Felépítés:
1., Bevezetés
2., Fizikai alapok
3., Félvezető eszközök
4., A digitális technika alapjai
5., CMOS megvalósítás
6., Tudományos, technikai és társadalmi hatások

Technológia nem.

Mikroelektronika, integrált áramkörök

Mikroelektronika – félvezetőkön létrehozott integrált áramkörökkel (IC-kel) megvalósított elektronika: érzékelés, jeltovábbítás és feldolgozás.

Optoelektronika: elektromos és/vagy optikai érzékelés, jeltovábbítás és feldolgozás.

Integrált áramkörök - egy tokban egy egész áramkör, több milliárd elem (tranzisztor) is lehetséges.

IC-k fajtái:

Hibrid - kis méretű alkatrészek szigetelő lapkára szerelve (miniatűr nyomtatott áramkör).

Monolitikus - minden alkatrészt a félvezető lapkán (csip) alakítanak ki
mono - egy, lithos- kő (görög): egykristály - az IC-k nagy részét egyetlen kristályszemcsén hozzák létre

Mikro- és optoelektronika - csúcstechnológia.

Magyarországon Vishey (Budapest, Gyöngyös) - tokozás.

Integrált áramkörök

Folyamatos fejlesztés

Cél (többek között):

- méretek csökkentése, elemsűrűség növelése
- teljesítőképesség növelése
- megbízhatóság növelése
- költségek csökkentése
- új működési elvek megvalósítása

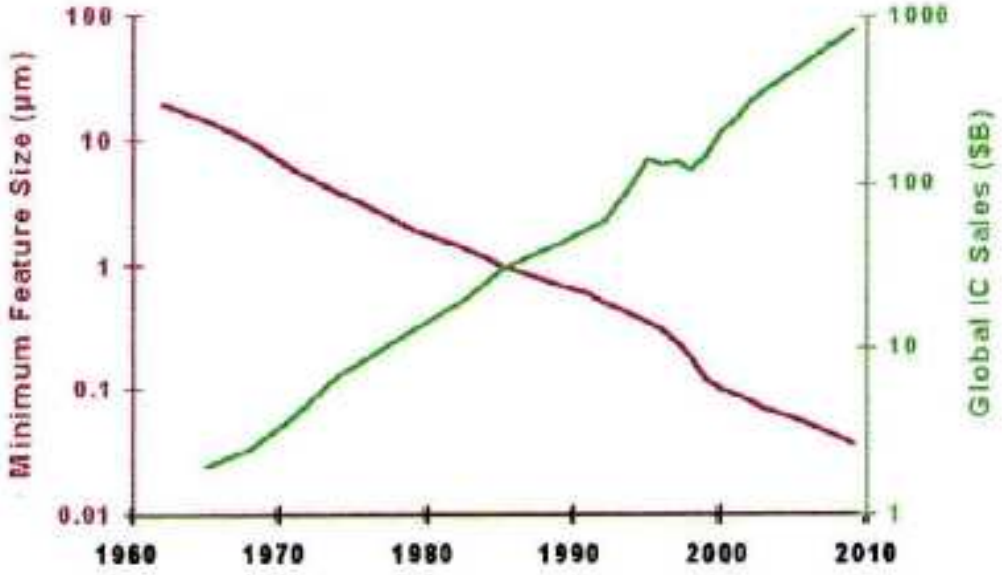
Ma:

- több milliárd tranzisztor egyetlen csipen,
- csíkszélesség 22 nm (gyártásban).

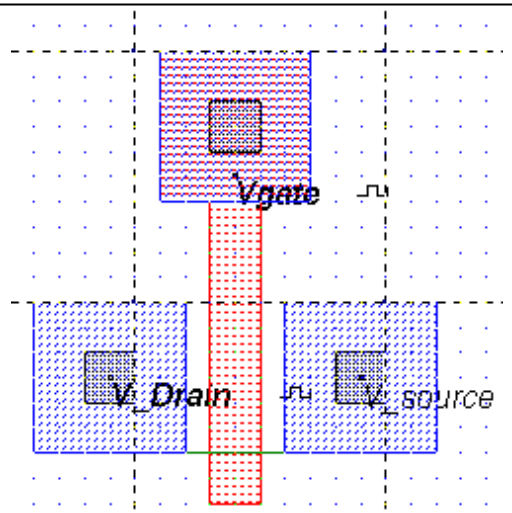
Tranzisztorméret: (8 csíkszélesség)^2

$(8x22)^2=30976\ nm^2=0{,}031\ \mu m^2$.

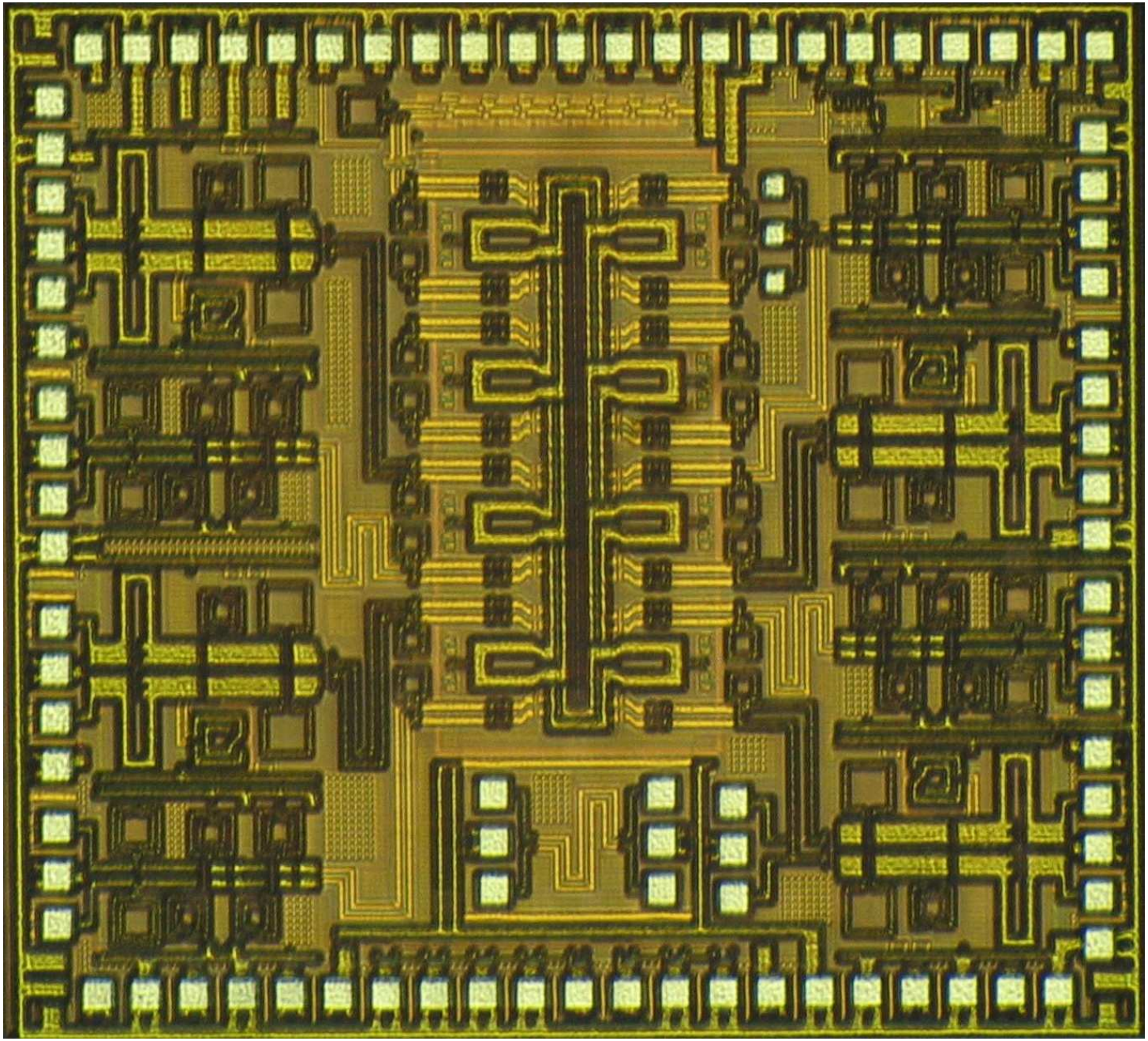
Moore szabály:



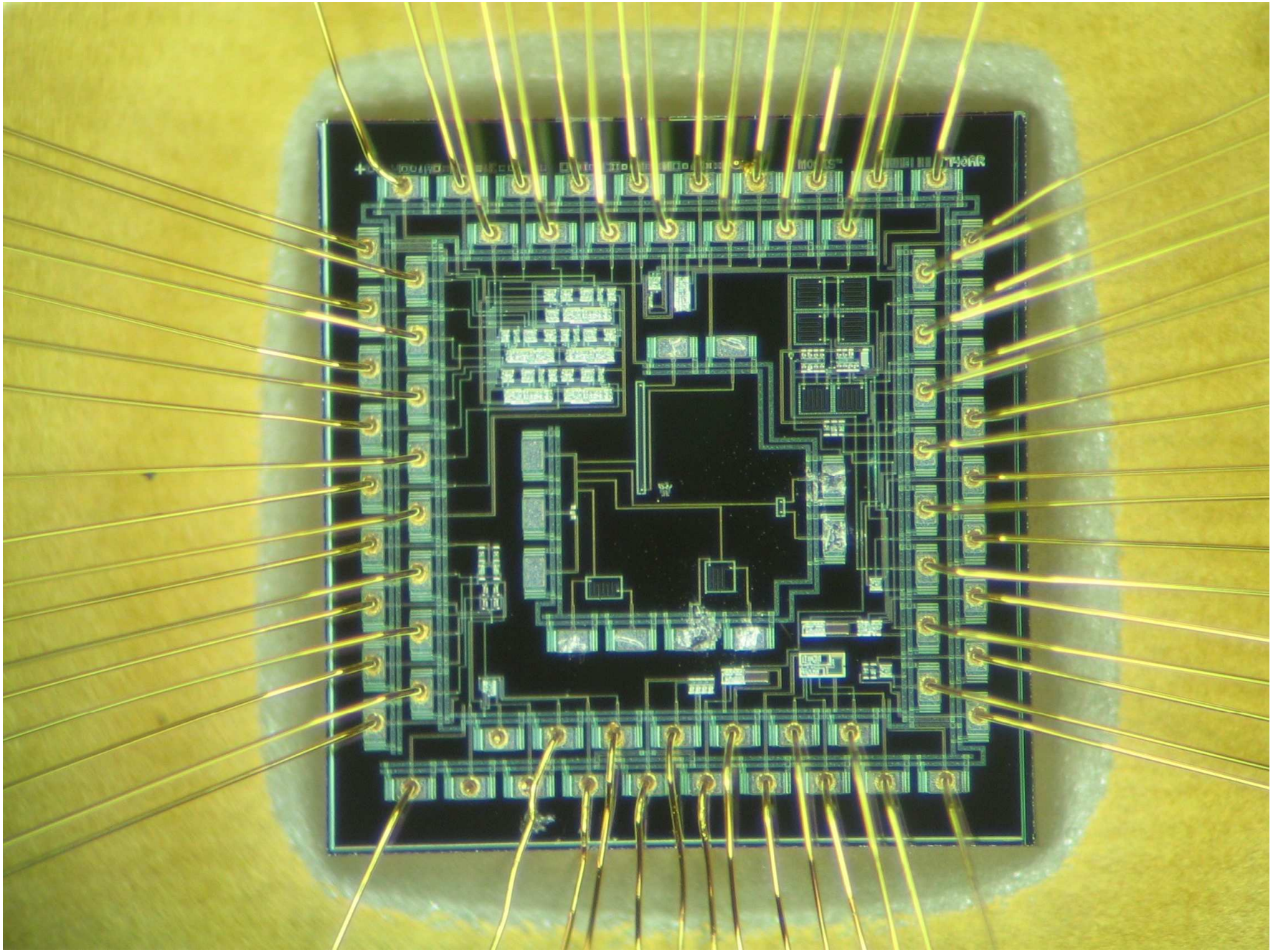
G. Moore (Fairchild/Intel) 1960-as években fogalmazta meg de még most is működik (!): a jellemző méretek 1,5-2 évente feleződnek.



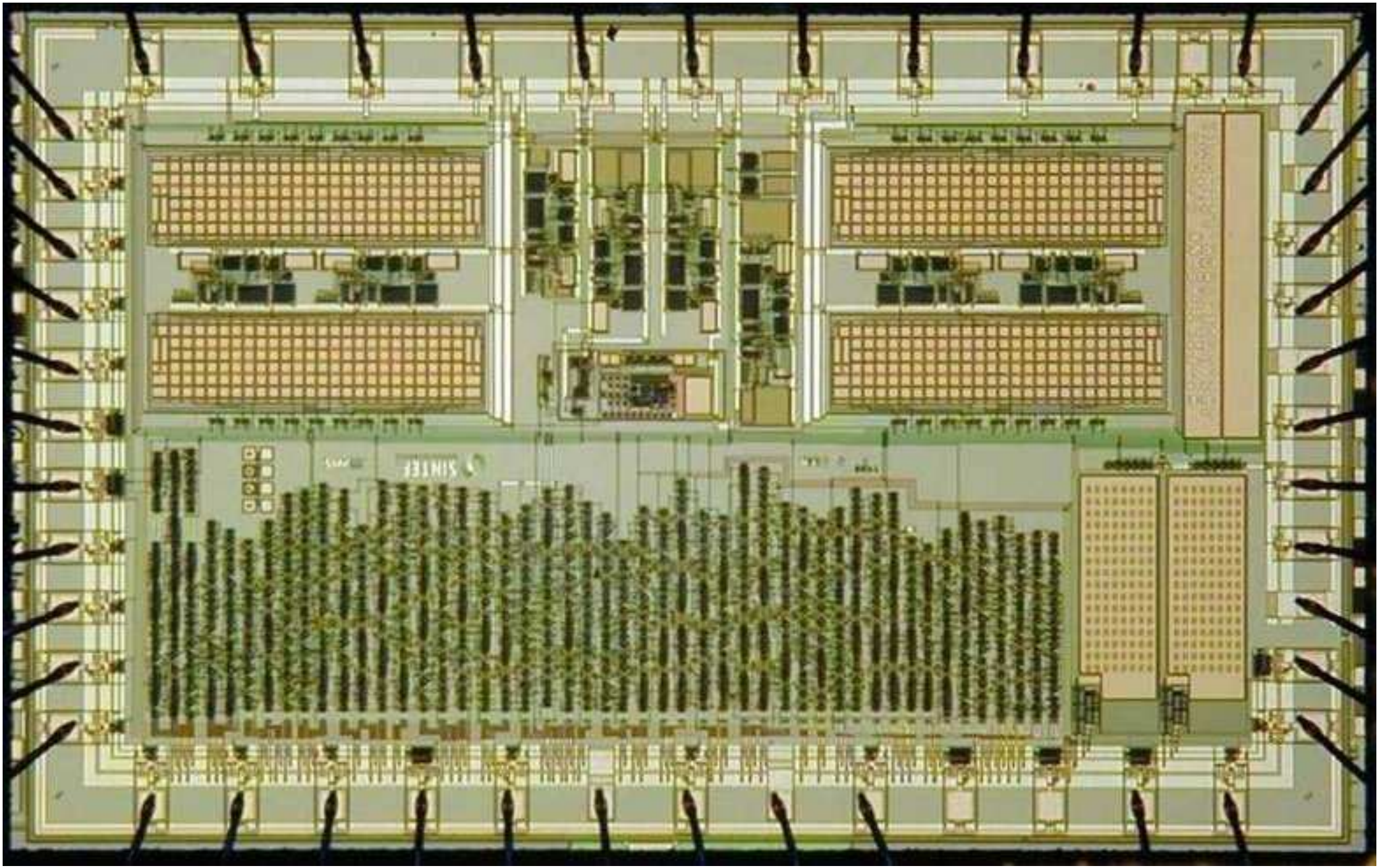
Integrált áramkörök



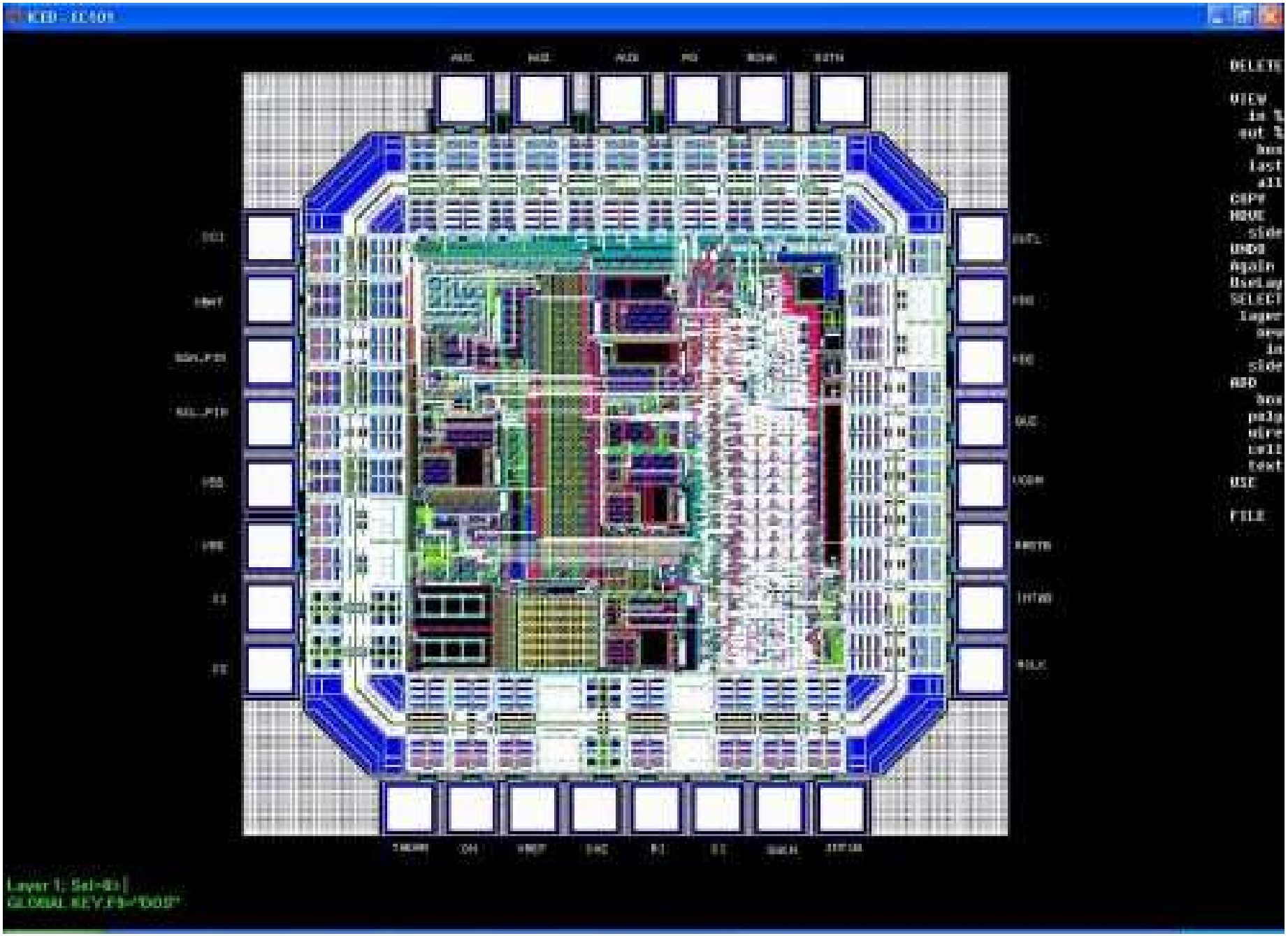
Integrált áramkörök (2)



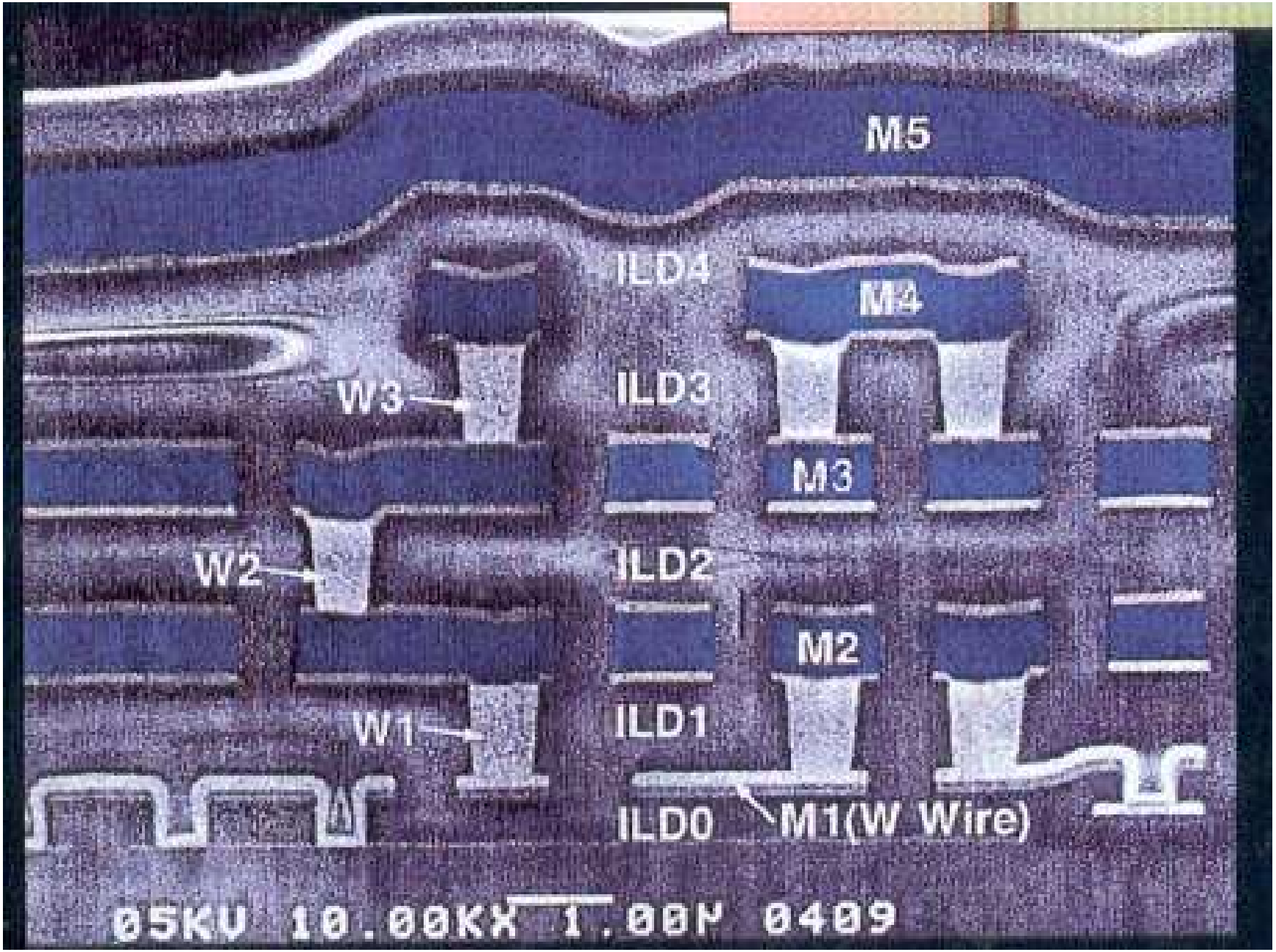
Integrált áramkörök (3)



Integrált áramkörök (4)



Integrált áramkörök (5)



2., Fizikai alapok

Félvezető anyagok

Elemi félvezetők:

C (gyémánt), **Si**, Ge

Vegyületfélvezetők:

III-V ($A^{III}B^{V}$):

Binér: AlAs, AlSb, BN,**GaAs**, GaSb, GaN, InAs, InP, stb.

Ternér: AlGaAs, InAsP, stb.

Kvaternér: InGaAsP, stb.

II-VI ($A^{II}B^{VI}$):

Binér: CdS, CdSe, CdTe, ZnS, ZnSe, ZnTe, HgTe

Ternér: HgCdTe

IV-IV: SiGe, SiC

IV-VI: PbS, PbTe

Oxidok: ZnO, SnO_2, In_2O_3, CdO

Szerves félvezetők

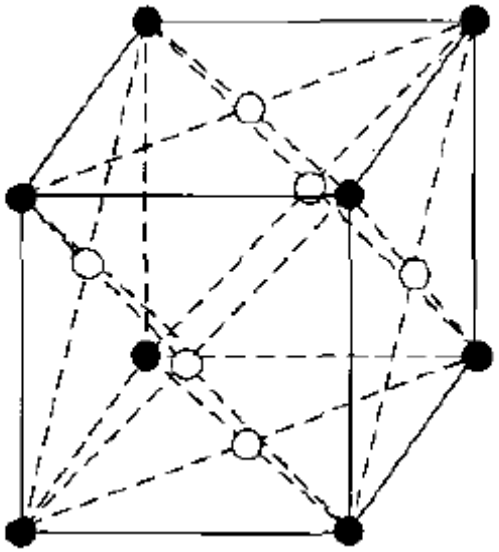
Alkotó elemek:

Period	II	III	IV	V	VI
2		B Boron	C Carbon	N Nitrogen	O Oxigen
3	Mg Magnesium	Al Aluminum	Si Silicon	P Phosphorus	S Sulfur
4	Zn Zinc	Ga Gallium	Ge Germanium	As Arsenic	Se Selenium
5	Cd Cadmium	In Indium	Sn Tin	Sb Antimony	Te Tellurium
6	Hg Mercury		Pb Lead		

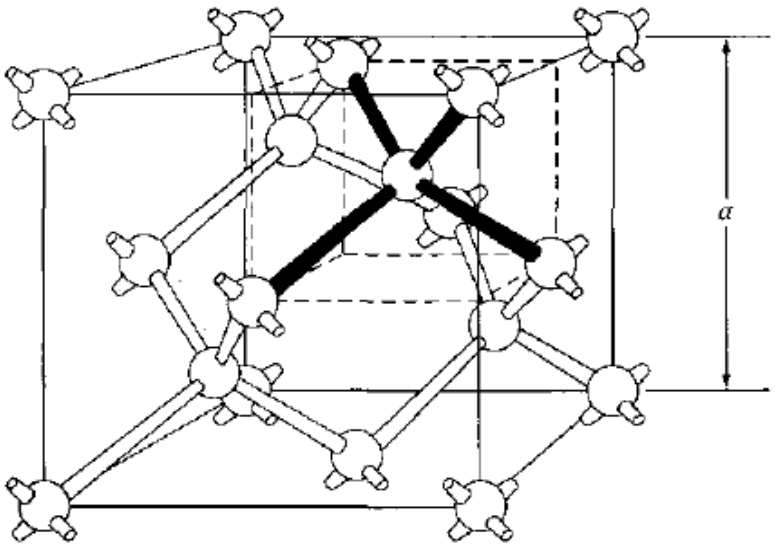
Kristályszerkezet

A kristályban minden rácsponthoz egy vagy több atom adott térbeli elhelyezkedése tartozik, amit bázisnak nevezünk. A rácsszerkezet és a bázis együtt alkotják a kristályszerkezetet.

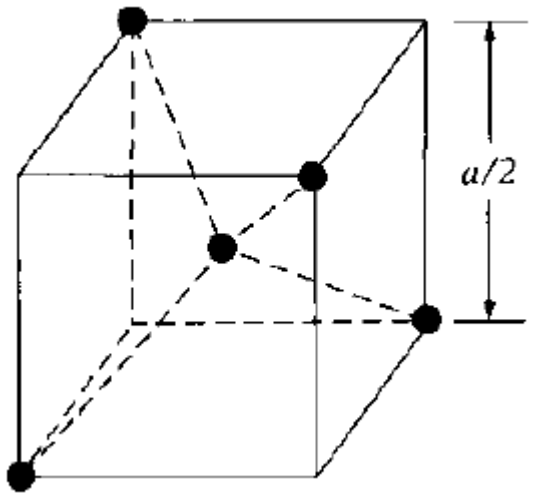
A gyémánt kristályszerkezete: lapközepes köbös, két atomos bázis, mely a kocka térátlója irányában áll, az atomok távolsága a térátló 1/4 része.



Lapközepes köbös rácsszerkezet



A gyémánt kristályszerkezete



A négy legközelebbi szomszédos atom

Ez a kristályszerkezete a Ge-nak és a Si-nak is.

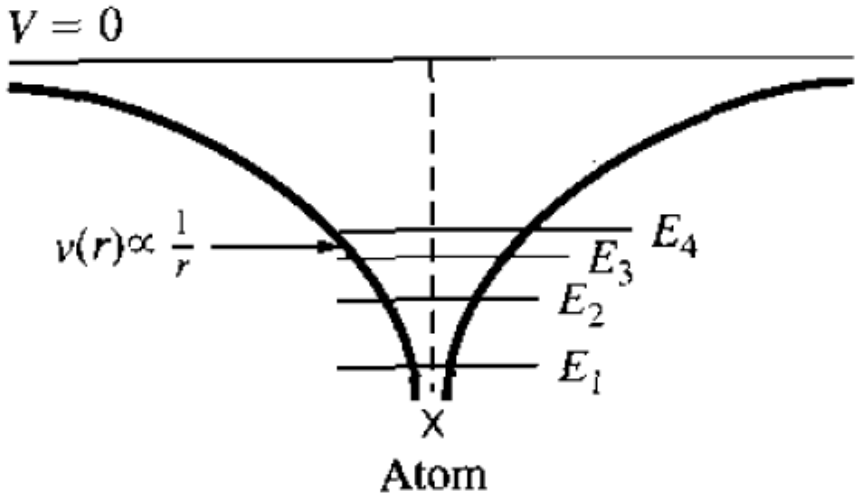
Ha a bázis két különböző atomból áll, cinkblende szerkezet: ZnO, GaAs, GaP, InSb, InP kristályszerkezete.

Elektronállapotok az atomokban

Az atomban az atommag és az elektron közötti Coulomb erő potenciálgödröt hoz létre az elektronok számára. A megengedett elektronállapotok kielégítik a Schrödinger egyenletet.

$$F_C = \frac{zq^2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$

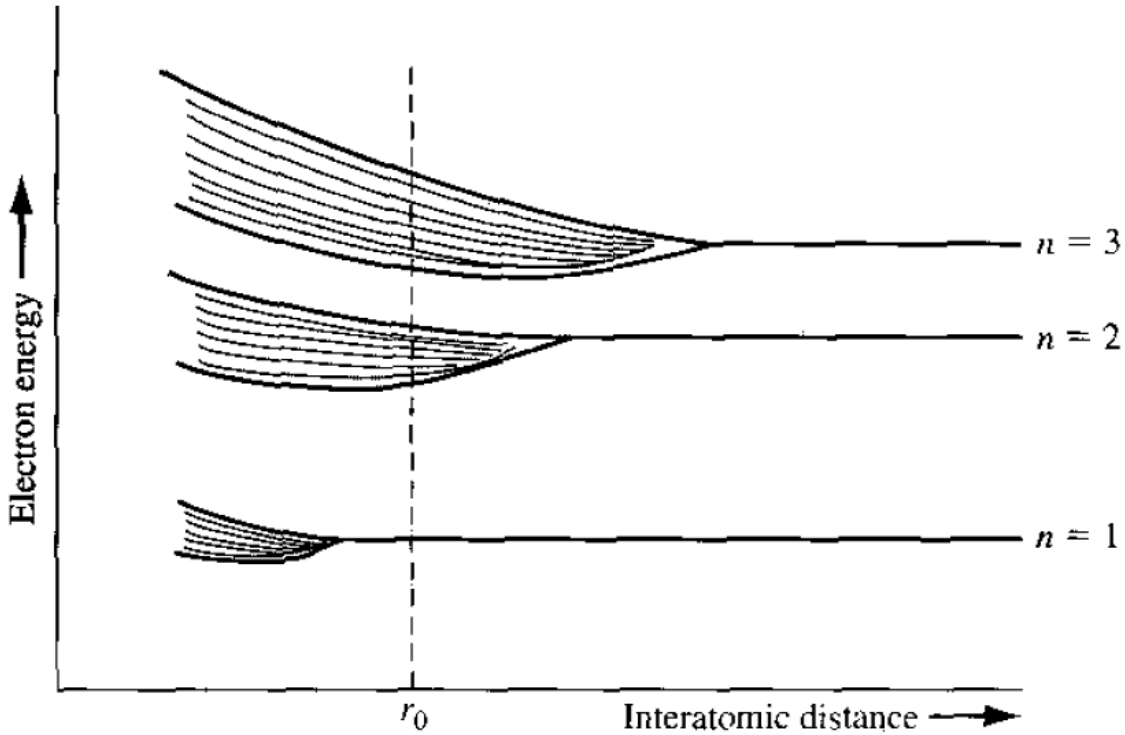
ahol z az atomszám,
q az elemi töltés,
ε_0 a vákuum permeabilítása,
r az elektronpálya sugara

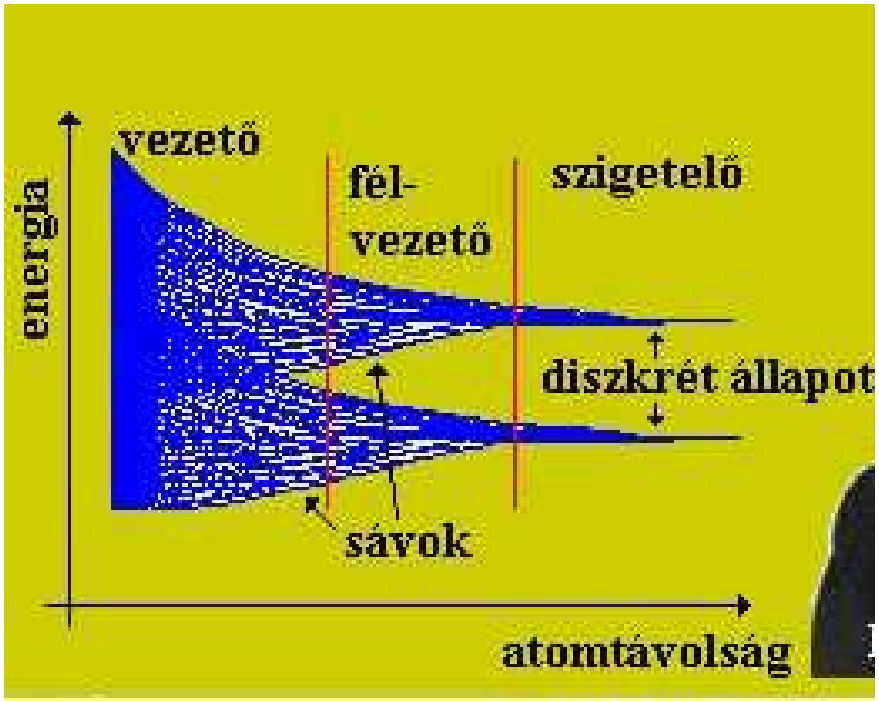


Minél messzebb van az elektron az atommagtól, annál nagyobb az energiája.

Az energiaszintek felhasadása sok kölcsönható atom esetén

Az energiaszintek annyi felé hasadnak, amennyi a kölcsönhatásban részt vevő atomok száma. Az atomok távolságától függően a felhasadt energiaálapotokból sávok alakulnak ki.





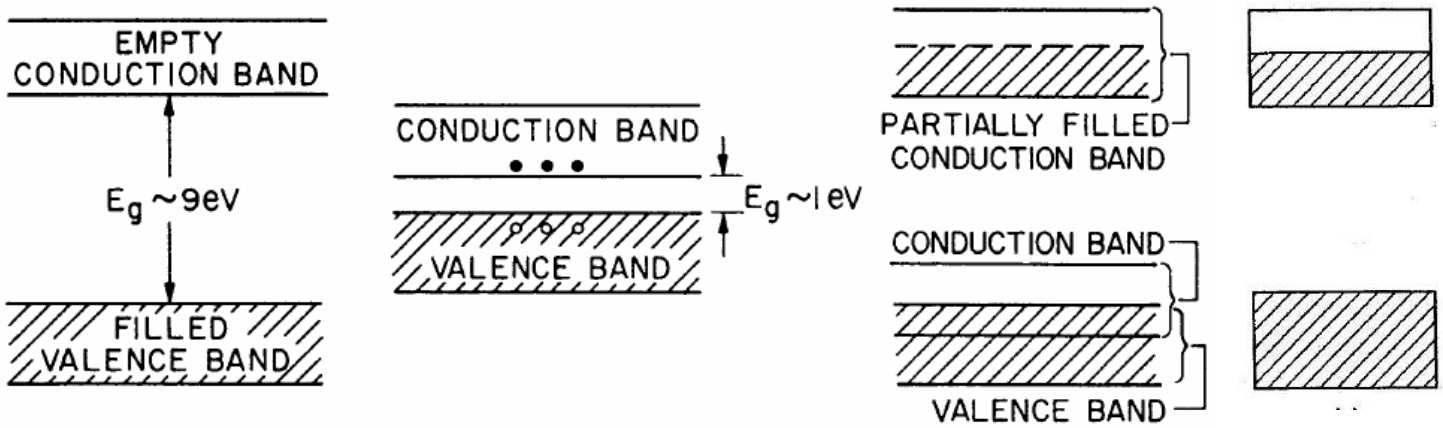
Fémek, félvezetők, szigetelők

Szigetelők: tiltott sávszélesség kb. 5 eV fölött, szobahőmérsékleten sincsenek szabad elektronok a vezetési sávban.

Félvezetők: tiltott sávszélesség néhány tized eV - néhány eV között, szobahőmérsékleten kevés a szabad elektron a vezetési sávban.

Fémek: nincs tiltott sáv, a vegyérték és vezetési sáv átlapol, vagy a vezetési sávban sok szabad elektron van.

Sávszerkezet

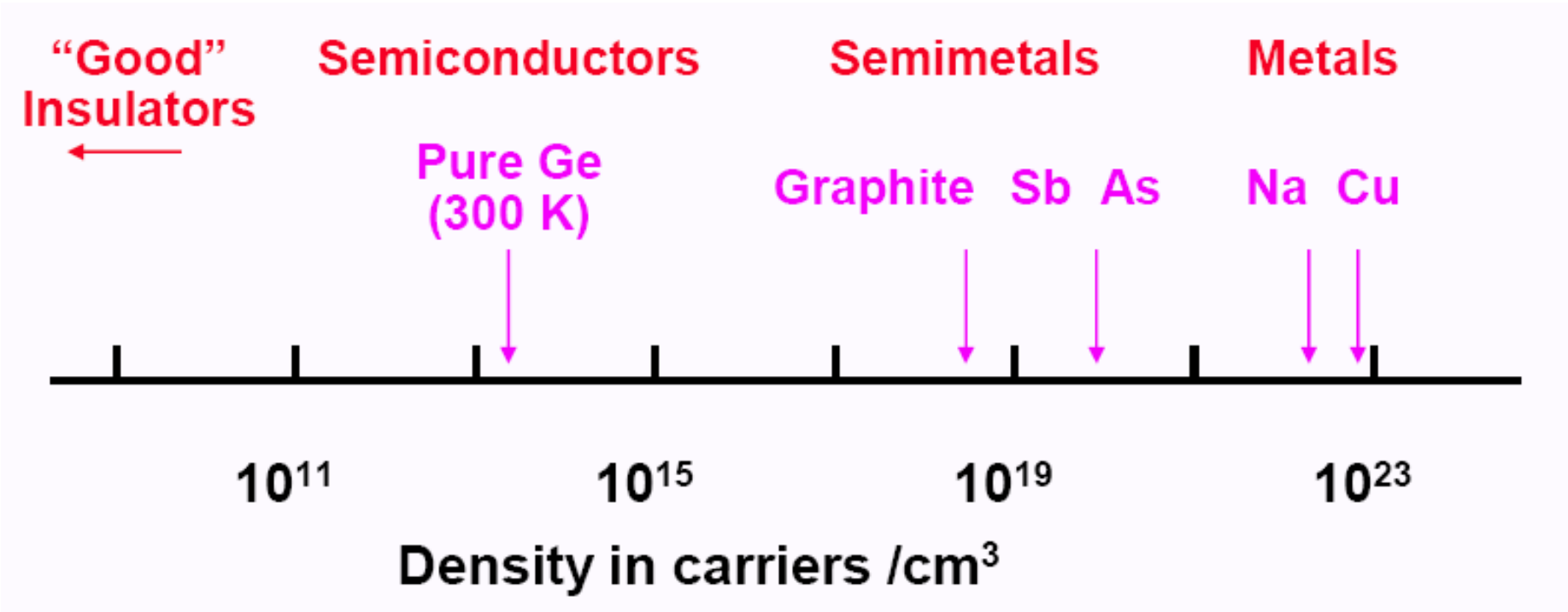


Szigetelők Félvezetők Fémek

Néhány félvezető tiltott sávszélessége:

C	≈ 5.4 eV
Si	≈ 1.1 eV
Ge	≈ 0.7 eV
GaAs	≈ 1.5 eV
InAs	≈ 0.4 eV
GaP	≈ 2.3 eV
InP	≈ 1.4 eV
GaN	≈ 3.4 eV

A szabad töltéshordozó koncentráció

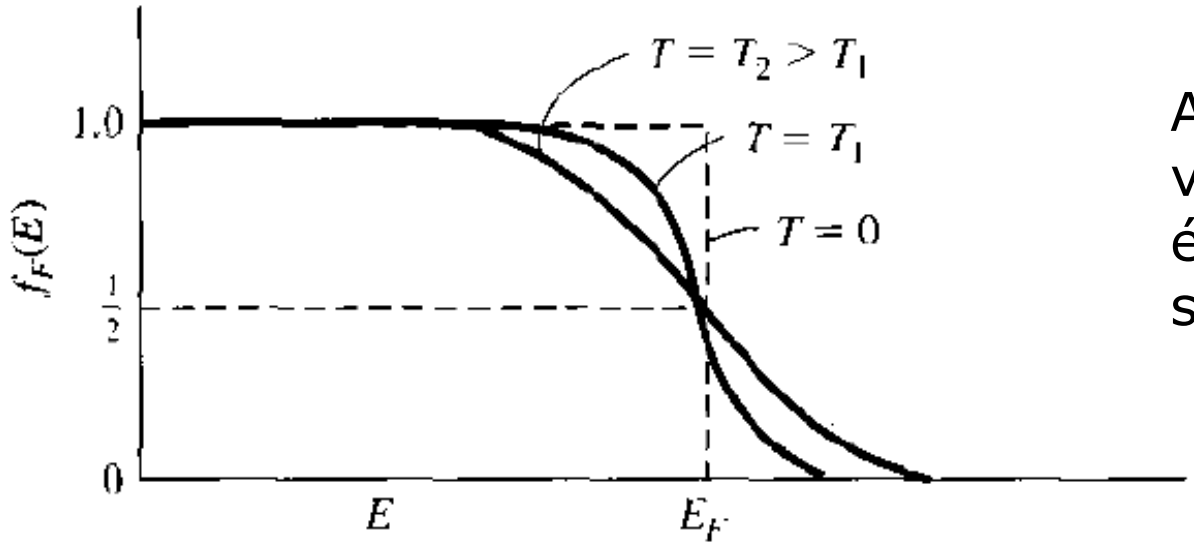


Az energiaállapotok betöltöttsége

Abszolút nulla fok esetén a kristály alapállapotban van, az elektronok a legkisebb energiájú állapotokat töltik be. Azt az energiát, amely alatt abszolút nulla fokon az összes energiaállapot betöltött, Fermi-szintnek nevezzük (E_F). Magasabb hőmérsékleten az elektronok egy része magasabb energiállapotba kerül. Az energiaállapotok elektronokkal való betöltöttségének valószínűsége a Fermi-Dirac eloszlással írható le:

$$f_{Fe}(E) = \frac{1}{\exp(\frac{E - E_F}{kT}) + 1}$$

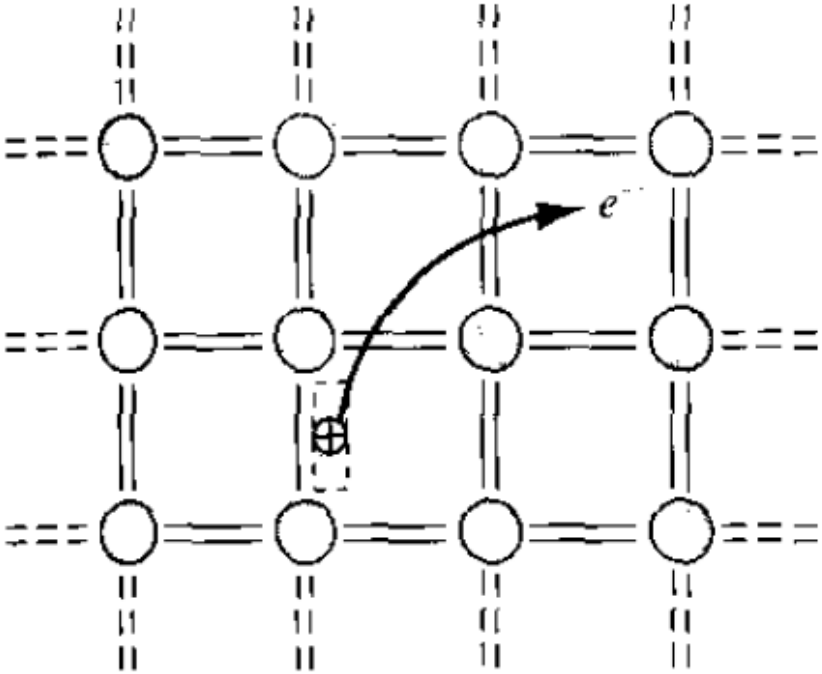
k - Boltzmann állandó
k=1,38x10^{-23} J/K

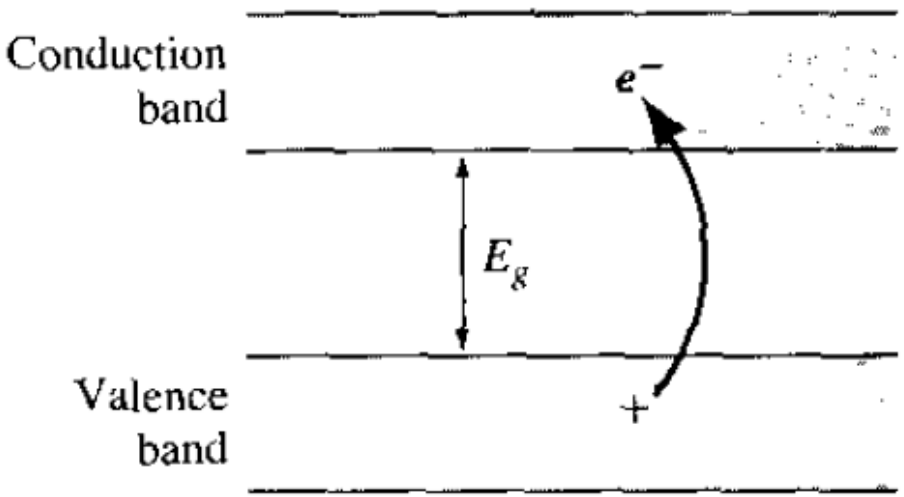


A Fermi-szint fémeknél a vezetési sávban, félvezetőknél és szigetelőknél a tiltott sávban helyezkedik el.

A pozitív töltéshordozók (lyukak)

Ha az elektronok a félvezetőkben a vegyértéksávból a vezetési sávba jutnak, a helyükön pontszerű pozitív töltések maradnak vissza (az ionizált atomtörzsek töltései). A kiszabadult elektronok helyére át tudnak ugrani a szomszéd elektronok, így a pontszerű pozitív töltések mozogni tudnak a kristályon belül, azaz pozitív töltéshordozóként viselkednek. Az így létrejövő pozitív töltéshordozókat lyukaknak nevezzük.



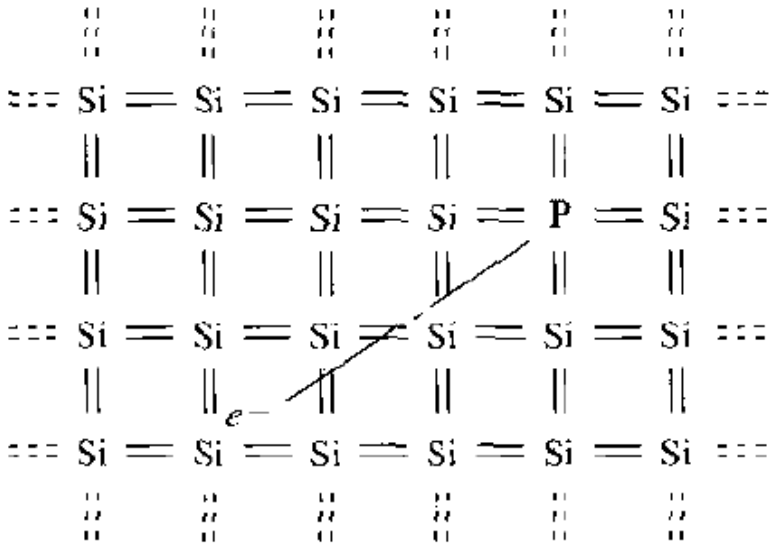


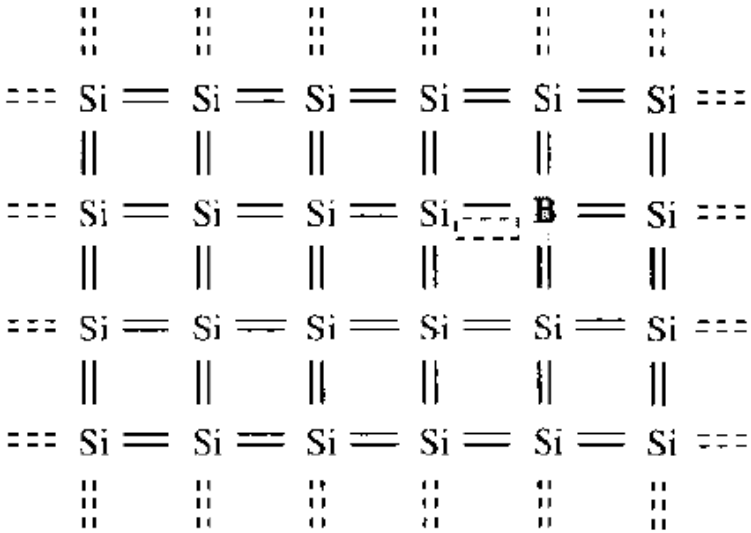
A lyukak keletkezésének szemléltetése a Si kristály sematikus szerkezetében és a sávdiagramban.

Adalékolt félvezetők

Ha a négyvegyértékű Si rácsába ötvegyértékű atom épül be (pl. P), az ötödik elektron könnyen leszakad és feljut a vezetési sávba: donor adalék - n-típusú félvezető jön létre.

Ha a Si rácsába három vegyértékű atom (pl. B) épül be, az atom környezetében elektronhiány (lyuk) keletkezik, amely könnyen elszakad az atomtól: akceptor adalék - p-típusú félvezető jön létre.

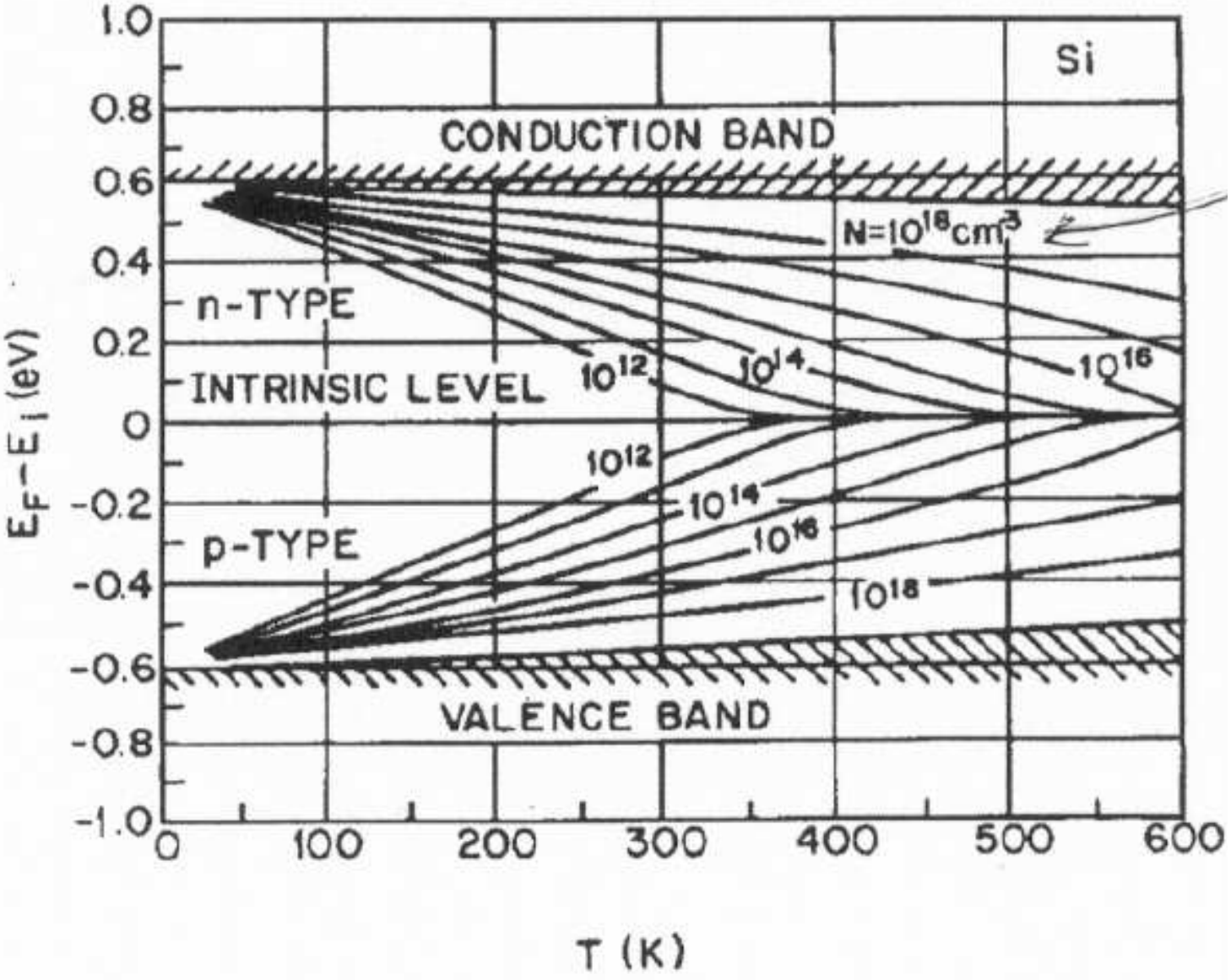




Ha akceptor adalék van: $p=N_A$, ahol N_A az akceptorkoncentráció

Ha donor adalék van: $n=N_D$, ahol N_D a donorkoncentráció

A Fermi-szint adalékolt félvezetőkben



3., Félvezető eszközök

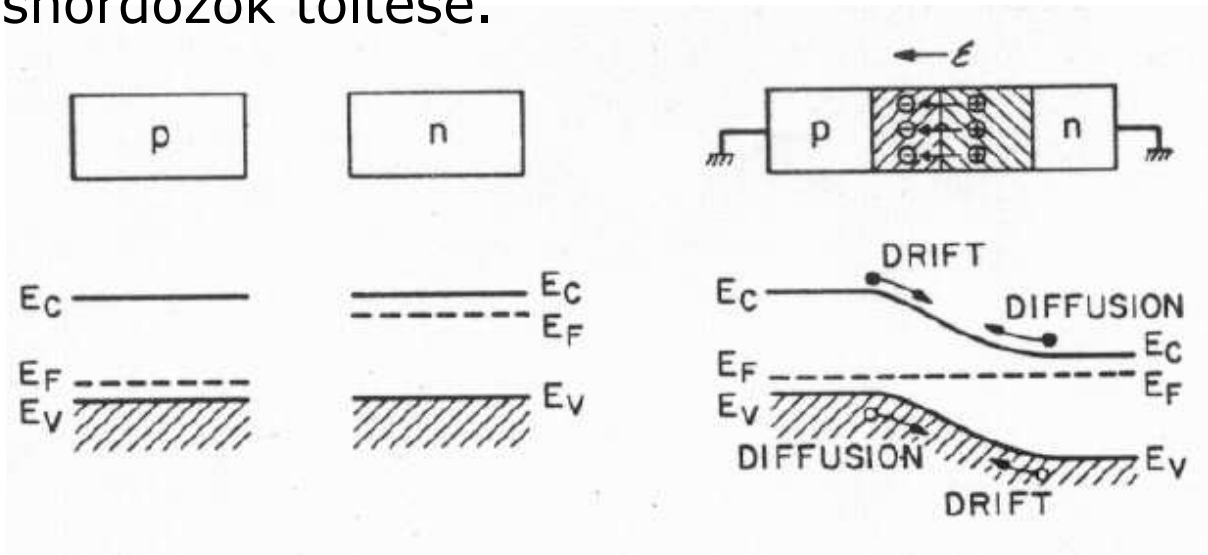
A pn dióda

A p-n átmenet egyensúlya

A pn dióda egy p- és egy n-típusú réteg határfelületénél kialakuló potenciálgát (p-n átmenet) eredményeként jön létre.

A határfelületen keresztül a koncentráció különbség következtében folyamatosan elektronok diffundálnak az n rétegből a p rétegbe és lyukak a p rétegből az n rétegbe. Így mindkét oldalon kialakul egy töltéshordozókban elszegényedett tartomány (kiürült réteg), amely a p-n átmenetet alkotja. A p-n átmenetben tértöltés alakul ki, mert az ionizált adalékatomok töltését nem kompenzálja a szabad töltéshordozók töltése.

Különálló p- és n-típusú félvezető és a p-n átmenet sávdiagramja



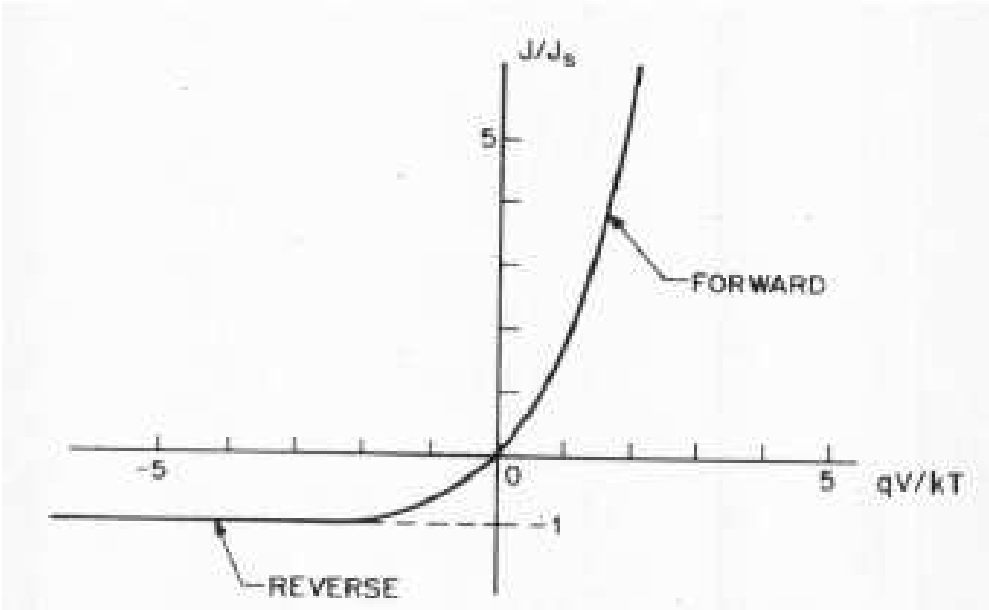
Egyenirányítás

Nyitó irányú feszültség esetén az elektromos tér lecsökken, csökken a drift áram és a kiürült réteg szélessége.

Záró irányú feszültség esetén az elektromos tér nő, nő a drift áram és a kiürült réteg szélessége.

A diódán átfolyó áramok eredője mindkét esetben különbözik nullától.

Az eredő áram idelális esetben:



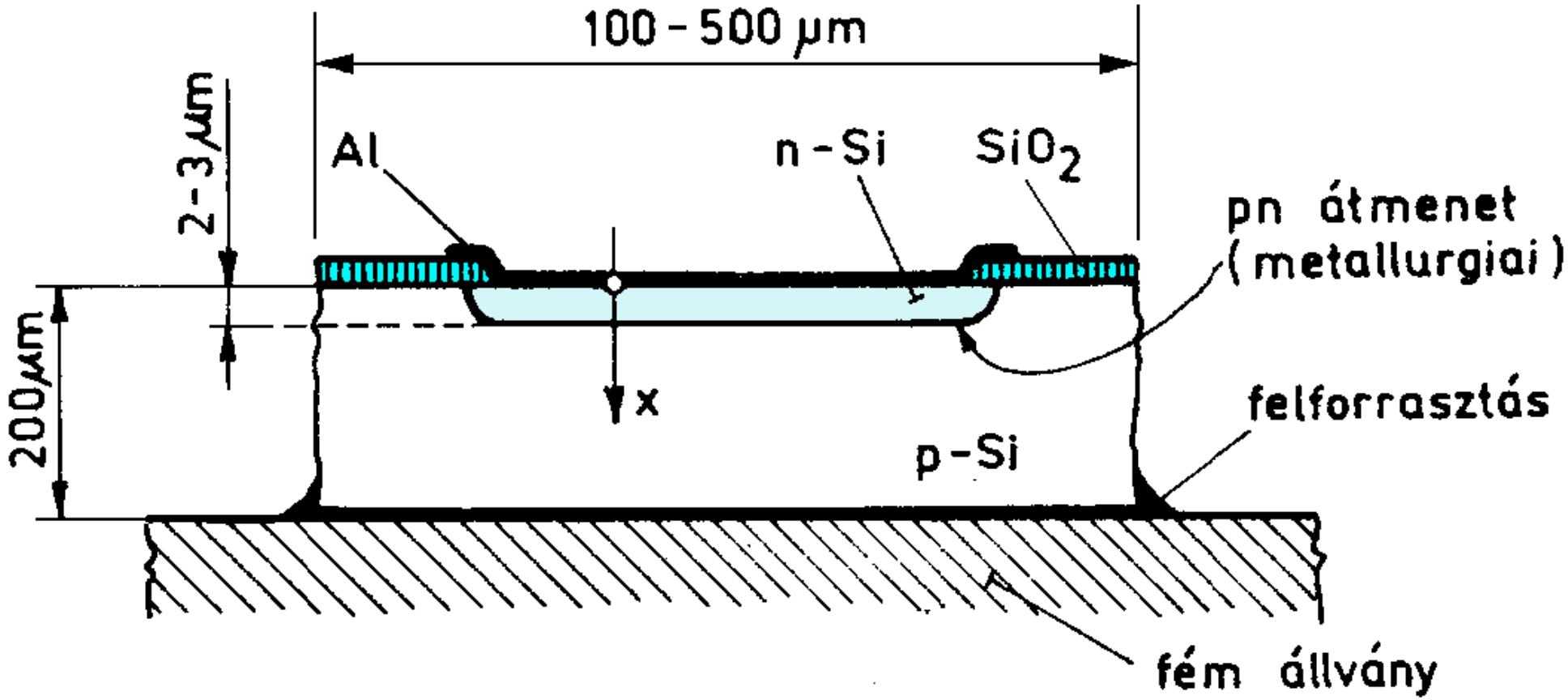
$$J = J_0(\exp\frac{qU}{kT} - 1)$$

ahol J az áramsűrűség, J_0 a telítési áramsűrűség, q az elemi töltés, U a feszültség, k a Boltzmann állandó és T a(z abszolút) hőmérséklet.

A diódán átfolyó áram és a telítési áram arányos a dióda felületével:

$I=AJ$ és $I_0=AJ_0$, ahol A a dióda felülete.

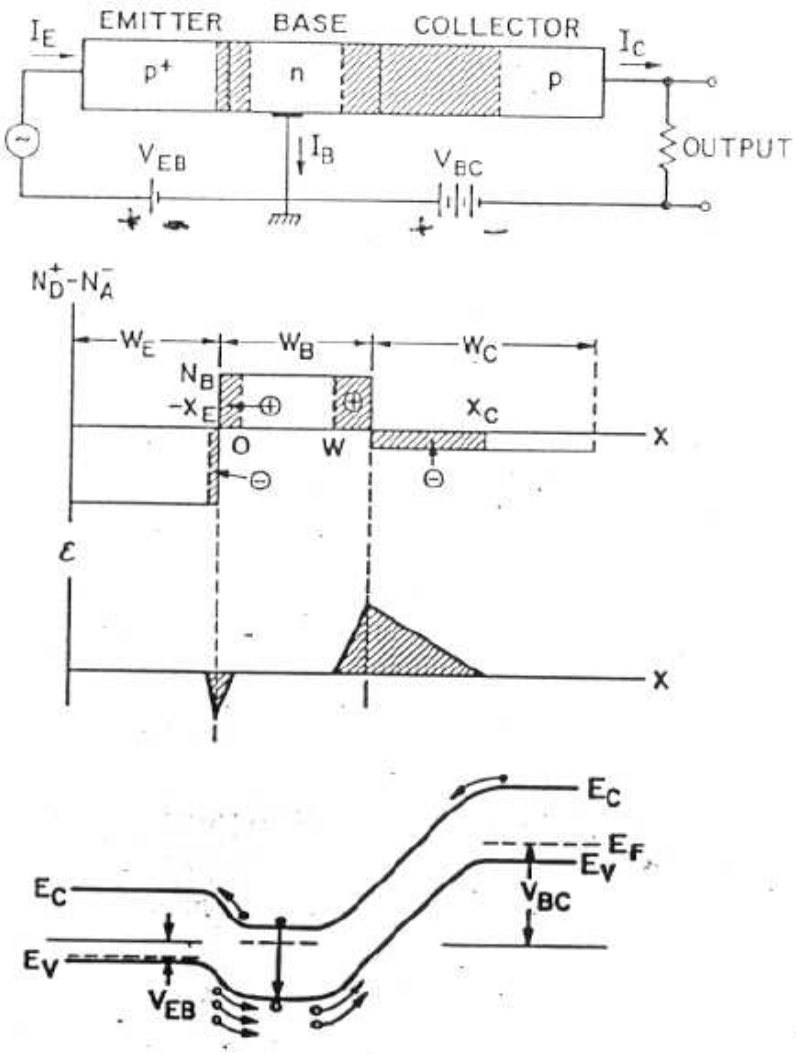
Felépítés

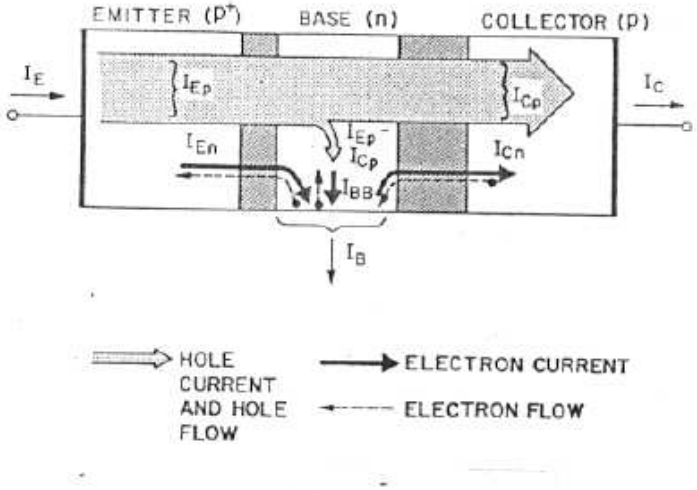


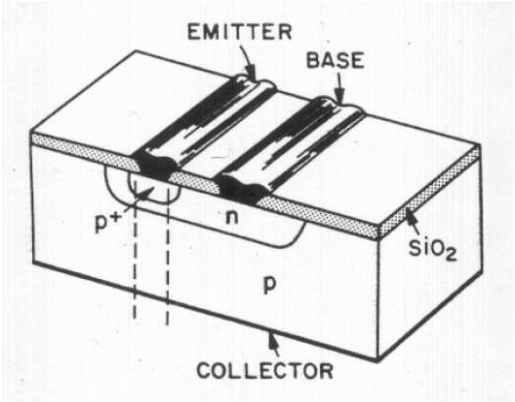
Planár szilícium pn dióda keresztmetszete

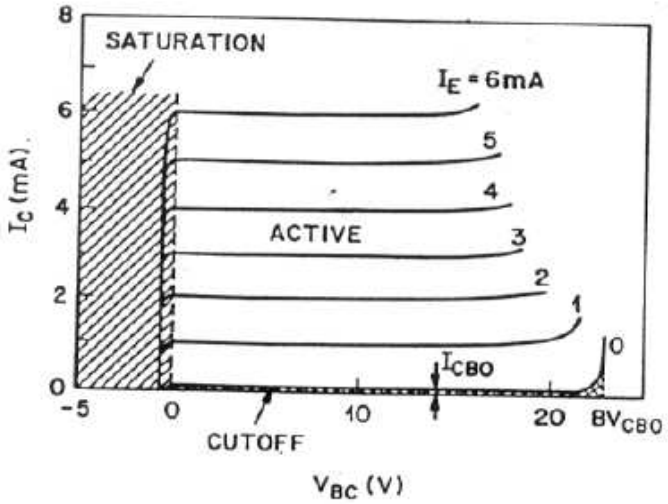
A bipoláris tranzisztor

Földelt bázisú kapcsolás





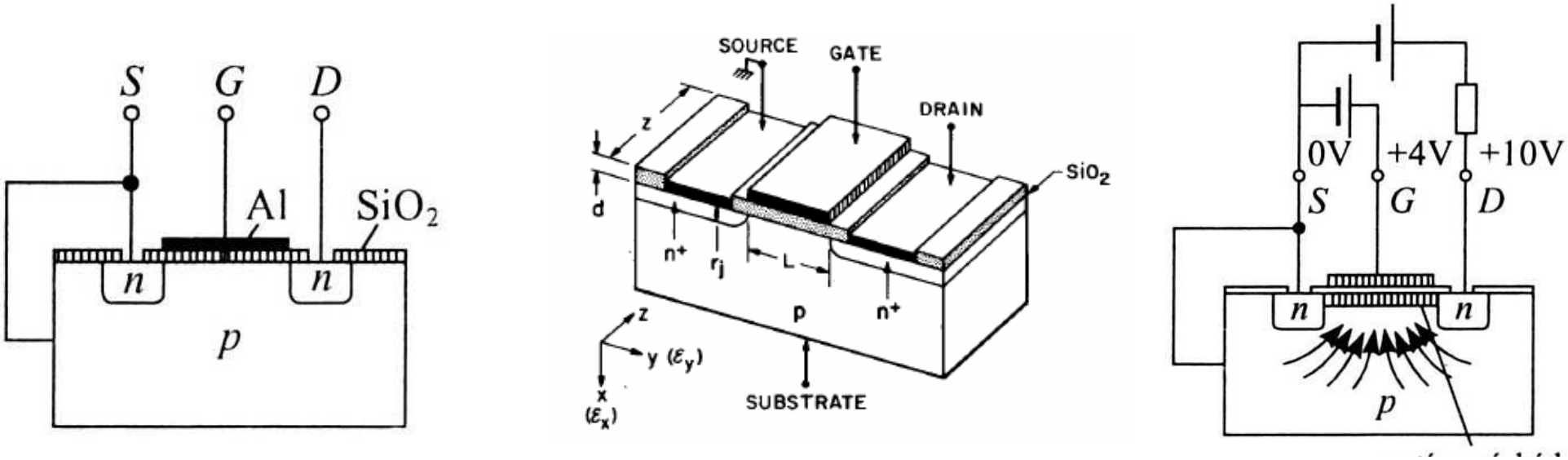




A MOSFET

Metal-Oxide-Silicon Field Effect Transistor

Két, a hordozóval ellentétes típusú zseb között a vezérlő elektródára (gate) kapcsolt feszültséggel létrehozható vezető csatorna (inverziós réteg).



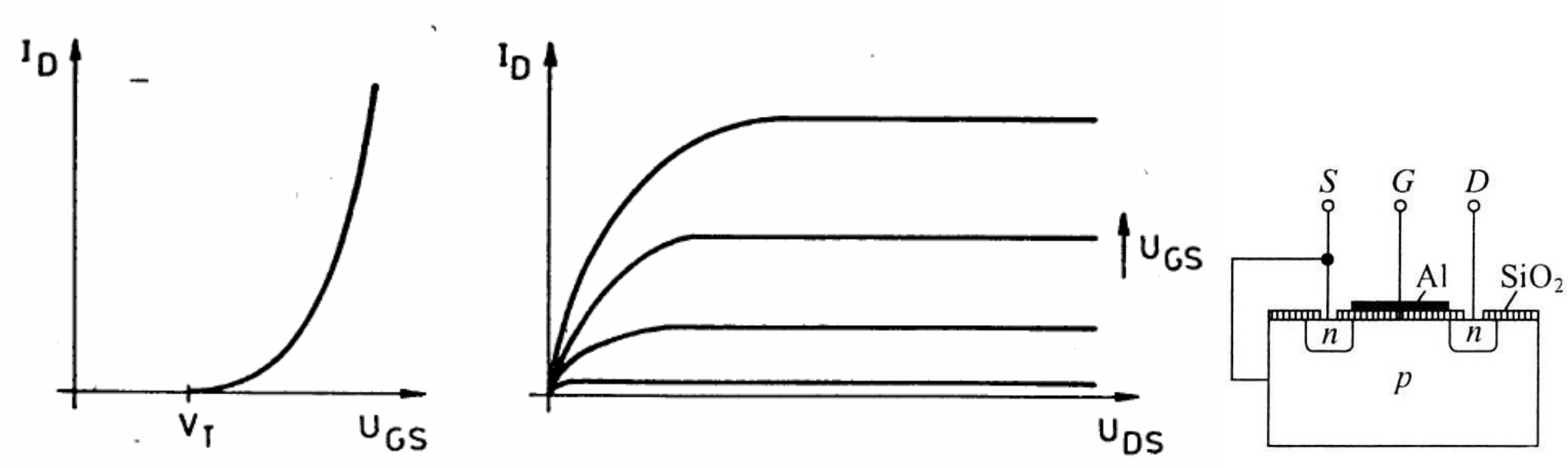
n-csatornás MOSFET keresztmetszete, távlati képe és a vezető csatorna kialakulása

Lehet n- és p-csatornás (NMOS és PMOS).

CMOS áramkörök (complementer MOS): n- és p-csatornás tranzisztorokból épülnek fel.

Jó minőségű MOSFET-et csak szilíciumon lehet készíteni: a termikus SiO_2 nagyon jól passziválja a Si felületét - kicsi a csapdasűrűség.

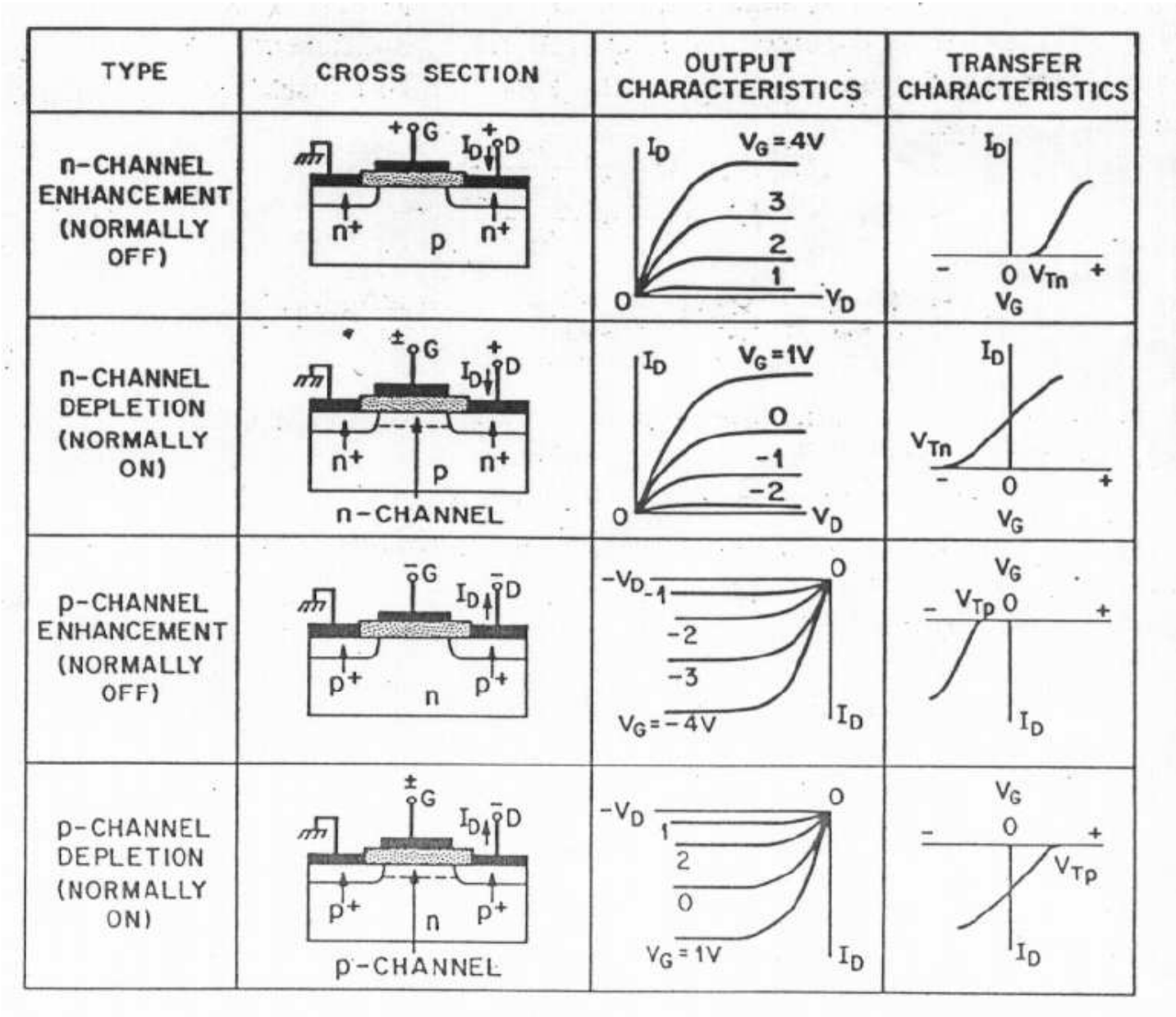
A MOSFET karakterisztikái



Az átmeneti (transzfer) és a kimeneti karakterisztika

MOSFET típusok

Lehet n- és p-csatornás, növekményes és kiürítéses.



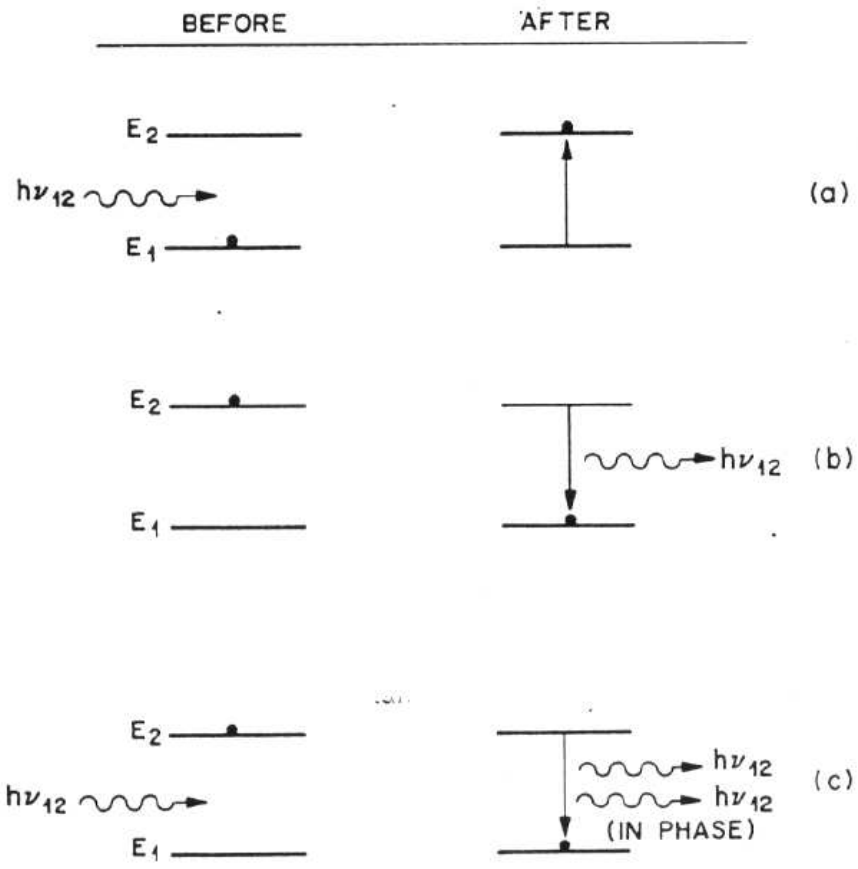
A mai digitális IC-k CMOS logikai áramköröket tartalmaznak.

Fő előnyük a kis disszipált teljesítmény (fogyasztás).

A digitális IC-k fő problémája a keletkező hő elvezetése. A processzorokban a teljesítménysűrűség akkora, mint a rakéták hajtóművében.

Fotoelektromos eszközök

Foton-elektron kölcsönhatás - alapjelenségek



Alkalmazás:
a., fotodetektorok és napelemek
b., fényemittáló diódák (LED-ek)
c., lézerek

a., Abszorpció: a beérkező foton elnyelődik, energiája átadódik a kölcsönható elektronnak, ami a vegyértéksávból a vezetési sávba kerül - elektron-lyuk pár keletkezik. Feltétel: $h\nu \geq E_g$.
b., Spontán emisszió (sugárzásos rekombináció): az elektron a vezetési sávból a vegyértéksávba esik, az energiakülönbséget foton formájában sugározza ki. A fénykibocsátó diódákban (LED-ekben) alkalmazzák.
c,. Stimulált emisszió: a belépő foton kölcsönhat egy, a vezetési sávban lévő elektronnal. Az elektron a vegyértéksávba esik és kisugároz egy ugyanakkora frekvenciájú, ugyanolyan irányú, ugyanolyan fázisú és ugyanolyan polarizációjú fotont, mint a belépő foton - fényerősítés.

Fényemittáló diódák

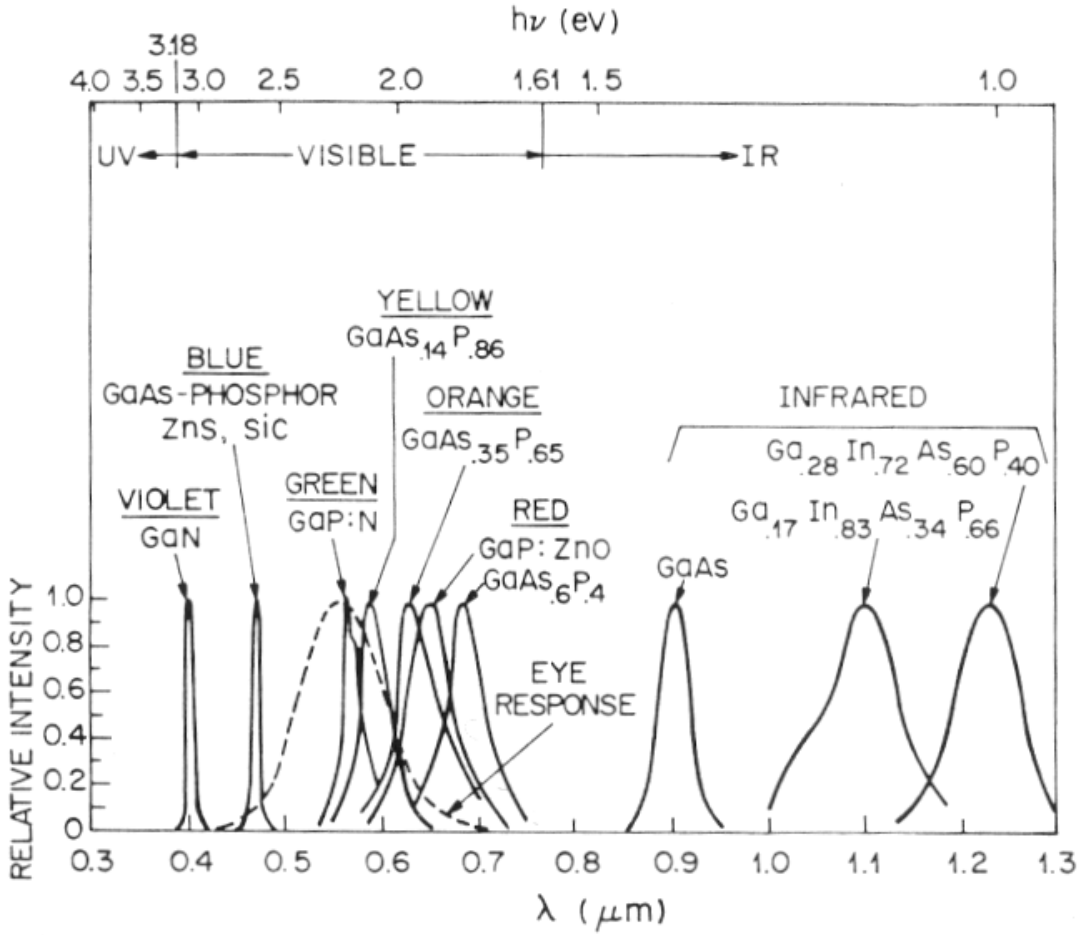
A LED-ek direkt tiltott sávú félvezetőkből készült pn diódák. Nyitóirányú előfeszítés esetén intenzív sugárzásos rekombináció megy végbe a p-n átmenetben, a dióda világít.

Látható spektrum: GaP, CdS (zöld), GaAsP (vörös-zöld az összetétel függvényében), GaInN (kék), GaN (ibolya).

Infravörös spektrum: GaAs, GaInAsP, GaInSb.

Alkalmazás:
optikai csatolók,
optikai távközlés,
kijelzők,
képernyők, kivetítők
világítás.

Az izzólámpáénál jobb hatásfok.



Félvezető lézerdióda

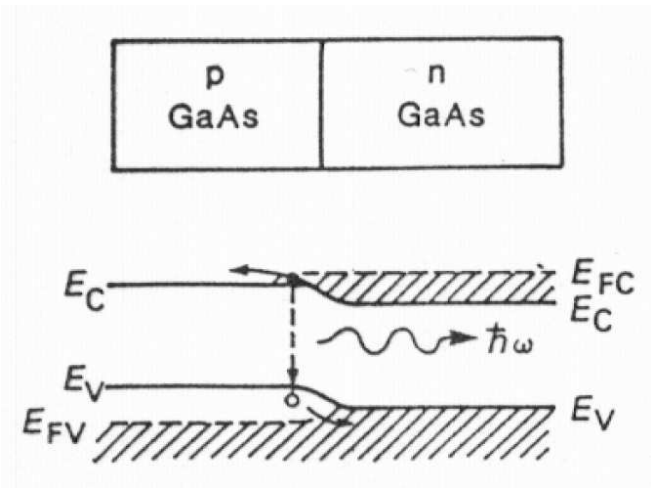
Működési feltételek:

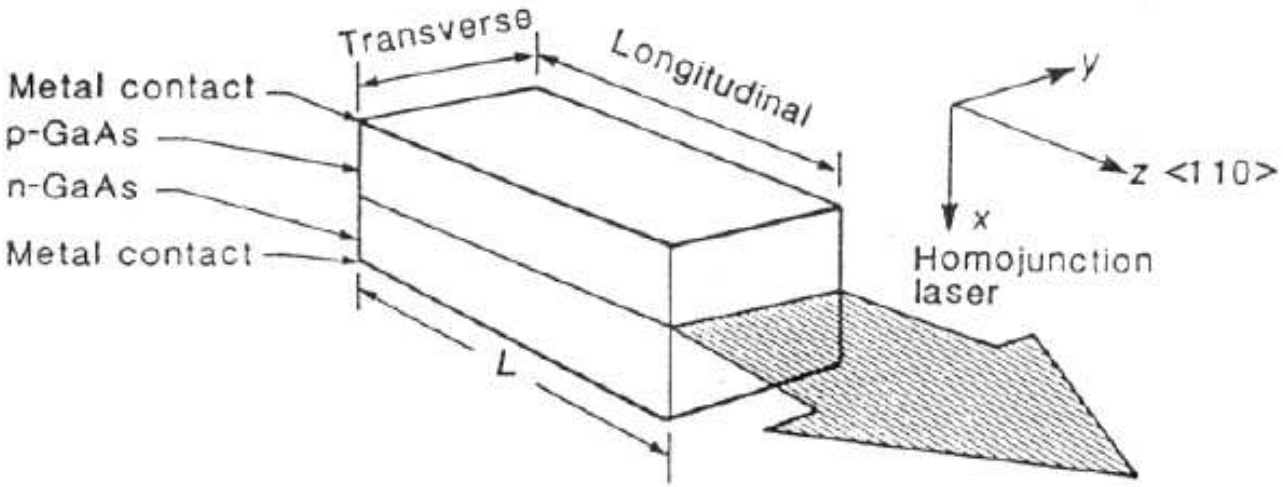
1., Nagy mennyiségű elektron-lyuk pár jelenléte.

Mindkét oldalon nagyon erősen adalékolt (elfajult) direkt tiltott sávú félvezetőből készült pn dióda.

2., Nagy mennyiségű adott energiájú (hullámhosszú) foton jelenléte.

Visszacsatolás Fabry-Perot rezonátor segítségével: matt oldallapok, hasított, féligáteresztő tükör véglapok. Rezonancia a véglapok között, fényemisszió a véglapokon át. A rezonátor (a csip) hossza 300-500 μm.





GaAs lézerdióda működési elve és felépítése

A lézerek jellemzői és alkalmazása

1. Monokromatikus - egyszínű ($\Delta\nu \approx$1-2 Hz)
2. Rövid impulzusok állíthatók elő (t_{min}=6 fs)

Alkalmazás: - szerves és szervetlen kémia
- biológia, orvostudomány (kötések felépítése és bontása)
- üvegszálas távközlés

3. Kis divergenciájú - kis széttartás (Föld – Hold sugár d=30 m)

Alkalmazás: - geodéták (iránykijelölés)
- optikai írók, olvasók, lézerprinter
- katonai felhasználás (fegyverek)

4. Nagy intenzitású

Alkalmazás: P=0,1-1 mW - lézer mutató pálca
P=100 mW - 1 W - kisebb műtéteknél
P=50 W - 10 kW - ipari lézer
P>10 kW - katonai lézerek
Extreme Light Infrastructure (ELI) - P>10^{23} W/cm^2
Világcsúcs: 1250 TW

5. Koherens - interferenciára képes, azonos frekvenciájú, irányú, fázisú és polarizációjú fotonok alkotják

Alkalmazás: - hologram

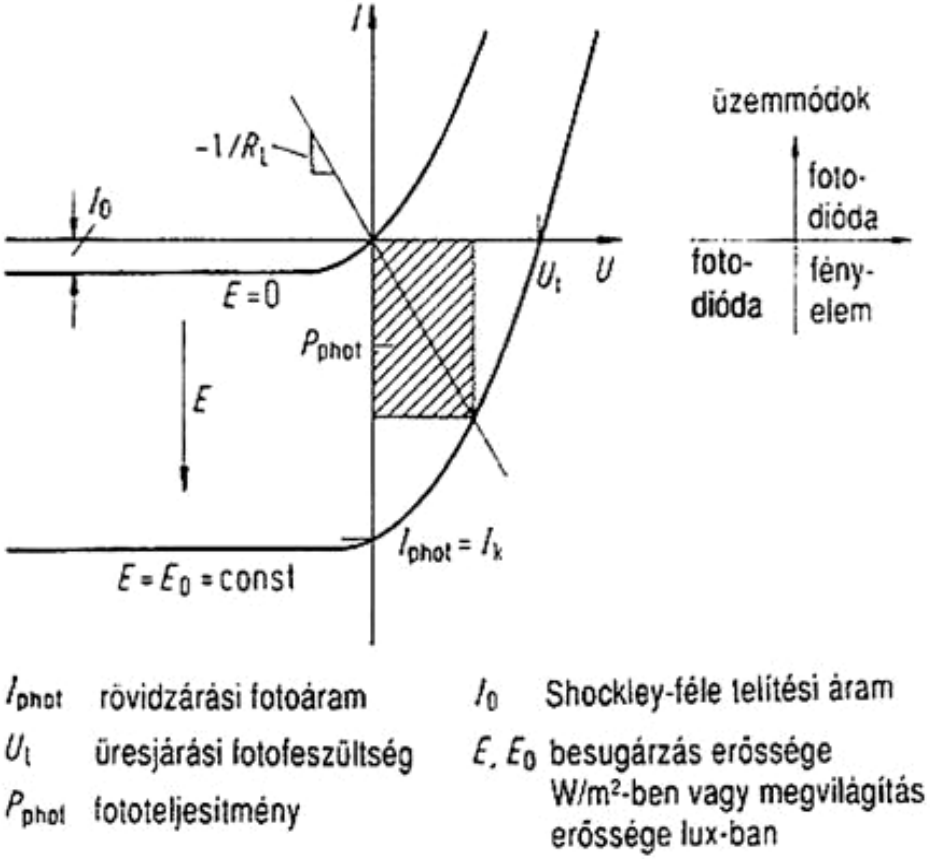
Fotodetektorok

Fotorezisztor

Ha a beeső fotonok energiája eléri vagy meghaladja a tiltott sáv szélességét, elektron-lyuk párokat generálnak - nő a vezetőképesség.

Fotodiódák

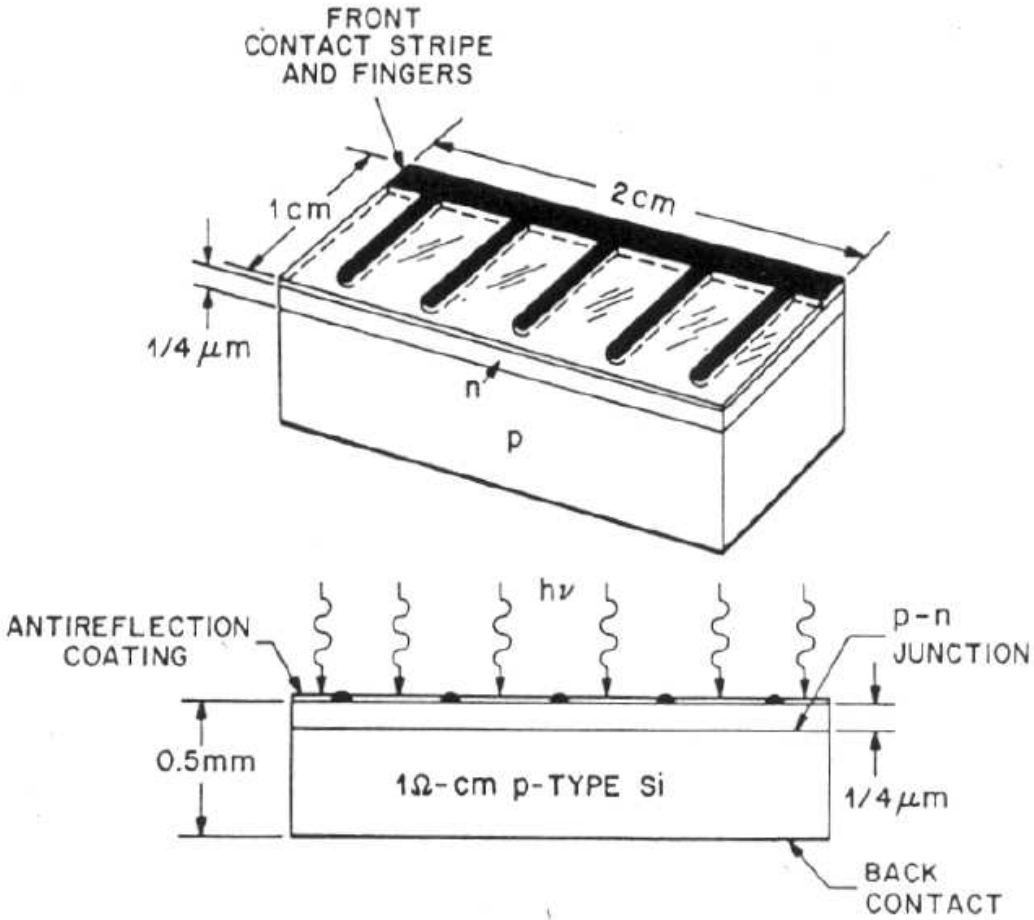
Ha a beeső fotonok olyan tartományban abszorbeálódnak, ahol beépült vagy rákapcsolt elektromos tér van, az elektron-lyuk párok szeparálódnak, a diódában fotoáram indul meg (fotodióda) ill. külső feszültség nélküli állapotban feszültség lép fel a sarkain (fényelem).

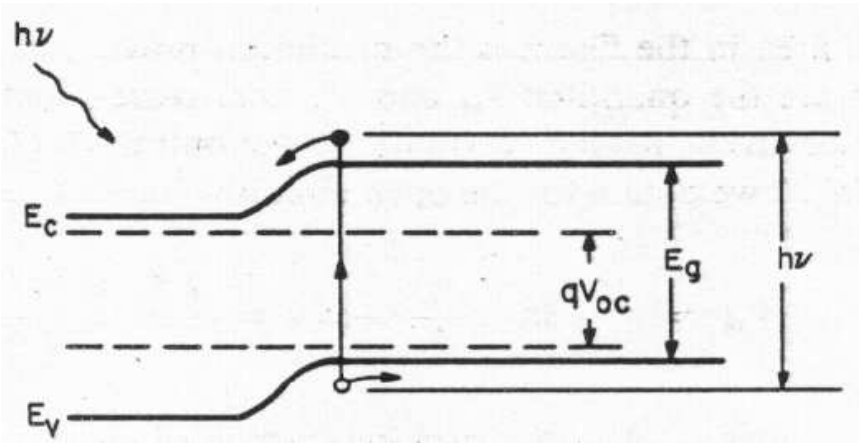


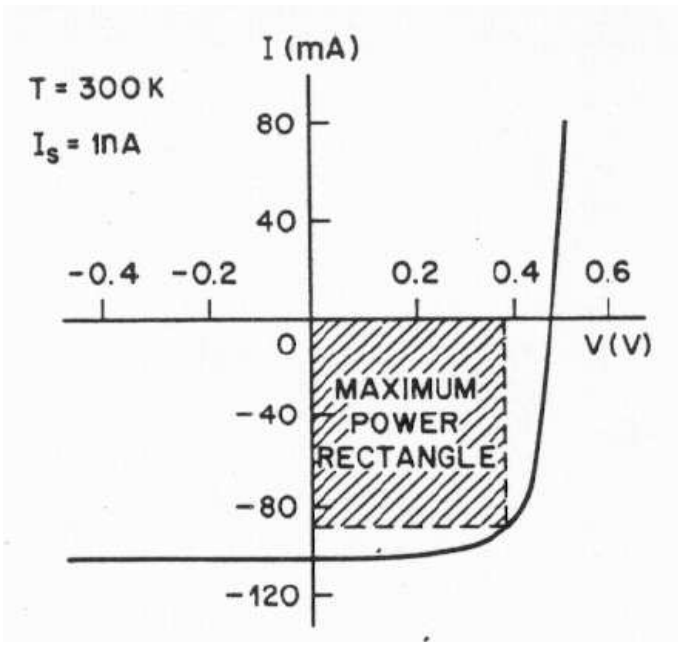
Megvilágítás hatására az áram-feszültség karakterisztika eltolódik

Napelemek

Cél: a beeső napenergiát elektromos energiává alakítani - lehetőleg minél szélesebb hullámhossztartományban.
Működési elv: elektron-lyuk pár keltés a p-n átmenetben - az elektromos tér hatására szeparálódnak.







Fejlesztési irányok

Két fejlesztési irány:
- nagy hatásfokú napelemek az űrkutatás és űrtávközlés számára - vegyületfélvezetők, tandem napelemek - drágák
- kis hatásfokú olcsó napelemek földi használatra - vékonyréteg napelemek

Űrtávcső elektronikájának táplálása napelemekkel

Vékonyréteg napelemek

Amorf vagy multikristályos rétegek (Si, SiGe, $CuInSe_2$, $CuInGaSe_2$, CdS, CdTe) fémen, műanyagon, üvegen. Olcsó, de öregszik (környezeti hatások). Az amorf anyag változik a fény hatására. Szerves félvezetőkből is.

4., A digitális technika alapjai

A logikai áramkörök elve

Digitális technika – logikai áramkörökön és hálózatokon alapszik, melyek kétállapotú elemek kombinációi.

A legegyszerűbb kétállapotú elem a kapcsoló. Ha a bemenetére feszültséget (jelet) kapcsolunk, és a kapcsoló nyitott, van jel a kimenetén, ha zárt, nincs jel a kimenetén. Ez a kimenet két logikai állapotának felel meg, amit a digitális technikában „1”-gyel és „0”-val jelölnek.

Ez a kettes számrendszer felhasználásával lehetővé teszi
- matematikai műveletek végzését,
- tetszőleges információ kódolását, feldolgozását és tárolását és
- logikai műveletek végzését.

A logikai szintek további jelölései:

- „magas” és „alacsony” („High” és „Low”: „H” és „L”),
- „igaz” vagy „hamis” („True” és „False”).

Boole algebra

A logikai műveletek algebrája, különbözik a szokásos matematikai algebrától.

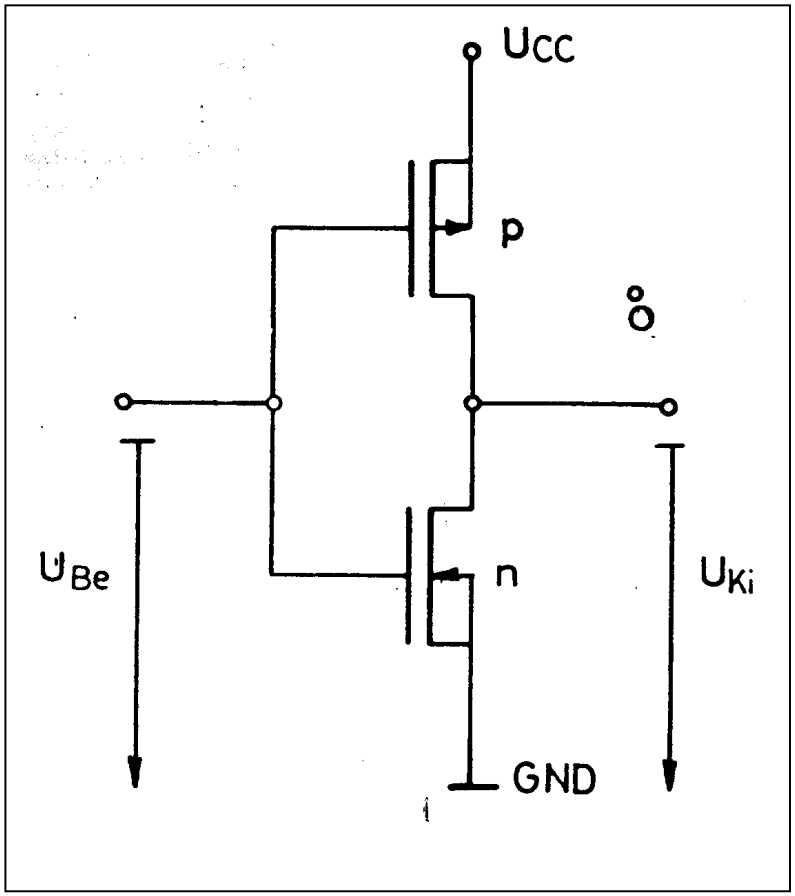
Alapműveletek:
AND (ÉS) – logikai szorzás: $A \cdot B$: $1 \cdot 1=1$, $1 \cdot 0=0$, $0 \cdot 1=0$, $0 \cdot 0=0$
OR (VAGY) – logikai összeadás: $A+B$: $1+1=1$, $1+0=1$, $0+1=1$, $0+0=0$
NOT (NEM) – logikai negáció (invertálás): $\overline{A}$: $\overline{1}=0$, $\overline{0}=1$

Kisegítő műveletek:
NAND - logikai szorzás és invertálás: $\overline{A \cdot B}$: $\overline{1 \cdot 1}=0$, $\overline{1 \cdot 0}=1$, $\overline{0 \cdot 1}=1$, $\overline{0 \cdot 0}=1$
NOR– logikai összeadás és invertálás: $\overline{A+B}$: $\overline{1+1}=0$, $\overline{1+0}=0$, $\overline{0+1}=0$, $\overline{0+0}=1$

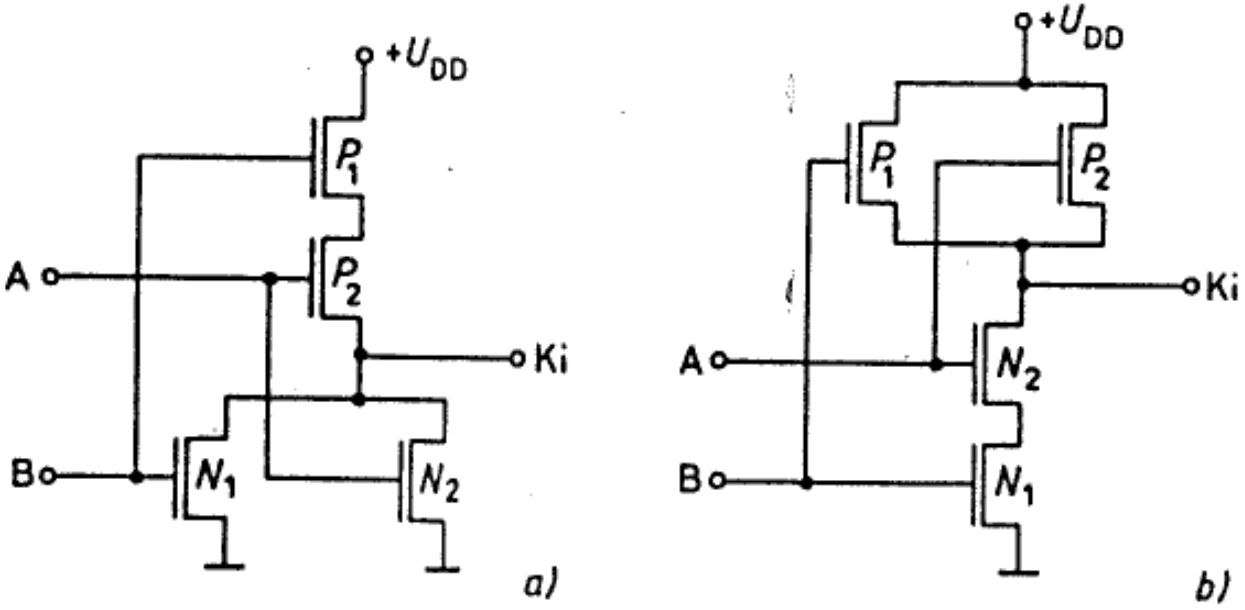
5., CMOS megvalósítás

Inverter

Ha U_{Be}=1, az alsó tranzisztor nyitott, a felső zárt, U_{Ki}=0.
Ha U_{Be}=0, az alsó tranzisztor zárt, a felső nyitott, U_{Ki}=1.



NOR és NAND kapu



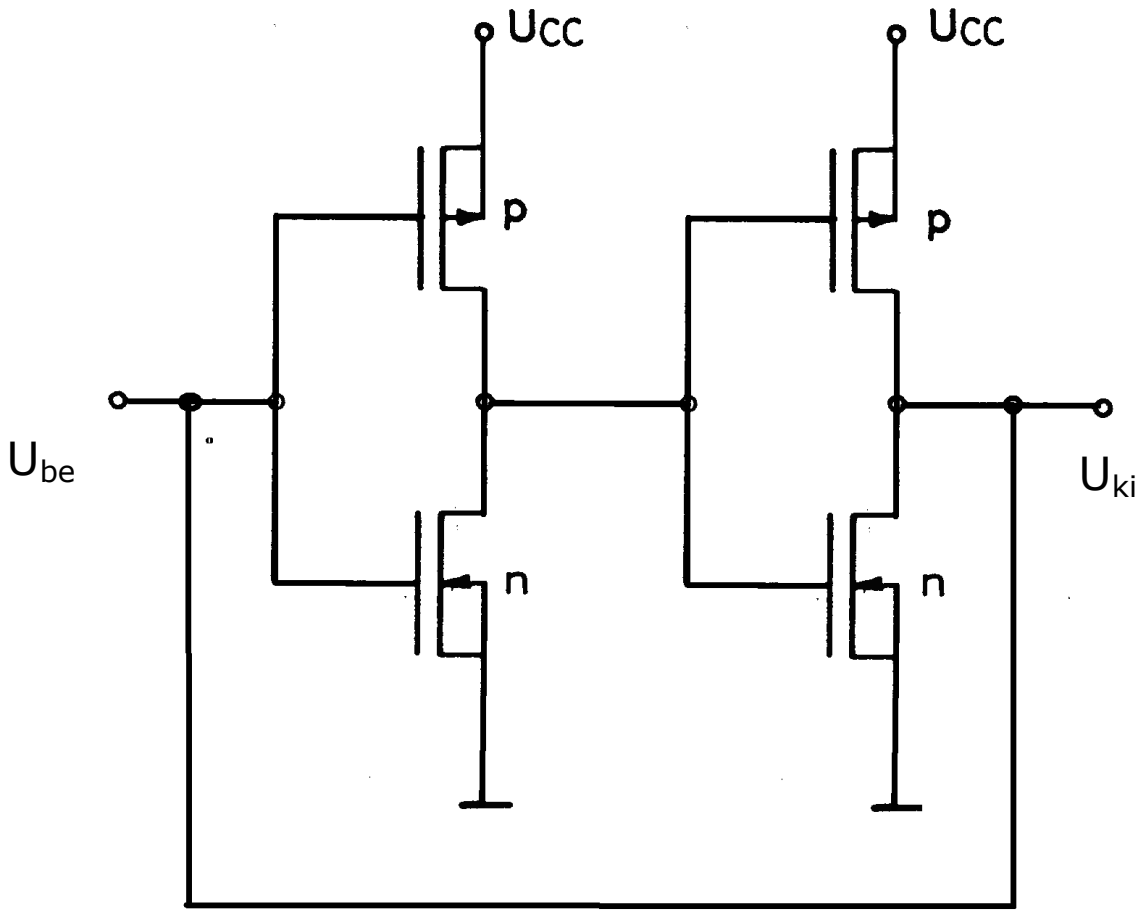
Kétbemenetű NOR (a) és NAND (b) kapu

NOR kapu: ha bármelyik bemeneti jel 1, az egyik alsó tranzisztor nyitott és az egyik felső tranzisztor zárt: 0 a kimeneti jel. A kimeneti jel csak akkor 1, ha mindkét bemeneti jel 0.

NAND kapu: ha bármelyik bemeneti jel 0, az egyik alsó tranzisztor zárt és az egyik felső tranzisztor nyitott: 1 a kimeneti jel. A kimeneti jel csak akkor 0, ha mindkét bemeneti jel 1.

Több bemenettel is megvalósítható.

Az információ tárolás elve



Flip-flop: a visszacsatolás stabilizálja az áramkör állapotát, megőrzi a beírt jelet.

6., Tudományos, technikai és társadalmi hatások

A bipoláris tranzisztor felfedezése (Walter Brattain, John Bardeen, William Shockley, 1947) és a félvezető eszközpark és az integrált áramkörök gyors fejlődése tette lehetővé a többi tudományág és a technika rohamos fejlődését a XX. század második felében:
- fizika: részecskegyorsítás, mikroszkópia, csillagászat, űrkutatás, NMR
- kémia: molekulaszintézis, kötési folyamatok vizsgálata
- biológia: DNS feltérképezése
- technika: vezérlés, jelfeldolgozás, (űr)távközlés

Hatalmas hatás a mindennapi életre is:
- számítógép, mobiltelefon, internet, GPS

de
- az emberi kapcsolatok lazulása (gyerekek, fiatalok)
- fokozottabb kiszolgáltatottság (bankkártya, lehallgatás, ...)

Fejlődés?

Meg kell(ene) tanulni, tanítani az új technikai eszközökkel való bánásmódot. A szakemberek felelőssége?

Nem az eszközök és a környezet teszik boldoggá az embert.