

# A jövő anyaga: a szilícium

Az atomoktól a csillagokig  
2011. február 24.

## Szilícium: mindennapjaink alapvető anyaga

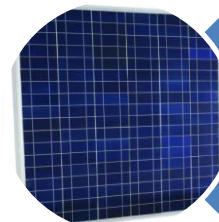
- A szilícium-alapú technológiák mindenütt jelen vannak
- Mikroelektronika
  - Számítástechnika, mobil eszközök: legfontosabb alkatrészeik a mikrocsipek, ezek nélkül nem is létezhetnének
  - Egyéb alkalmazások: léteztek a mikroelektronika előtt is, mára azonban szinte mindegyikben találunk különféle mikrocsipeket
- Napelemipar



Számítógépek, mobil eszközök, stb.

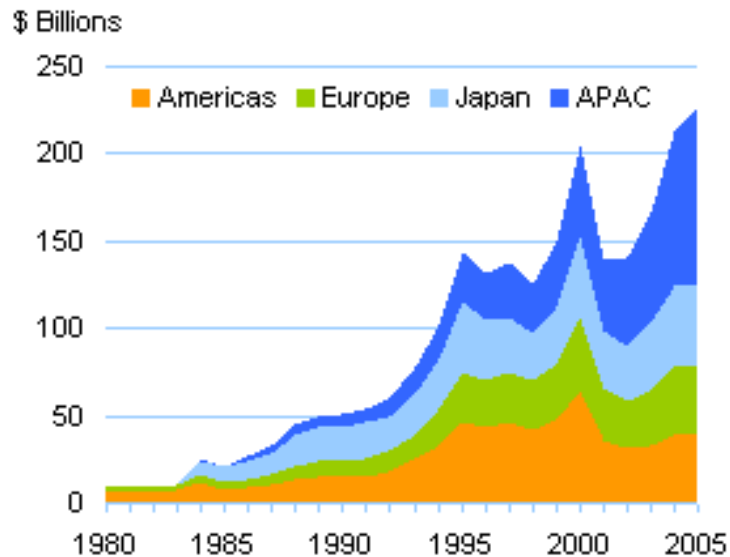


Ipari berendezések, közlekedés, orvosi eszközök, szórakoztató elektronika, stb.

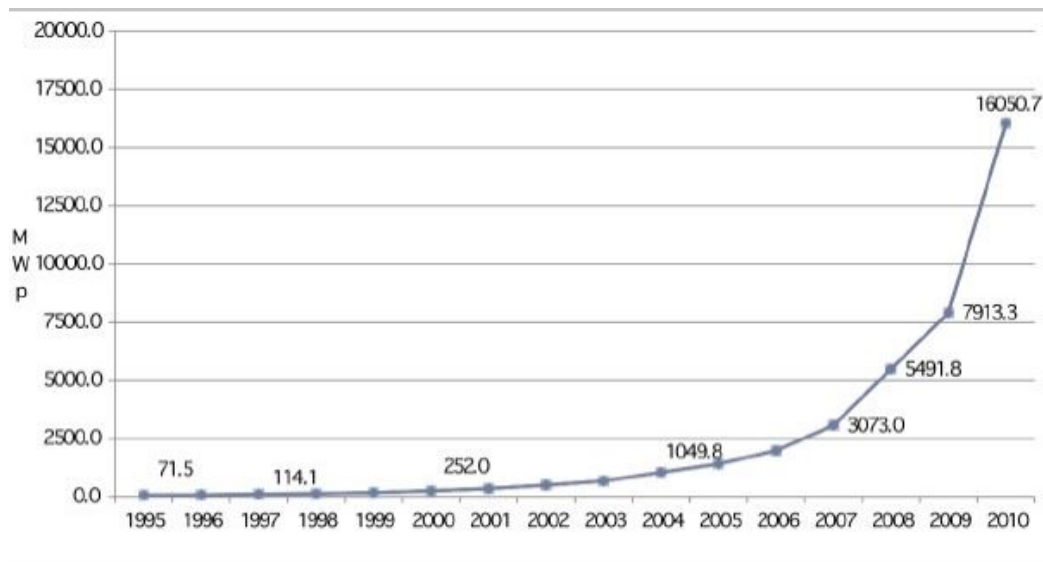


Napelemek

## A szilícium-alapú iparágak fejlődése



Félvezető-ipari eladások: jól látható a „dotkom-csőd”, illetve az egyes új alkalmazások terjedése (PC-k a 90-es években, mobil eszközök a 2000-es évektől)

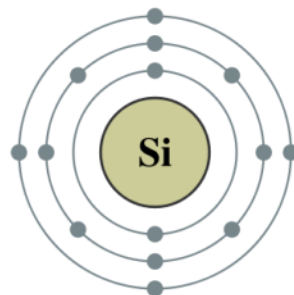


Telepített napelem-kapacitás

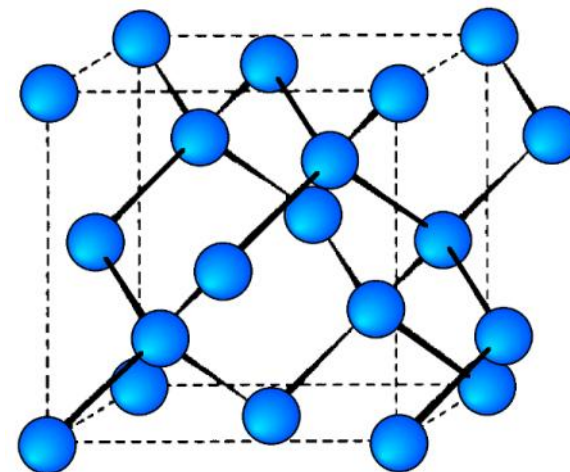
## A legelterjedtebb félvezető: a szilícium

Rendszám	14
Főcsoport	IV.
Elektron-szerkezet	$3s^2 3p^2$
Kristályrács	Köbös (gyémánt)
Gyakoriság a földkéregben	27,7 %

14: Silicon



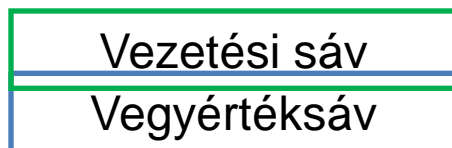
2,8,4



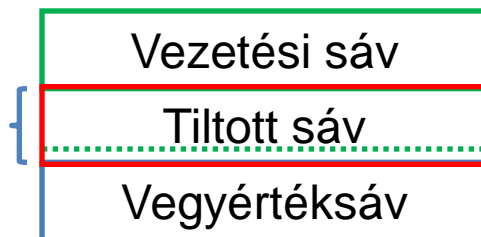
- Si: 4 vegyértékelektronnal rendelkezik
- Vezetőképesség megváltoztatása: 3 vagy 5 vegyérték-elektronnal rendelkező szennyező atomok kontrollált hozzáadásával (dópolás)
  - 5 vegyértékelektron: n-típus, elektrontöbblet a Si-hez képest, az elektromos vezetésben az elektronok fogják a döntő szerepet játszani
  - 3 vegyértékelektron: p-típus, elektronhiány a Si-hez képest, az elektromos vezetésben a lyukak (elektronhiányos helyek) fogják a döntő szerepet játszani

## A mikroelektronika alapja: a félvezető

- Félvezető: tiszta állapotban a fémeknél jóval nagyobb fajlagos ellenállású anyag, amely megfelelő kontrollált szennyezéssel a kívánt mértékben vezetővé tehető
- A viselkedés oka: sávszerkezet



Vezető:  
töltéshordozók  
jutnak a vezetési  
sávba



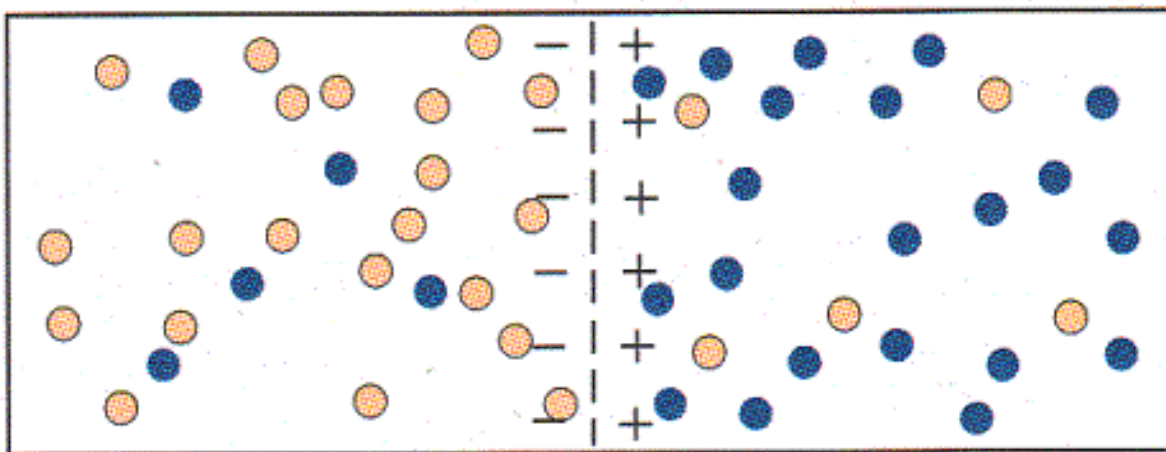
Félvezető: a tiltott sáv  
szobahőmérsékleten  $\sim kT$   
energiájú, és szennyezéssel  
megengedett állapotok  
hozhatóak létre



Szigetelő: nem jut  
szabad  
töltéshordozó a  
vezetési sávba

## A p- és n-típusú szilícium

- – elektronok
- + lyukak



p-típusú:  
lyukak, mint  
töltéshordozók

p-n átmenet

n-típusú:  
elektronok, mint  
töltéshordozók

A félvezetők óriási előnye: azonos alapanyagból készíthető p- és n-típusú félvezető is, sőt, megfelelő technikával ezek akár egymás mellett is létrehozhatóak.

## A mikroelektronikai gyártástechnológia



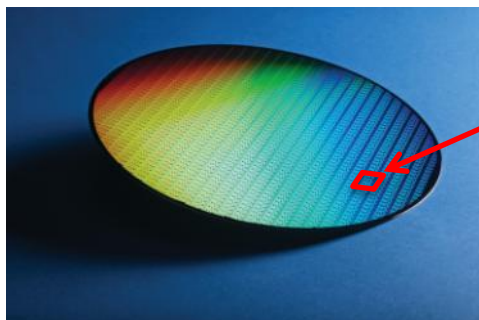
Szilícium nyersanyag



Szilícium egykristály és szelet



Tranzisztorok, memóriák, más struktúrák kialakítása



Struktúrált szilícium szelet: sok eszköz ugyanazon a szeleten

Egy mikrocsip a szilícium-szeleten, akár többtízmillió tranzisztorból is állhat



Egyesével tokozott mikrocsipek, és más félevező eszközök

## A szilícium-dioxid

- $\text{SiO}_2$ : Számos formában létezik a természetben is (több, mint 15 féle kristályszerkezetet képes kialakítani)
- Régi ipari alapanyag, kristályos és amorf változatait is használják
- Szigetelő
- A szilícium-szeleten egyszerűen, jó minőségben alakítható ki
- A félvezető eszközök működéséhez szükséges szigetelő rétegek könnyen elkészíthetőek
- Az alternatív anyagok esetén ez jóval bonyolultabb eljárást igényelhet



Kvarc: hatszöges  $\text{SiO}_2$  kristály



Homok: kvarc szemcsék és egyéb szennyeződések



Üveg: amorf  $\text{SiO}_2$

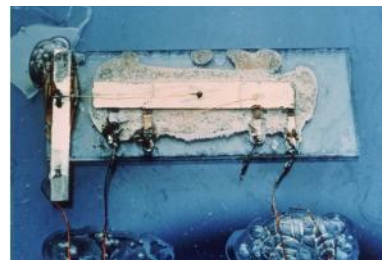


$\text{SiO}_2$  bevonatú, 450mm átmérőjű Si szelet

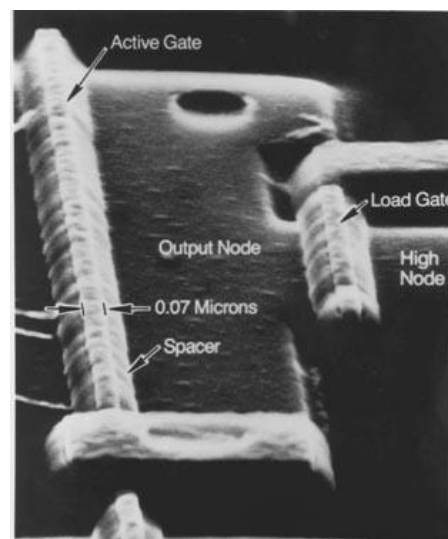


## A legegyszerűbb félvezető eszközök

- Dióda: egy p és egy n réteg egymás mellé helyezve
- Tranzisztor: pnp vagy npn szerkezet, használható
  - Teljesítmény-erősítésre
  - Logikai egységként
    - A két elektróda között folyó áram a harmadikkal vezérelhető
    - Logikai kapuként használható
- Sok tranzisztor egymás mellé helyezésével bonyolult számítógép készíthető
- A tranzisztorokat nem egyesével alakítják ki, hanem egy szilícium szeleten készítik el egyszerre a mikrocsip összes alkatrészét: **integrált áramkör (IC).**

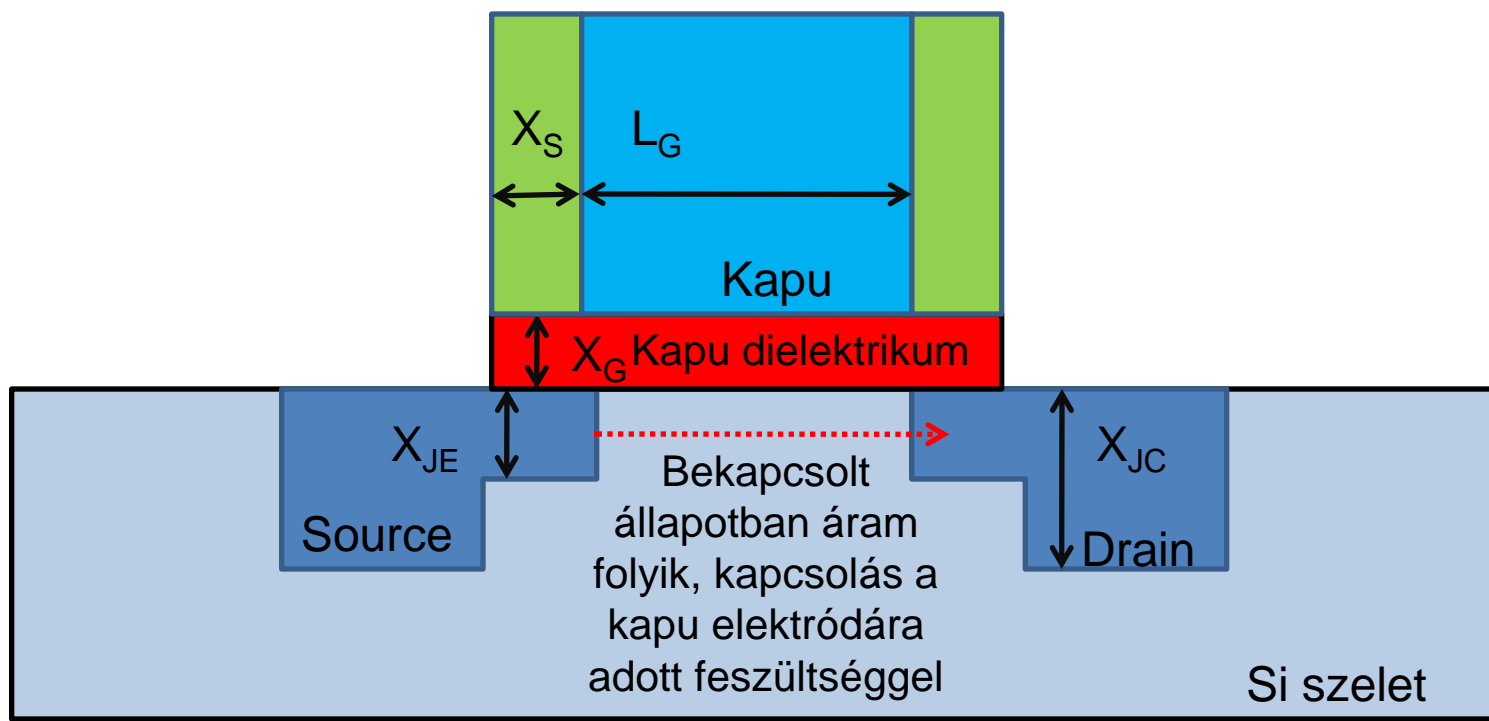


A világ első IC-je (1958)

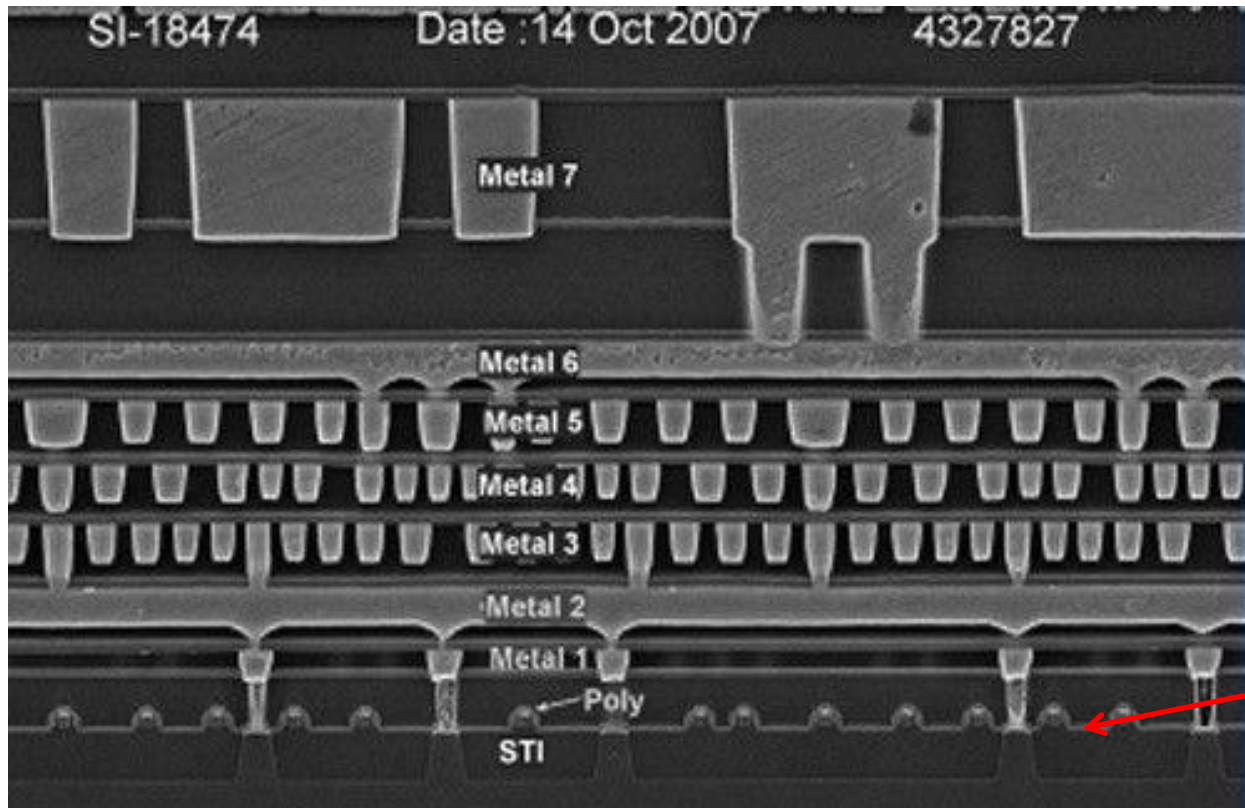


Modern tranzisztor SEM képe

## A legelterjedtebbek: CMOS és MOSFET tranzisztorok



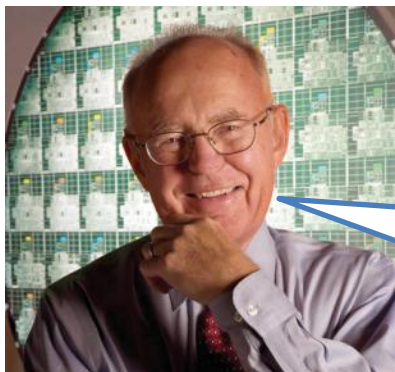
## Az integrált áramkörök felépítése



Az egyes tranzisztorokat összekötő 3 dimenziós réz vezetékrendszer (interconnect) rétegek, közte szigetelő réteg

Kapu dielektrikum  
Tranzisztorok rétege

## Mikroelektronikai trendek: miniatürizálás



Gordon Moore, az Intel egyik alapítója

Az egy integrált áramkörre azonos költséggel elhelyezhető tranzisztorok száma körülbelül 2 évente megduplázódik.



1971

- Tipikus méret: 10  $\mu\text{m}$
- Pókfonal:  $\sim 5 \mu\text{m}$



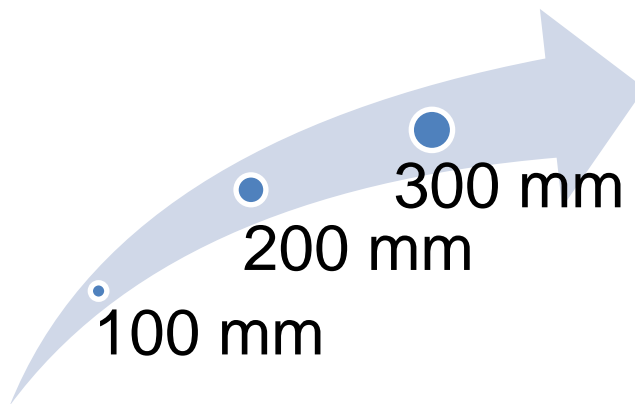
2015

- Tipikus méret: 11 nm
- A DNS 1 menete: 3,4 nm

## Mikroelektronikai trendek: méretnövekedés!



50 mm



450mm „családi pizza méret”

A gyártáshoz felhasznált szilícium szelet mérete egyre nagyobb!

## A mikroelektronikai fejlesztések céljai

- „More Moore”: a hagyományos alkalmazások (mikroprocesszor, memória) fejlesztése
  - Gyártástechnológiai kihívás
    - Kisebb, gyorsabb, hatékonyabb eszközök fejlesztése
    - Miniatürizálás + több eszköz nagyobb szeleten: költségcsökkentés
- „More than Moore”: a mikroelektronikai eszközök integrálása más technológiákkal, speciális célú integrált áramkörök kialakítása
  - Képképzés
  - Analóg jelek érzékelése és feldolgozása
    - Hang, gyorsulás, erő, érintés, stb.
  - Rádiós technológiák
  - Biotechnológiák
  - Gyártástechnológiai kihívás: a jól bevált CMOS-tól eltérő szerkezetek kialakítása

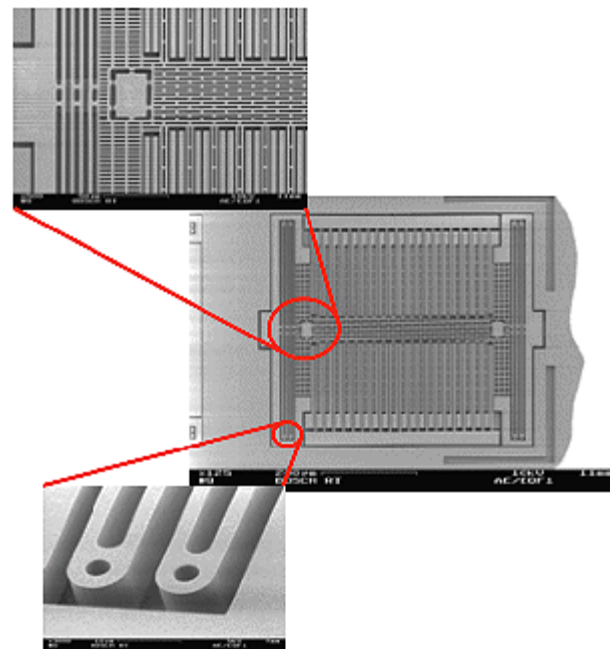
## Miniatürizálás: minden eddiginél tisztább anyagok

- A tipikus szennyezők és hibák összemérhetőek lennének a gyártandó struktúrák méretével
- Szilícium: extrém tisztaságban állítható elő
- $10^8$  vasatom/cm<sup>3</sup> szennyezés
- Si atomok száma:  $4,8 \cdot 10^{22}$  atom/cm<sup>3</sup>
- Minden 10000000000000000. Si-atomra jut egy vas-atom
- Így aránylik a zsebünkben lévő aprópénz a világon 2010-ben megtermelt összes jövedelemhez!



## Új gyártástechnikák: mikromegmunkálás

- MEMS: mechanikai és más analóg jeleket érzékelő, de tisztán mikroelektronikai eszközök
- Nincs szükség a hagyományos mechanikus és elektronikus alkatrészekre
- Kicsi, kompakt, hibátűrő eszköz
- Felhasználás: mindenütt, ahol szenzorokra van szükség
- Szilíciumból egyszerűen elkészíthető
- Felfutóban lévő üzletág, a jövőben egyre több helyre kerülnek ilyen eszközök
- Nemcsak a legfejlettebb 4-5 gyártó képes előállítani

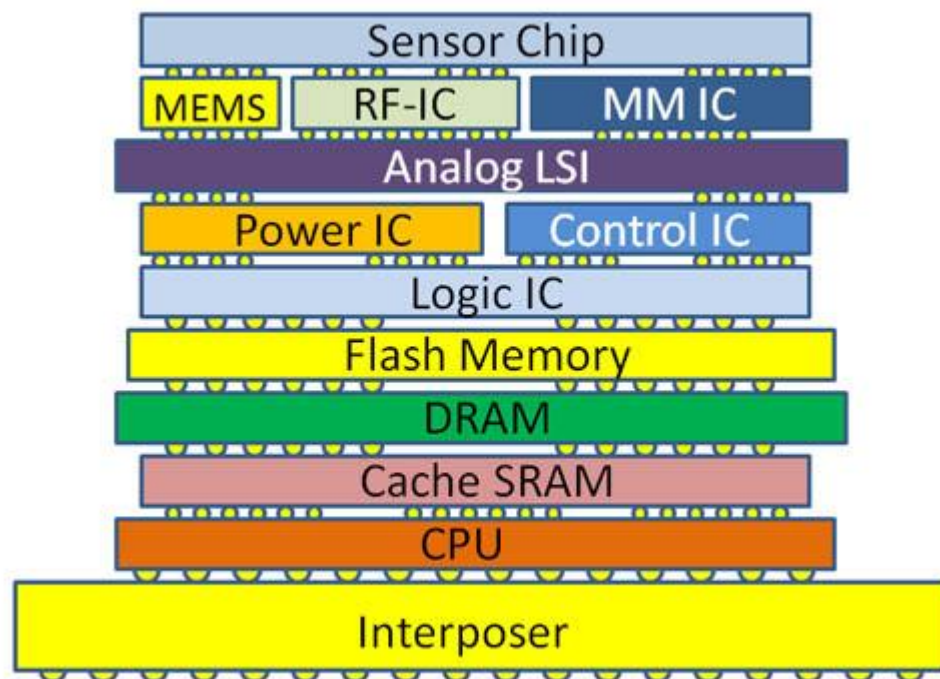


MEMS gyorsulásmérő: a felső képen kinagyított próbatömeg erő hatására elmozdul, ezt a párhuzamos szeletekből álló tartóstruktúra kapacitás-változása jelzi



## Újfajta eszközök: SiP és SoC

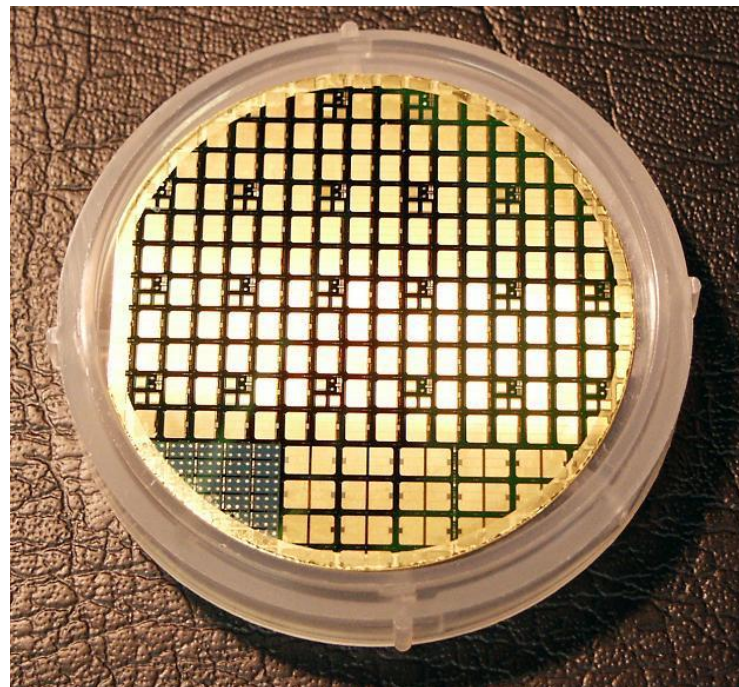
- Cél: nem egy darab, egyre kisebb és kisebb méreteket igénylő integrált áramkör segítségével megvalósítani a feladatot, hanem több, egyszerű részegység összekapcsolásával komplex, minden feladatot ellátó rendszert megvalósítani
- SiP: System in package, egy tokban több különálló, egymással összekötött chip
- SoC: System on chip, egy szeleten több, önálló funkciójú rész
- Új gyártástechnológiák: 3D integráció
- Si és egyéb technológiák is párosíthatóak



Érzékelőt, memóriát, és minden szükséges más áramkört tartalmazó elrendezés

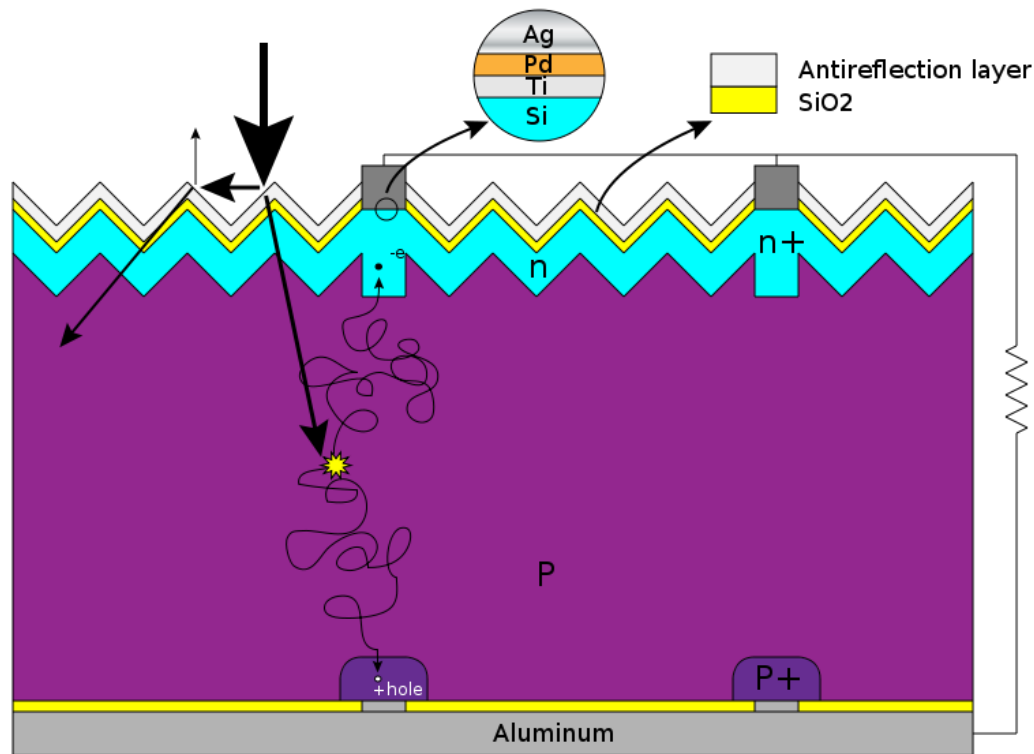
## A szilícium alternatívái

- Az alternatív anyagok mindig jelen voltak a félvezetőiparban
- Gyártástechnikai szempontból rosszabbak a szilíciumnál
  - Nem készíthető elég nagy szelet, ez költségnövekedéshez vezet
  - Nem készíthető elég tiszta tömbi alapanyag, ezért drága rétegnövesztési eljárások szükségesek
  - Ritka, drága alapanyagok szükségesek, ezért Si hordozó alkalmazása szükséges
  - Nehezebb a dielektrikum rétegek kialakítása
- Speciális alkalmazásokra használatosak, pl.
  - SiC: nagy hőmérsékletű, nagy teljesítményű alkalmazások
  - GaN réteg: LED
  - Ge, GaAs, InGaAs, stb.



SiC szelet rajta kialakított félvezető eszközökkel

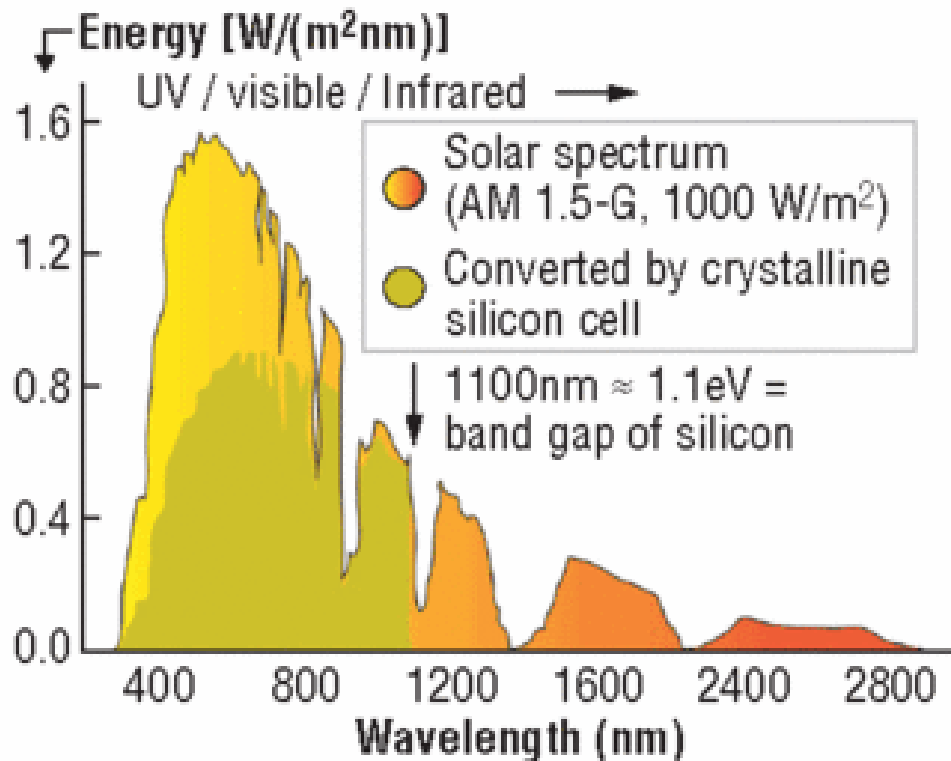
## Szilícium: tiszta energiaforrás



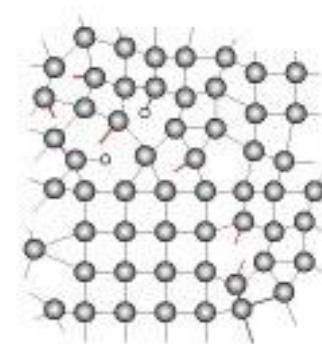
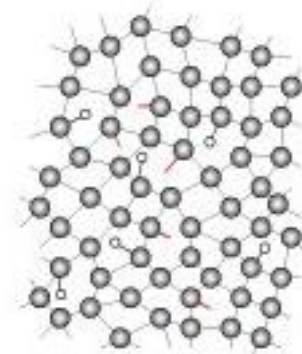
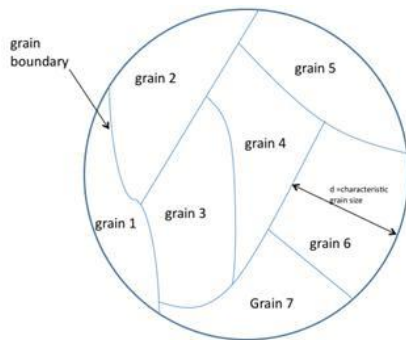
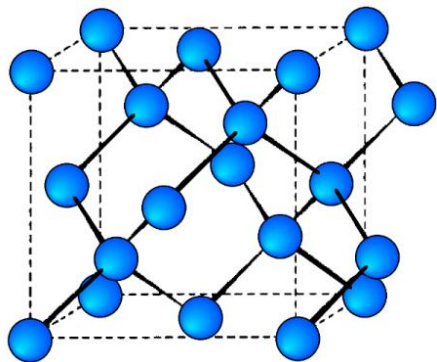
- Napelem: nagy felületű p-n átmenet
- Felület: érdesített, antireflexiós bevonattal ellátott, hogy a lehető legtöbb fényt elnyelje
- A fény fotonjai töltéshordozó-párokat gerjesztenek, amelyek az elő- és hátoldali kontaktusokon megjelenve feszültséget adnak

## A napenergia jó hatásfokú hasznosítása

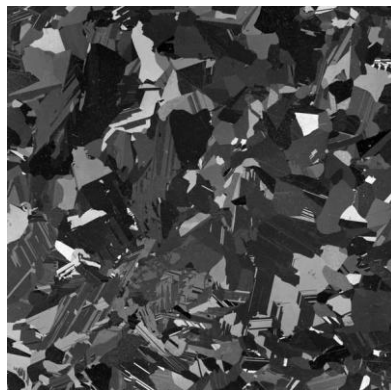
- A nap spektruma nem egyenletes minden hullámhosszon
- A napelem csak azt a napfényt tudja elektromos energiává alakítani, amelynek energiája elegendő töltéshordozó-párok gerjesztéséhez
- Ez az energia Si esetén  $\sim 1100\text{nm}$  hullámhosszú, vagy annál rövidebb fénnel valósul meg
- A nap spektrumának megfelelő része Si napelemmel hasznosítható
- Kedvező, hogy a napsugárzás teljesítményének jelentős része ebbe a tartományba esik



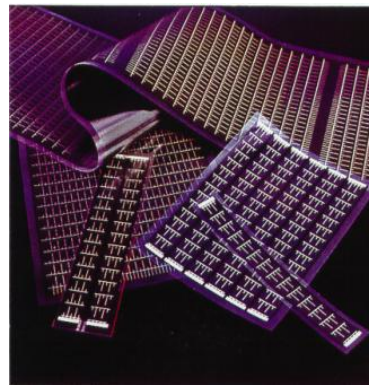
## A szilícium megjelenési formái a napelemekben



Egykristály



Multikristályos



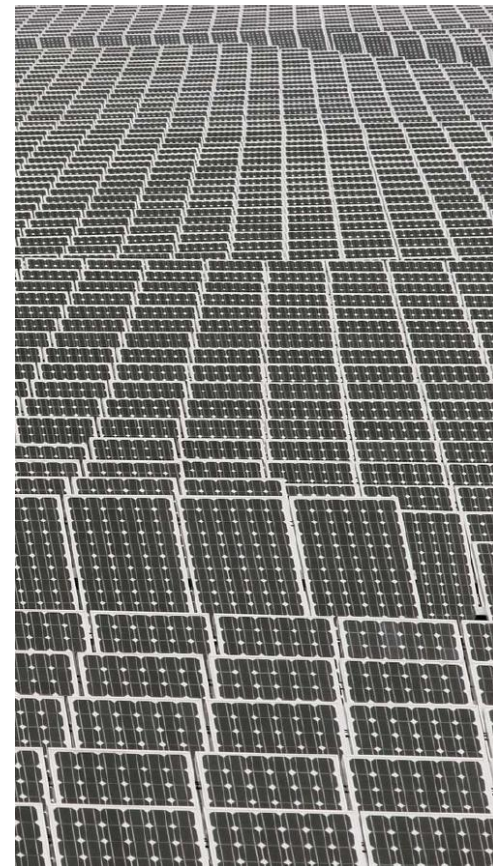
Amorf



Mikrokristályos

## A szilícium-alapú napelem tulajdonságai

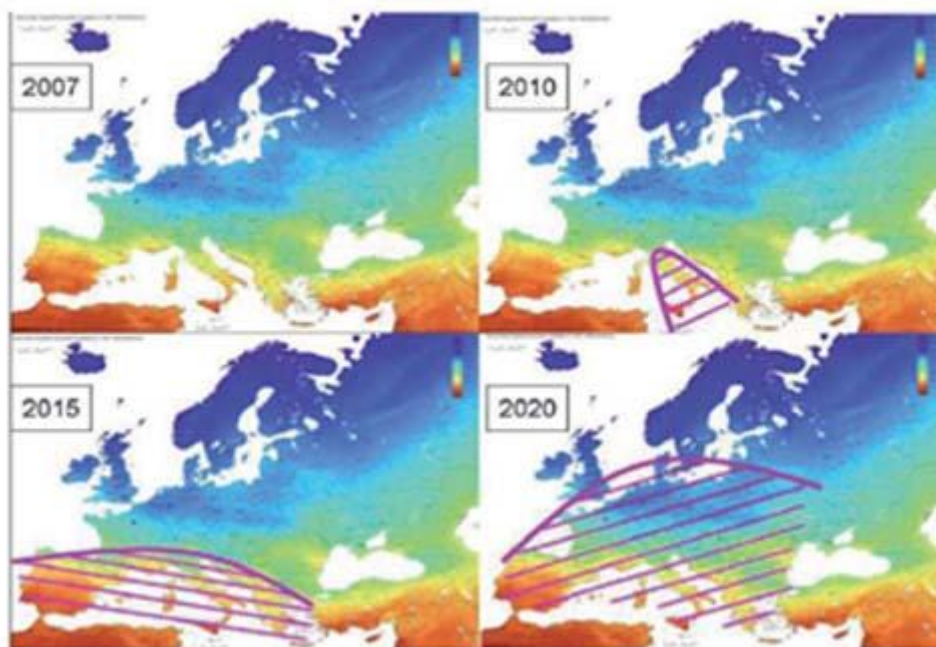
- Napelemipari szilícium
  - Nem félvezetőipari tisztaságú
  - Nem feltétlenül kell, hogy egykristály legyen
  - Nagy tömegben gyártható, nem kell bonyolult növesztési eljárás
  - Olcsó
- Szilícium-alapú gyártástechnológia
  - Nagy tapasztalat (a félvezetőiparból is ered)
  - Egyszerű: a legegyszerűbb gyártási folyamatban az alapanyagtól a késztermékig 7-8 lépés elegendő
  - Stabil, megbízható
- Tipikus termékek:
  - Multikristályos Si napelem: ~12-14% hatásfok, rekord: ~20%
  - Egykristály Si napelem: ~16-17% hatásfok, rekord: ~25%



## A napelemipar fejlődése

- Cél: a napenergia ára (beleértve a napelem gyártásának, telepítésének, üzemeltetésének költségeit) azonos a többi energiaforrással: „grid parity”
- Lehetőségek:
  - A jelenleginél drágább, de sokkal jobb hatásfokú napelemek
  - A jelenleginél rosszabb hatásfokú, de sokkal olcsóbb, tömegesen és nagy felületre telepíthető napelemek.
  - A lényeg mindkét esetben az optimális ár / teljesítmény arány
- A „Szent Grál”: 1 EUR / Wp ár / teljesítmény arányú napelem
- Jelenleg ehhez a kristályos Si alapú napelemek vannak a legközelebb
- A piac 85%-a: hagyományos, egyszerű gyártástechnikával készülő kristályos Si napelem.

Grid Parity of PV electrical energy, geographically



## Alternatív technológiák a napelemiparban

- Fejlett kristályos Si technológiák
  - Nagy hatásfokú kristályos Si napelemek: jó minőségű alapanyagok, félvezetőipari gyártástechnológiák átvétele
  - Koncentráló rendszerek: a fényt a napelemre gyűjtő optikai elrendezések
  - Elvárás: nagyobb hatásfokú, de drágább napelem
  - Az eredmény a jelenlegi technológiákkal túl drága!
- Vékonyréteg-technológiák
  - Néhány  $\mu\text{m}$  vastag aktív réteg üveg vagy fólia hordozón
  - Párolgatótással nagy felületen, olcsón gyártható
  - Elvárás: olcsó, kis hatásfokú napelem, amely akár ablakokra és más nagy felületekre is telepíthető
  - Az aktív réteg anyaga szerint több fajta lehet: kadmium-tellurid, amorf szilícium, réz-indium-gallium-diszelenid, organikus / polimer, stb.
  - Az eredmény a jelenlegi technológiákkal nem elég jó minőségű (egy kivétel: CdTe)!



## Összefoglalás

- „Jósolni nehéz, különösen a jövőre vonatkozóan.” – Mark Twain
- Szilícium: számos szempontból jobb az alternatív technológiáknál
  - Bőségesen rendelkezésre áll
  - A többi anyagnál jelentősen olcsóbb
  - Az emberiség jelentős gyártástechnológiai tapasztalatot halmozott fel
  - Az egyes gyártási lépések folyamatos korszerűsítésével a Moore-törvény fenntartható
  - Az új, „More than Moore” alkalmazások számára a szilícium még mindig optimális
- A következő évtized anyaga még biztosan a szilícium