



Anyagismeret

Vezetési tulajdonságok

Ötvözetek, félvezetők

Dr. Mészáros István Attila

1

1

Elektromos vezetési tulajdonságok

Vezetési jelenségek (transzportfolyamatok)
fenomenologikus leírása

Termodinamikai hajtóerő:

kémiai potenciál különbség: $\Delta \frac{\delta F}{\delta x}$ $F = U - TS$

Egyensúlyban lévő rendszer esetén: $\frac{\delta F_1}{\delta x} = \frac{\delta F_2}{\delta x}$

Elektromos vezetés: külső $E \Rightarrow$ töltéstranszport

$j = \sigma \text{ grad } U = \sigma E$

2

$$j = \sigma \frac{dU}{dx} - \frac{1}{q} \sigma \frac{dW_F}{dx} - \sigma \cdot S \frac{dT}{dx}$$

$$j = \sigma \cdot \text{grad}U - \frac{1}{q} \sigma \cdot \text{grad}W_F - \sigma \cdot S \cdot \text{grad}T$$

Diff. Ohm törvény **Kontakt potenciál** **Peltier-hatás**
Seebeck-hatás

Potenciál gradiens

Fermi-szint gradiens
 (anyagminőség változás)
fém-fém (hőelem)
pn-átmenet
Schottky-átmenet

Hőmérséklet grad

3

Elektromos- és hővezetés kapcsolata

Franz - Wiedmann törvény
 (főként egyvegyértékű fémekre)

$L = 2,44 \cdot 10^{-8} \Omega W/K^2$ Lorentz-szám

$$L = \frac{\kappa}{\sigma \cdot T}$$

$$\kappa = L \sigma T$$

$$T = \text{állandó}$$

$$\kappa = \text{konst} \cdot \sigma$$

Transzportban részvevő részecskék:

Elektromos vezetés: Szabad elektronok

Hővezetés: Szabad elektronok
 Fononok (rácshézag kvantum)

Kivételek: a kovalens kötésű kristályok (gyémánt, zafir...)

4

Elektromos vezetési folyamatban töltést továbbító (elmozdulni képes) részecskék:

| | | |
|-------------------|--|--|
| Vezetők | fémek ötvözetek elektrolitok plazma áll. gázok | szabad elektron szabad elektron + és - ionok + és - ionok |
| Félvezetők | elemi vegyület | szabad elektronok, lyukak szabad elektronok, lyukak |
| Szigetelők | kovalens kristályok ionos kristályok folyadékok gázok | szabad elektronok, lyukak szabad elektronok, lyukak + és - ionok + és - ionok |

5

Vezető anyagok klasszikus csoportosítása

σ (fajlagos vezetőképesség)
Siemens/m, 1/Ohm m

| | |
|-------------------------------|--------------|
| $\sigma < 10^{-8}$ S/m | szigetelő |
| $10^{-8} < \sigma < 10^6$ S/m | félvezető |
| $\sigma > 10^6$ S/m | fémes vezető |

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho}$$

$$\rho [\Omega m]$$

$$\sigma \left[\frac{S}{m} \right]$$

6

Vezetési mechanizmusok leírása 1.

Fémek, ötvözetek

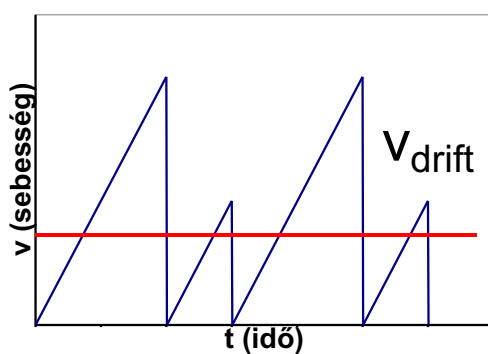
Klasszikus (Sommerfeld-féle, szabad-elektron modell)

Feltételezés: elektromok között nincs kölcsönhatás
(ideális gáz)

Elektron mozgása:

Rendezetlen termikus mozgás + sodródás (drift)

7



τ : átl. élettartam

λ : átl. szabad úthossz

$$v_d = \mu \cdot E$$

μ_n : elektron mozg.

μ_p : lyuk mozg.

anizotróp, [cm^2/Vs]

Mérése:

Hall - effektus

C- V mérés

$$j = q \cdot n \cdot v_d$$

$$v_d = \frac{q \cdot E}{m} \tau$$

$$j = \frac{n \cdot q^2 \cdot \tau}{m} E = \sigma \cdot E$$

8

Eredmények:

- Differenciális Ohm-törvény
- 1-2 vegyértékű fémekre jó fajlagos ellenállás értékek

Problémák:

- azonos fém allotróp módosulatai
- többvegyértékű fémek (számított fajlagos ellenállás hibás)
- Félvezetők, szigetelők (hőmérsékletfüggés nem magyarázható)
- σ (T, megvilágítás, külső E, sugárzás...)

$$\sigma = const \cdot e^{-\frac{E}{kT}}$$

9

**Fémek és fémes ötvözetek
vezetési tulajdonságai**

10

Fémek fajlagos ellenállását befolyásoló tényezők

periodikus pot. tér torzulása \Rightarrow ρ növekedése
rácsrendezetlenség

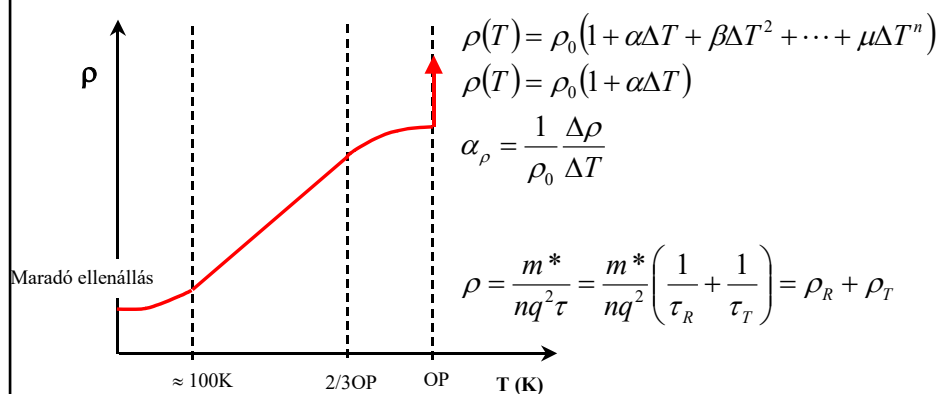
- termikus rácsrezgések
- ponthibák
- diszlokációk (alakítás)
- felületszerű hibák (szemcseméret)
- térfogati hibák (kiválások, új fázis)
- rácsstorzulás (szilárd oldatos ötvözés)
- ...

Matthiesen-szabály (szeperálható fv.)

$$\rho(T, c, \varepsilon) = \rho_1(T) + \rho_2(c) + \rho_3(\varepsilon) + \dots$$

11

ρ hőmérsékletfüggése (fémes vezető)



kr. hibák \Rightarrow maradó ellenállás

Szupravezető: maradó ellenállás nulla

12

Ötvözés hatása

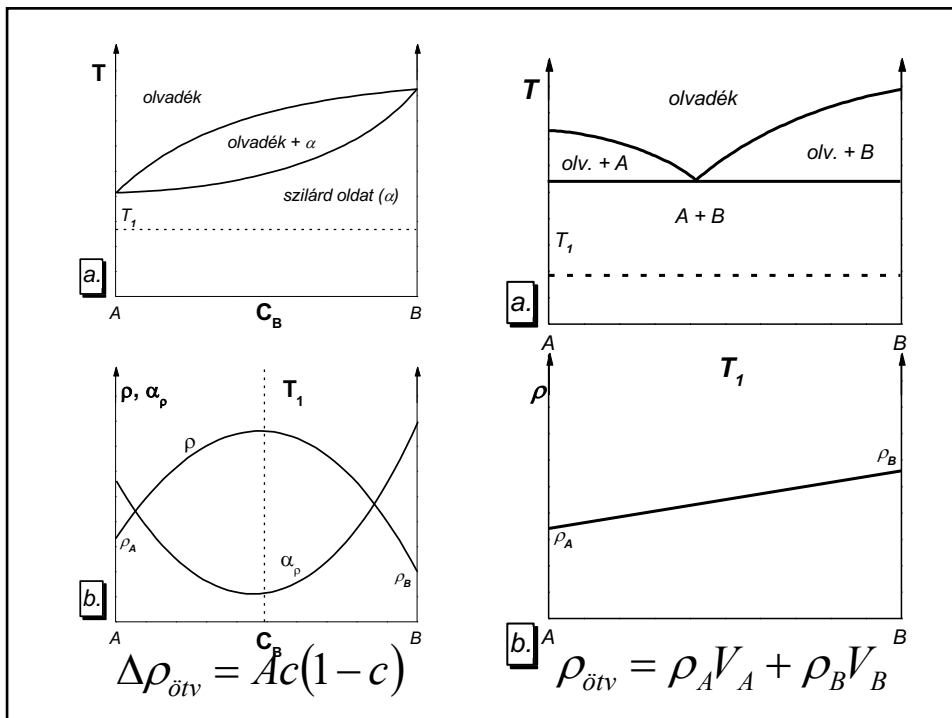
ötvöző torzítja (perturbálja) a potenciál teret \Rightarrow növeli a fajlagos ellenállást

szilárd oldat

második fázis (vegyület)

$$\Delta\rho_1 \gg \Delta\rho_2$$

13



14

Nordheim-szabály

$$\Delta\rho_{\text{ötv}} = Ac(1-c)$$

$$\rho = \rho_A + (\rho_A - \rho_B)c + Ac(1-c)$$

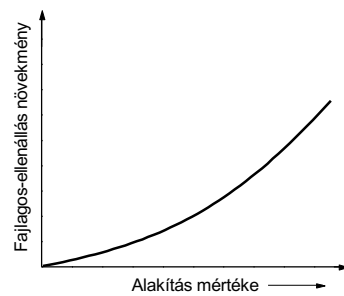
Mott-szabály

$$\Delta\rho = Ac \Rightarrow \Delta\rho_{AB} = \Delta\rho_{BA}$$

Rendezett rácsú szilárd oldat

15

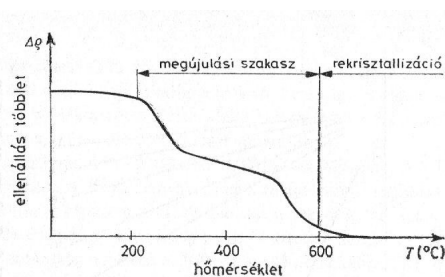
Képlékeny alakítás, hőkezelés hatása



Képlékeny alakítás \Rightarrow
vakanciák, diszlokációk

$$\Delta\rho_{\varepsilon} = k \cdot \varepsilon^n$$

$$\ln \Delta\rho_{\varepsilon} = n \ln \varepsilon + \ln k$$



10.33. ábra
A Ni megújulása

Egyensúly felé tart a
rendszer ρ csökken.

16

VEZETŐANYAGOK

Vezetékanyagok:

Cu és ötvözetei
Al és ötvözetei
Au

Hőelemek aktív anyagai

Cu - konstantán
Fe – konstantán
Ni – CrNi, Pt – PtRh

Érintkezőanyagok

kis átmeneti ellenállás
jó hővezetés
jó ívállóság
nagy szilárdság
kopásállóság
pl. Au, Ag, W, Pt,
Cu-Ag, Cu-Ag-Au,
kompozitok, pl. Ag-CdO

Üveg- és kerámiaátvezetők

kis hőtagulási együttható
pl. Fe – Ni ötvözet 36-42% Ni
Dumet-huzal

Kettősfémek (bimetál)

két eltérő hőtagulású anyag
összehengerelve

Forrasztanyagok

PbSn
SnCu, SnAg, SnAgCu

17

Vezetési mechanizmusok leírása 2.

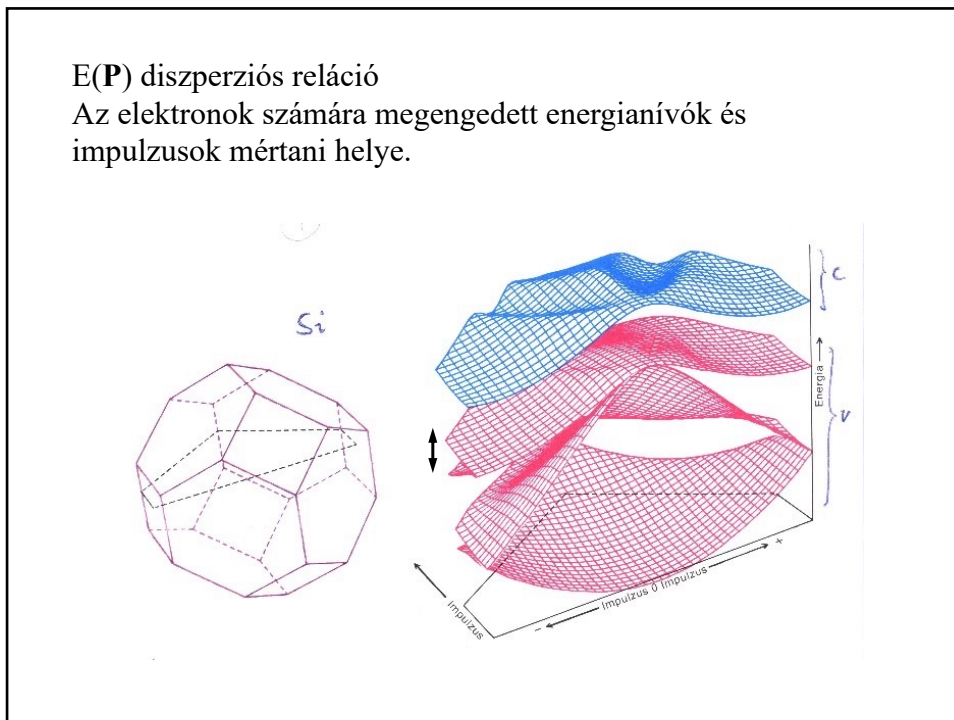
Félvezetők, szigetelők

Kvantummechanikai leírás

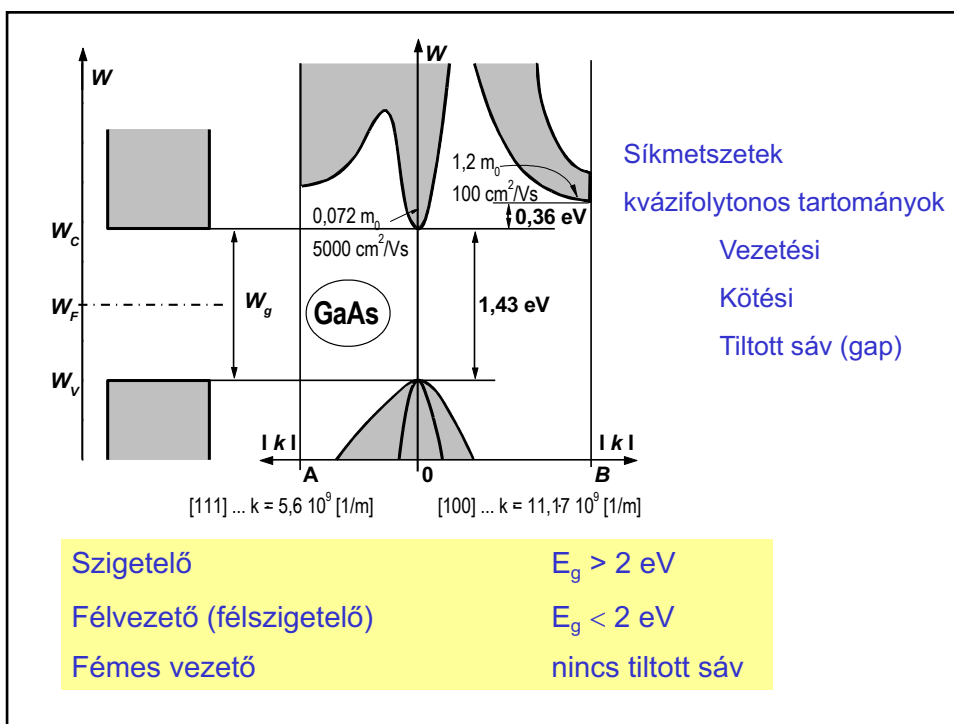
Elektronhoz rendelt síkhullám mozgása a
rácsperiodikus potenciáltérben.

Vezető test: potenciálgödör.

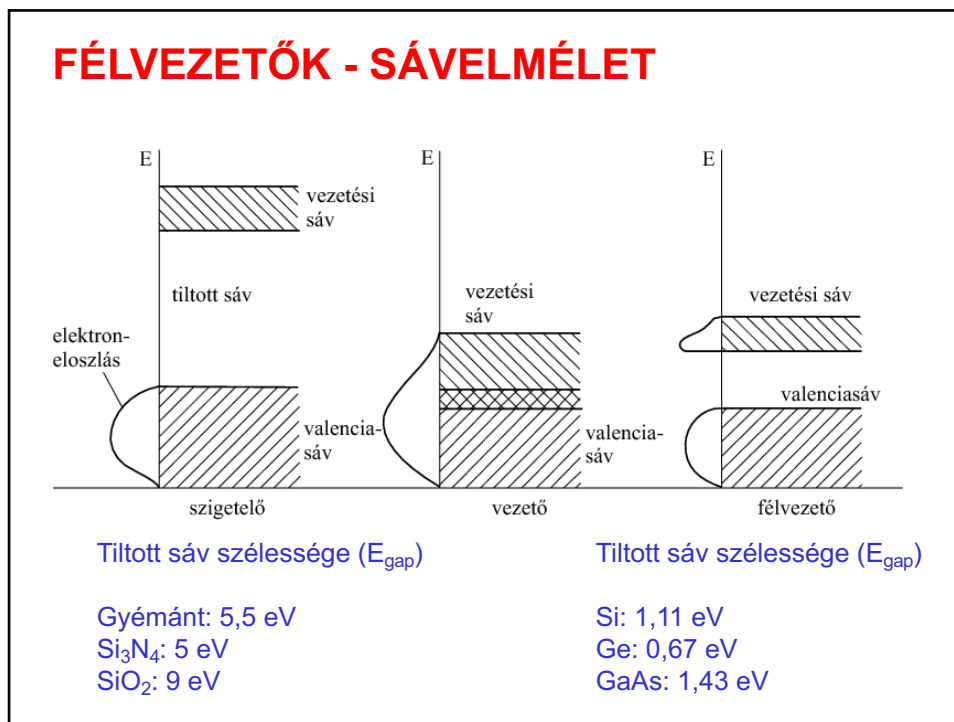
18



19



20



21

Energia-szintek betöltődése

Generáció (G) \Leftrightarrow Rekombináció (R)
lyuk, elektron párok (direkt, indirekt)

Termikus egyensúlyi állapot: $G(\text{gerjesztés}) = R(n,p)$
gerjesztés: T, foton, részecske sugárzás stb.

Betöltési valószínűség

Fermi-Dirac statisztika

(nem megkülönböztethető, spinnel rendelkező részecskék)

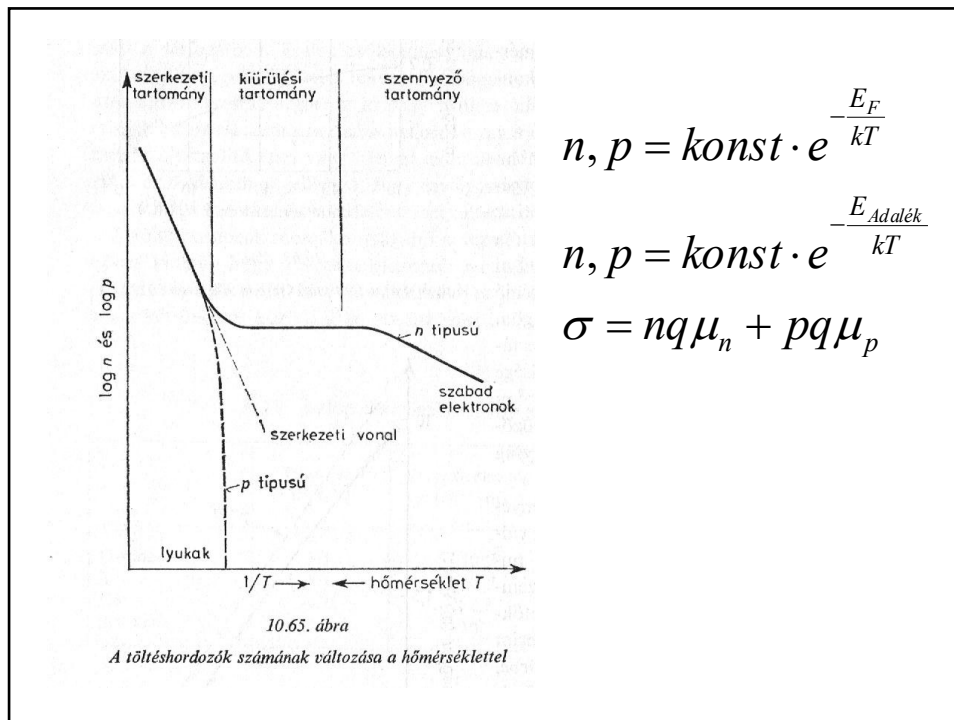
$$f(W) = \frac{1}{e^{\frac{W-W_F}{kT}} + 1}$$

0,5 \Leftrightarrow Fermi-szint

Fermi-szint helye (intrinsic-, extrinsic-, elfajult-félvezető)

Szintek betöltöttsége 0 K-en.

22



23

Félvezető anyagok fajtái és fontosabb tulajdonságaik

24

Félvezetők csoportosítása

| | <i>II</i> | <i>III</i> | <i>IV</i> | <i>V</i> | <i>VI</i> | <i>VII</i> |
|------------|-----------|------------|-----------|----------|-----------|------------|
| <i>II</i> | Be | B | C | N | O | |
| <i>III</i> | Mg | Al | Si | P | S | Cl |
| <i>IV</i> | Ca | Ga | Ge | As | Se | Br |
| <i>V</i> | Zn | In | Sn | Sb | Te | I |
| <i>VI</i> | Sr | | Pb | Bi | Po | At |
| <i>VII</i> | Cd | | | | | |

Elemi félvezető (Si, Ge...)

Intermetallikus: biner, ternér, kvaternér... ($A^{III} B^V$, $A^{II} B^{VI}$)

25

Kötés, kristályszerkezet

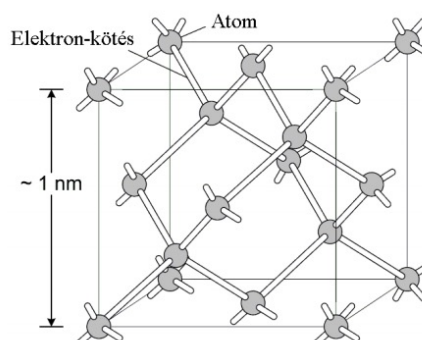
Si: tetraédes sp^3 pályák, gyémántrács, 100% kovalens

GaAs: szfaleritrács, 70% kovalens - 30% ionos kötés

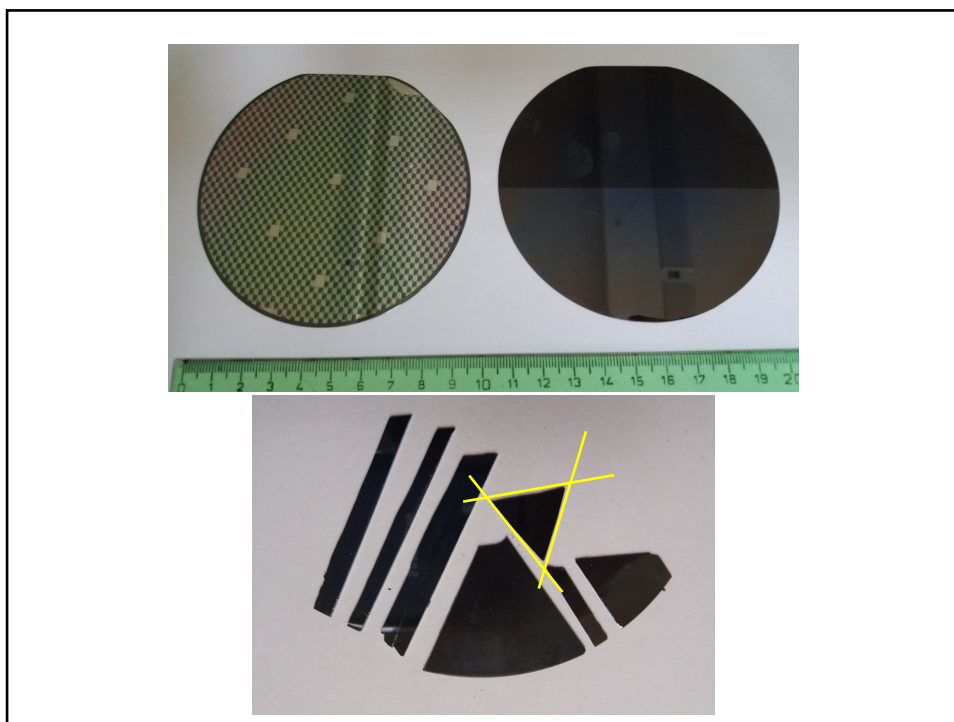
Jellemző orientációk:

Si: (111)

GaAs (100)

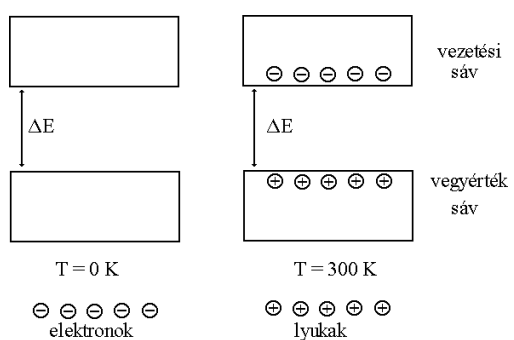


26



27

ELEMI (INTRINSIC) FÉLVEZETŐK



Gerjesztés (pl. hőmérséklet, vagy elektromágneses sugárzás [fény, röntgensugárzás]) hatására elektronok kerülhetnek a vegyértéksávból a vezetési sávba. Ekkor az anyag vezetővé válik. Az elektronok helyén a vegyértéksávban pozitív töltésű kvázi-részecskék, „lyukak” keletkeznek.

28

ADALÉKOLT (EXTRINSIC) FÉLVEZETŐK

Extrinsic (adalékolt)

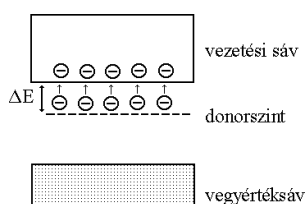
n-típusú, donor, 5 vegyérték (P, As, Sb)

p-típusú, akceptor, 3 vegyérték (B, Al, In, Ga)

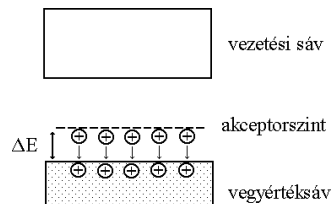
Donor ill. Akceptor energiaszintek a tiltott sávban

Adalékolás: szubsztitúciós ötvözés (oldhatósági határ alatt)

Az n-típusúnál az elektronok, a p-típusúnál a lyukak száma sokszorozódik meg, így lesznek elektron- ill. lyukvezetők.



FD4.ábra



FD5.ábra

29

Rekombináció: energiavesztéssel járó kölcsönhatás (energia- és impulzus megmaradás tétele)

Foton, fonon tulajdonságai

Lehetséges kölcsönhatások:

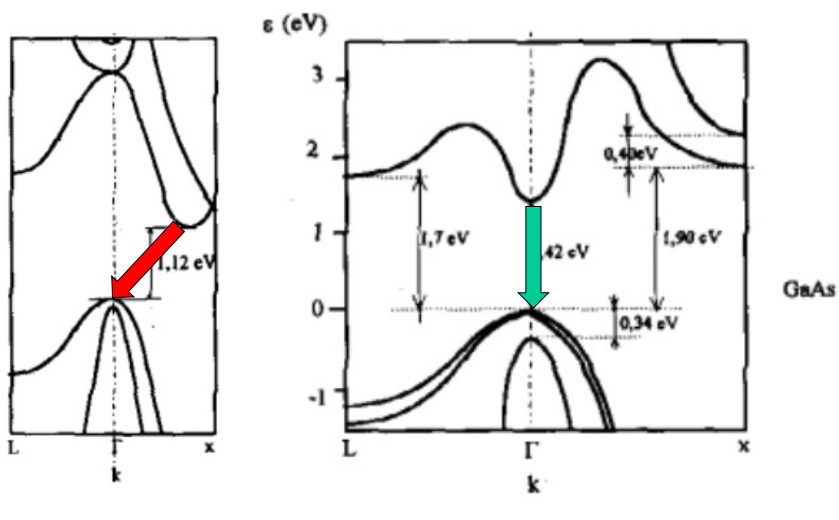
foton keltés

fonon

Auger (elektron-kölcsönhatás)

30

Rekombinációs mechanizmusok:
 direkt (foton kibocsátás)
 indirekt (fonon keltés)



31

A félvezetők technológiája

32



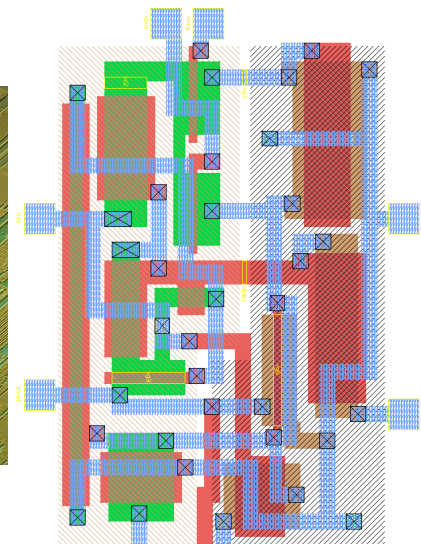
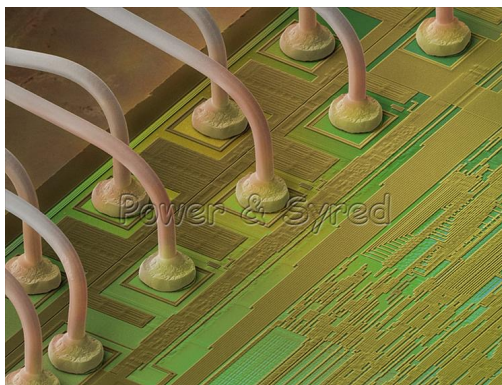
Az első tranzisztor, Bell Lab 1947



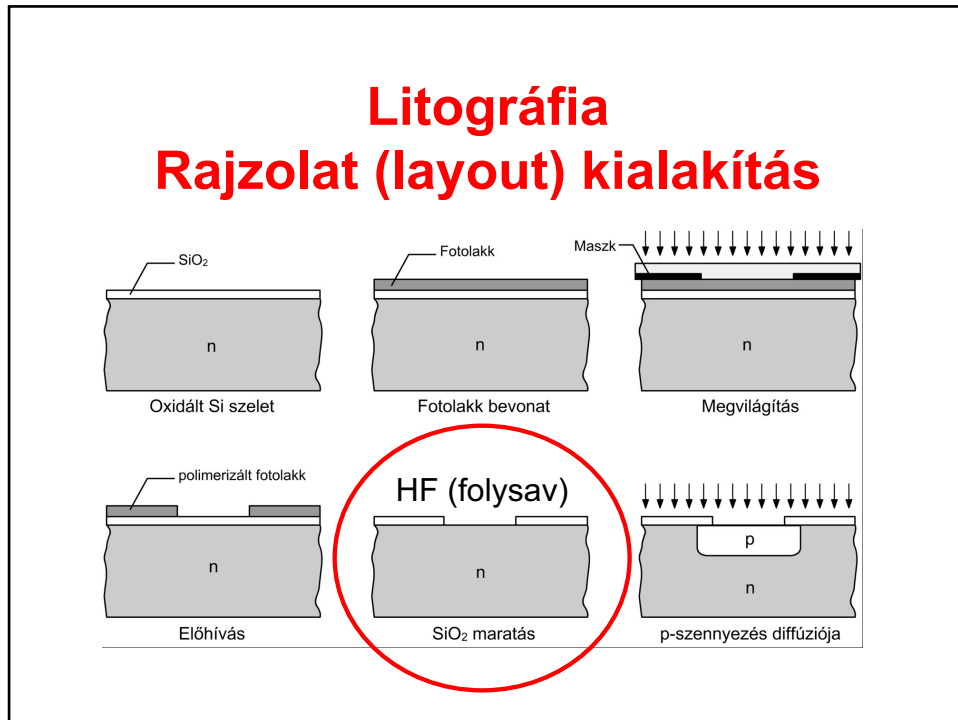
P13-típusú tranzisztor, Tungram 1965-70
Ge/In ötvözött

33

Planáris technológia



34



35

| | | |
|----------|---------------------|-------------------|
| 1985-86: | „szub-mikronos” | < 1 μm |
| 2015: | Haswell/Crystalwell | 22 nm |
| 2017-18: | Kaby/Coffee Lake | 14 nm |
| 2019: | | 10 nm |
| 2022 | | 5-7 nm |

Technológiai határ?

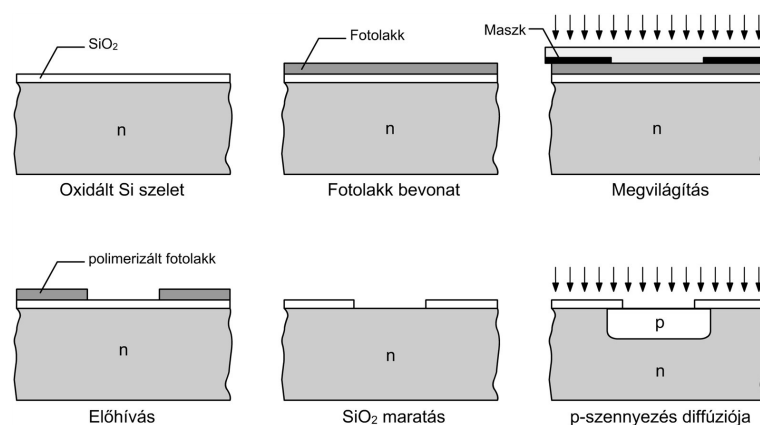
36

Főbb technológiai lépések

- Rétegleválasztás
 - Fizikai – vákuumpárolgatás, porlasztás ... - PVD (Physical Vapor Deposition)
 - Kémiai – CVD, ALD, ... CVD (Chemical Vapor Deposition).
- Rétegtávolítás
 - Nedves kémia
 - Plazma kémiai
- Ábrakialakítás
 - Fotolitográfia
- Magas hőmérsékletű kezelések
 - Oxidáció – Si szelet, $T > 950^\circ\text{C}$, O_2
 - Hőkezelés – $300^\circ\text{C} < T < 1200^\circ\text{C}$, különféle gázok, elektromos és mechanikai paraméterek beállítására

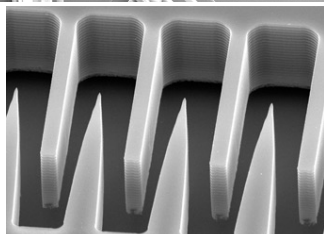
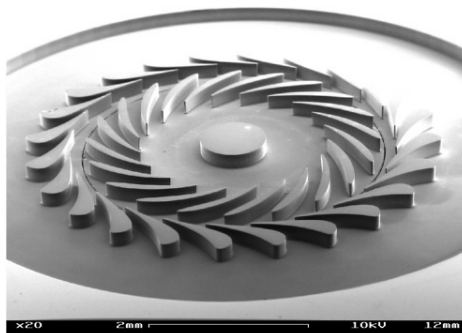
37

Litográfia Rajzolat (layout) kialakítás



38

Mikromechanikai rendszerek MEMS



39