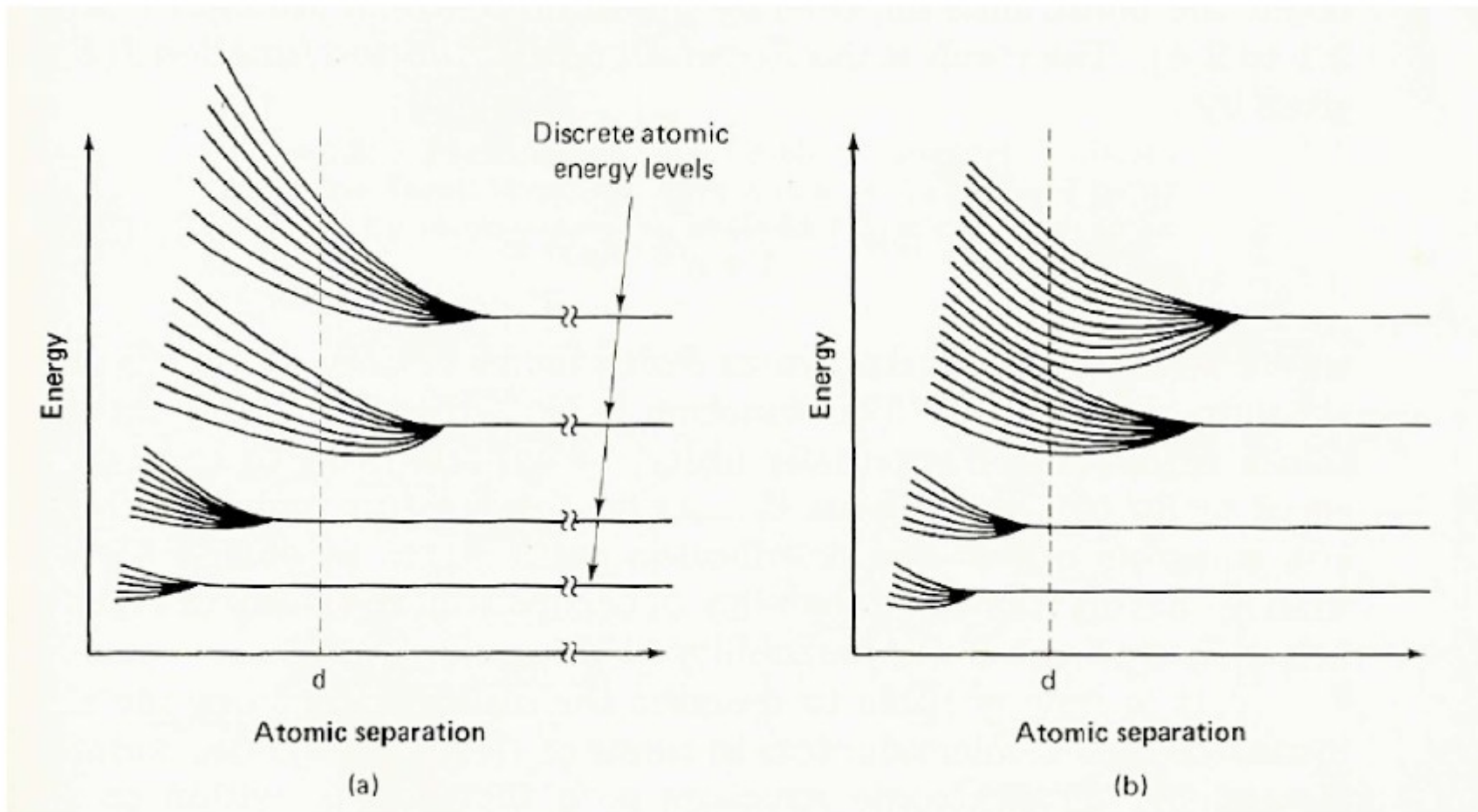


Modern fizika vegyészmérnököknek

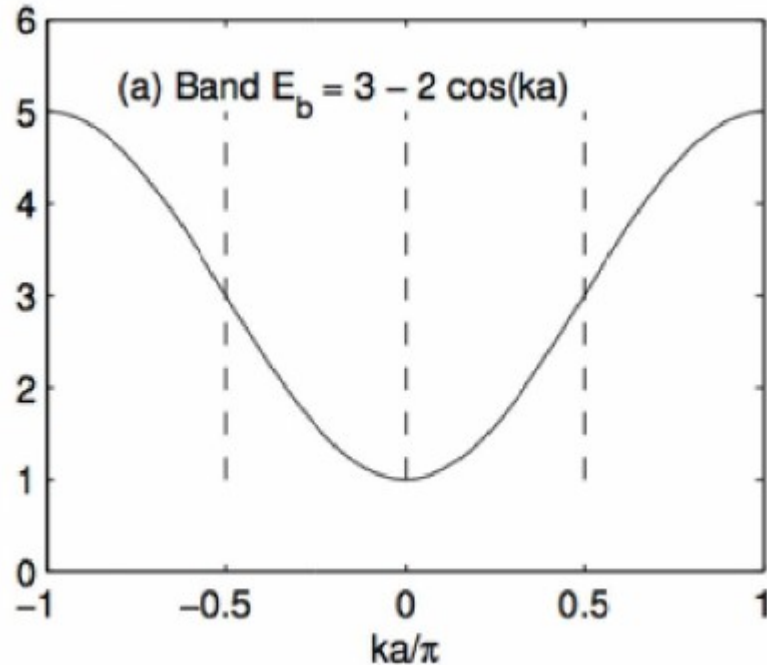
9. óra: p-n átmenet, félvezető eszközök

Ismétlés: Elektronok sávokban



N atom, s, p, d, ... pályák: $2N$, $6N$, $10N$... elektronállapot (kötött)
→ 1 sáv, $2N$, $6N$, $10N$... elektronállapotból (síkhullám)

Sávban az elektron: effektív tömeg



$$\left(\frac{d^2 E}{dk^2} \right)^{-1} = \frac{1}{\hbar^2} m_e.$$

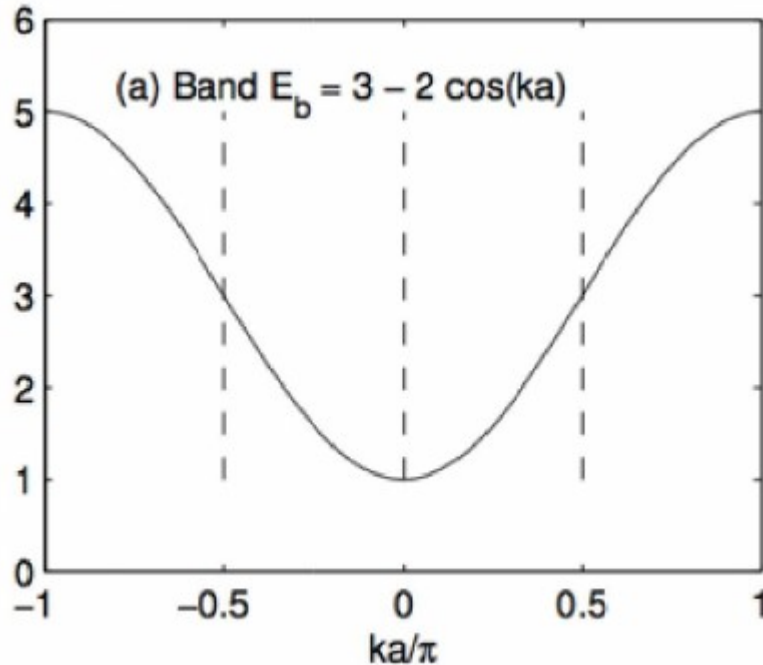
csoportsebesség $\hbar v = dE/dk$

laposabb sáv \rightarrow lassabban nő a sebesség az impulzussal

\rightarrow nagyobb tömeg ($\hbar k = m v$)

\rightarrow több állapot dE energiaablakban

Lapos sávokban nagyobb az elektron tömege, sűrűbben vannak az állapotok



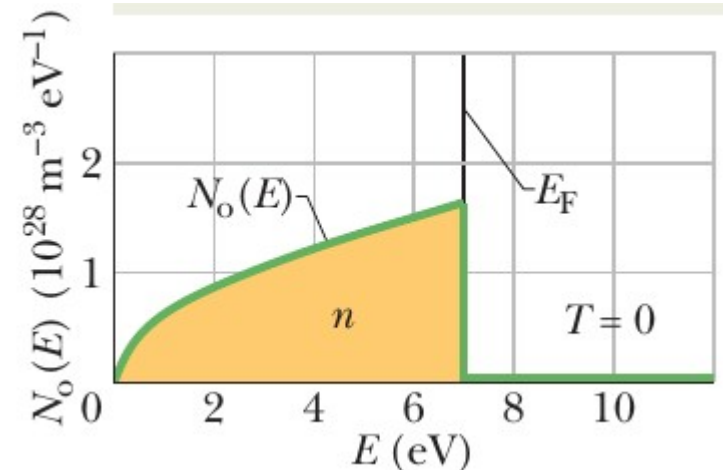
sáv aljához közel:
 állapotok száma
 $dN = N(E) dV dE$,
 állapotsűrűség:

$$N(E) = \frac{8\sqrt{2}\pi m^{3/2}}{h^3} \sqrt{E}$$

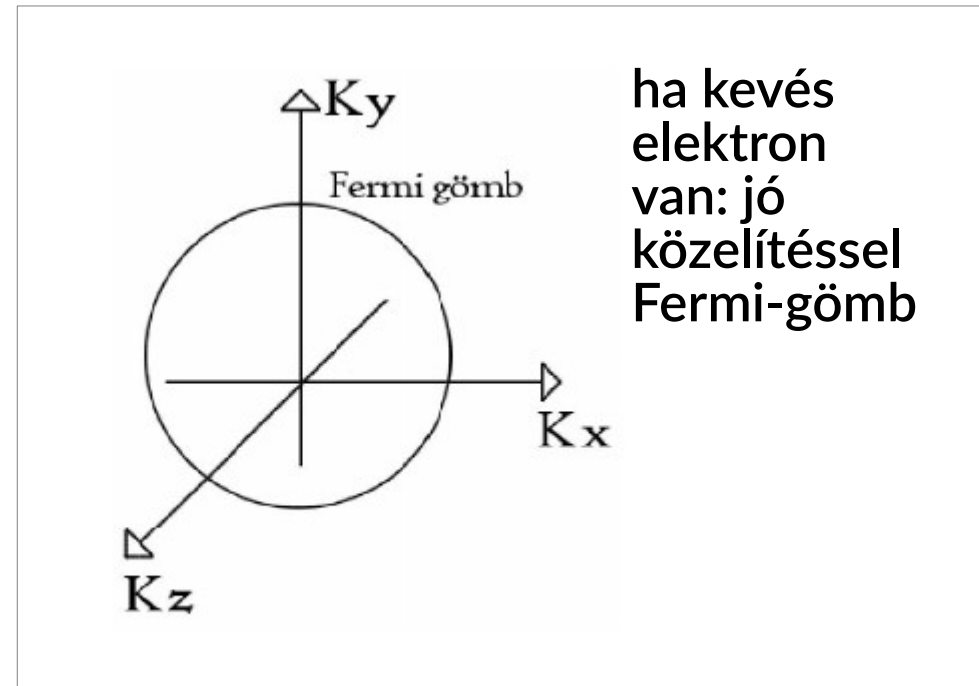
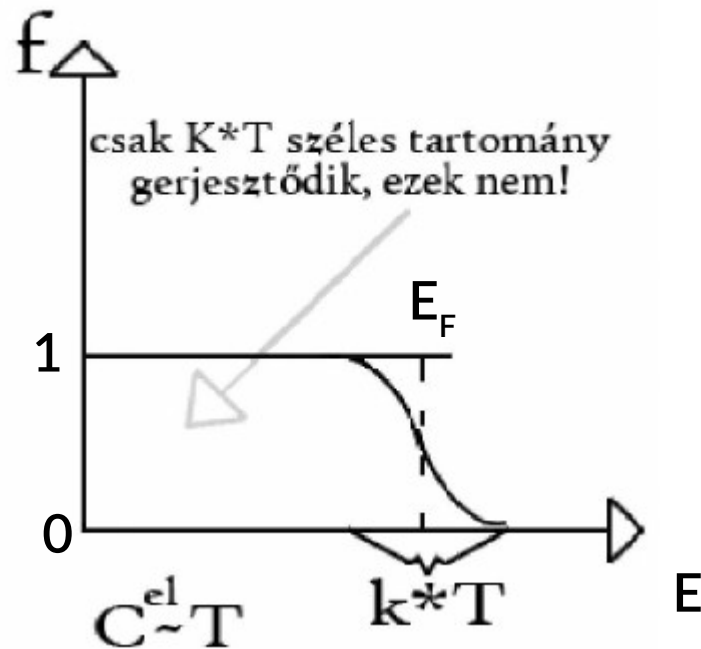
laposabb sáv → lassabban nő a sebesség az impulzussal

→ nagyobb tömeg ($\hbar k = m v$)

→ több állapot dE energiaablakban



Az állapotok betöltöttségét a Fermi-Dirac-eloszlás adja meg

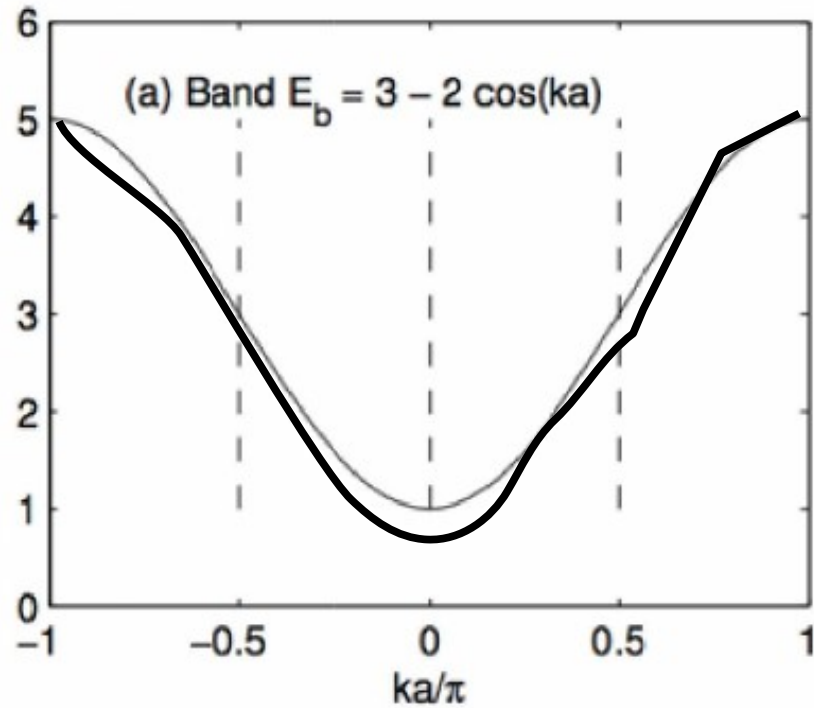


$$f_{FD}(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}$$

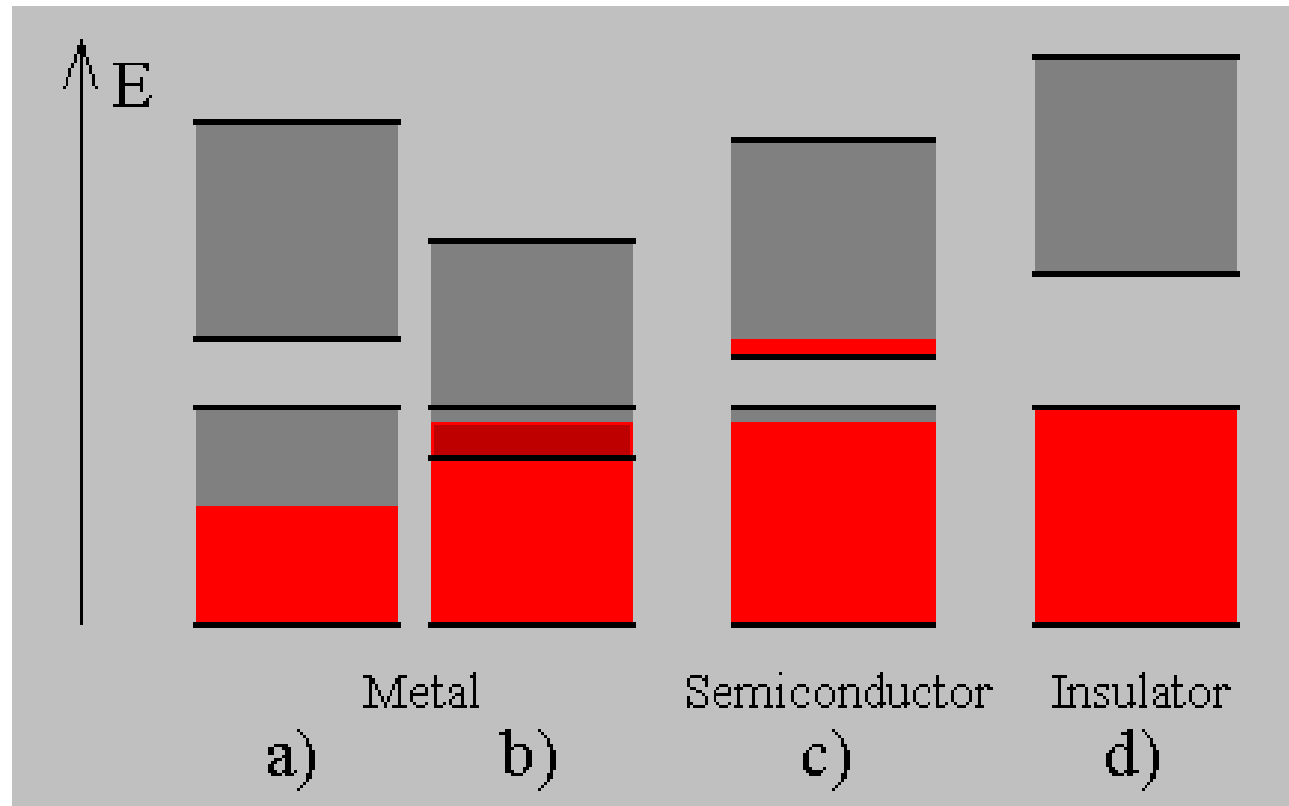
ha $E - E_F \gg k_B T$: $f(E) \approx e^{-\frac{E-E_F}{k_B T}}$

Boltzmann-eloszlással közelíthető

Elektromos vezetéshez részben betöltött sáv kell



Félvezetők: ha a termikus gerjesztések elegek a Δ tiltott sáv átugrására



Szobahőmérséklet $k_B T = 26\text{meV}$

→ Félvezető, ha

$$\Delta < 2 - 3\text{eV}$$

Hőmérséklet növelésével fémek vezetőképessége csökken, félvezetőké nő (több szabad töltéshordozó)

tiltott sávon keresztül felgerjesztődés
vszínűsége

$$\Delta \gg k_B T : p_{\text{fel}} \approx e^{-\frac{\Delta}{k_B T}}$$

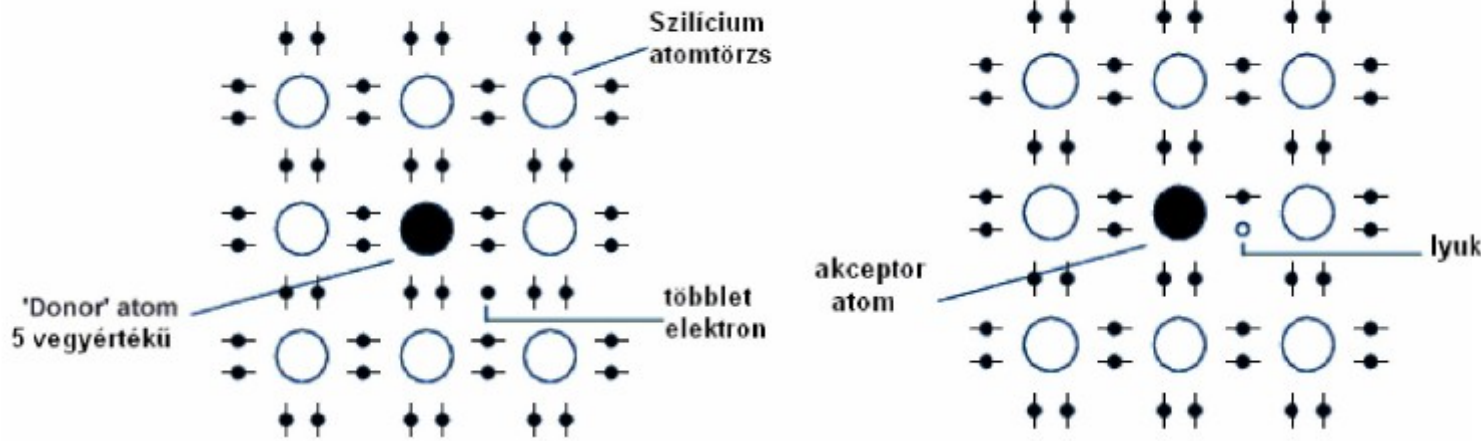
Property	Unit	Material	
		Copper	Silicon
Type of conductor		Metal	Semiconductor
Resistivity, ρ	$\Omega \cdot \text{m}$	2×10^{-8}	3×10^3
Temperature coefficient of resistivity, α	K^{-1}	$+4 \times 10^{-3}$	-70×10^{-3}
Number density of charge carriers, n	m^{-3}	9×10^{28}	1×10^{16}

^aAll values are for room temperature.

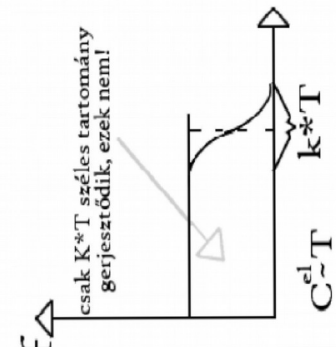
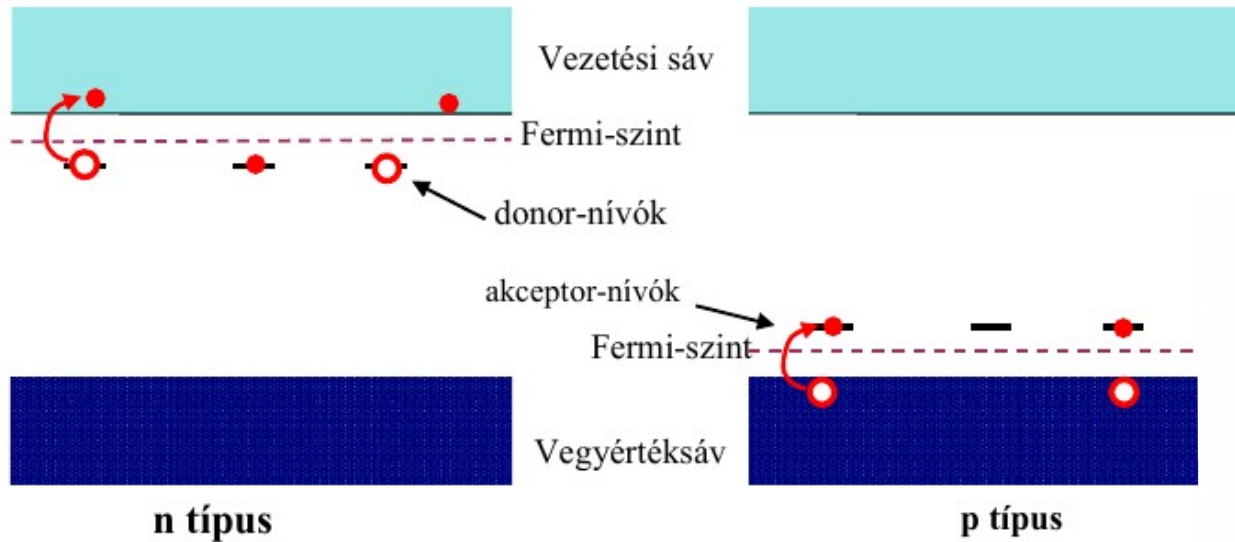
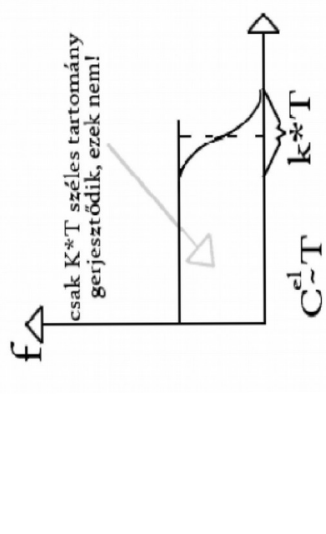
Dópolással szabad töltéshordozókat viszünk a félvezetőbe. Kb. annyit, ahány dópoló atom, hőmérséklettől kb. függetlenül

Si + P
n-dópolt

Si + Al
p-dópolt



$$f_{FD}(E) = \frac{1}{e^{\frac{E-E_F}{kT}} + 1}$$



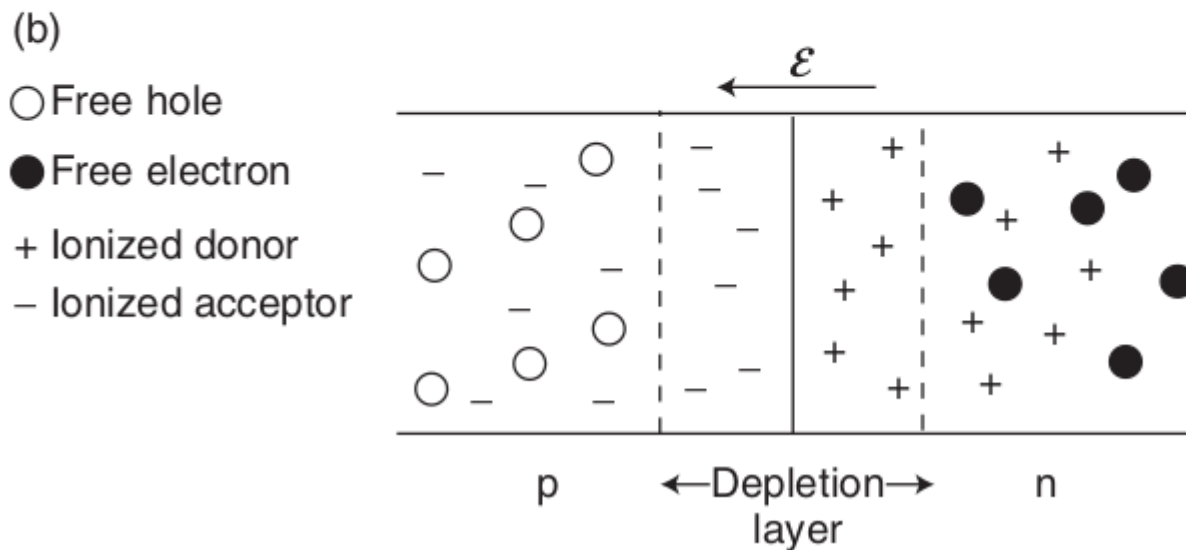
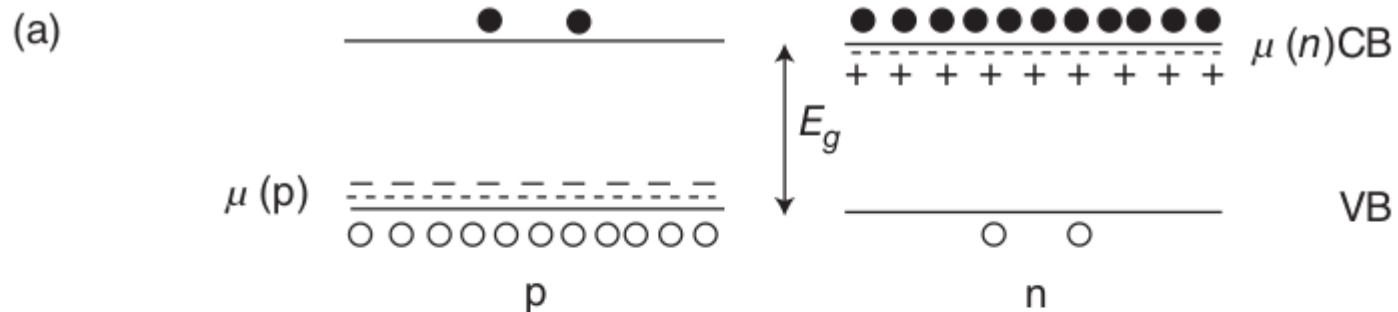
Az általunk bevitt (többségi) töltéshordozók mellett mindig megvannak a (kisebbségi) töltéshordozók is

Tömeghatás törvénye:

ha több elektront viszek be, kevesebb lyuk lesz (rekombináció miatt)

$$n \cdot p = n_i \cdot p_i$$

pn-átmenetnél a többségi töltéshordozók átdiffundálnak a határon, így egy um nagyságú kiürített tartomány jön létre



A kiürített tartományon az eldiffundált töltéshordozókhoz tartozó atomtörzsek miatt tértöltés alakul ki → potenciálkülönbség, gátolja a diffúziót

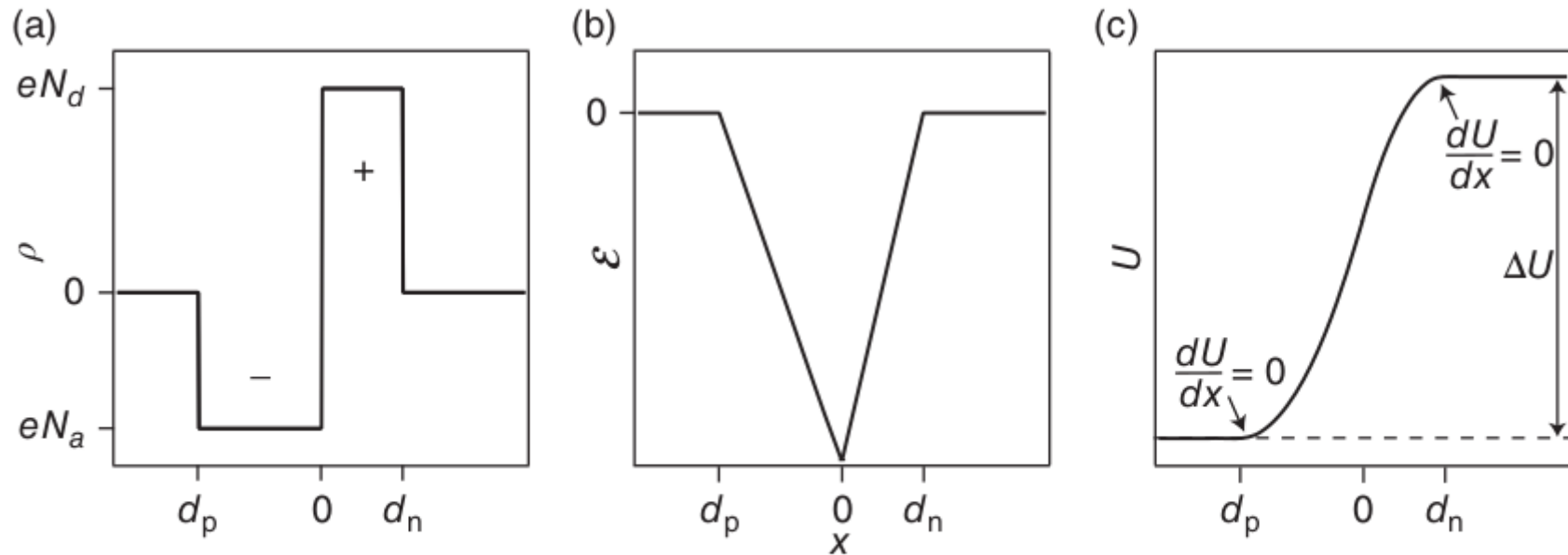
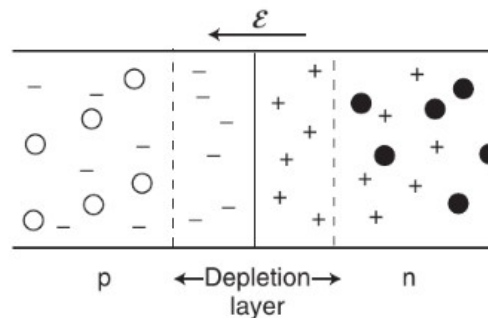


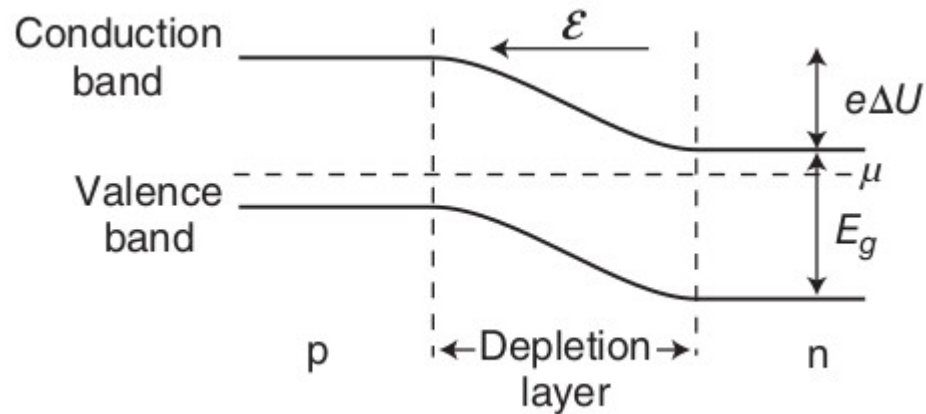
Figure 7.9 Idealized model of the depletion zone solved using the Poisson equation. (a) Charge density in the depletion zone. (b) Electric field. (c) Electrostatic potential.

(b)

- Free hole
- Free electron
- + Ionized donor
- Ionized acceptor

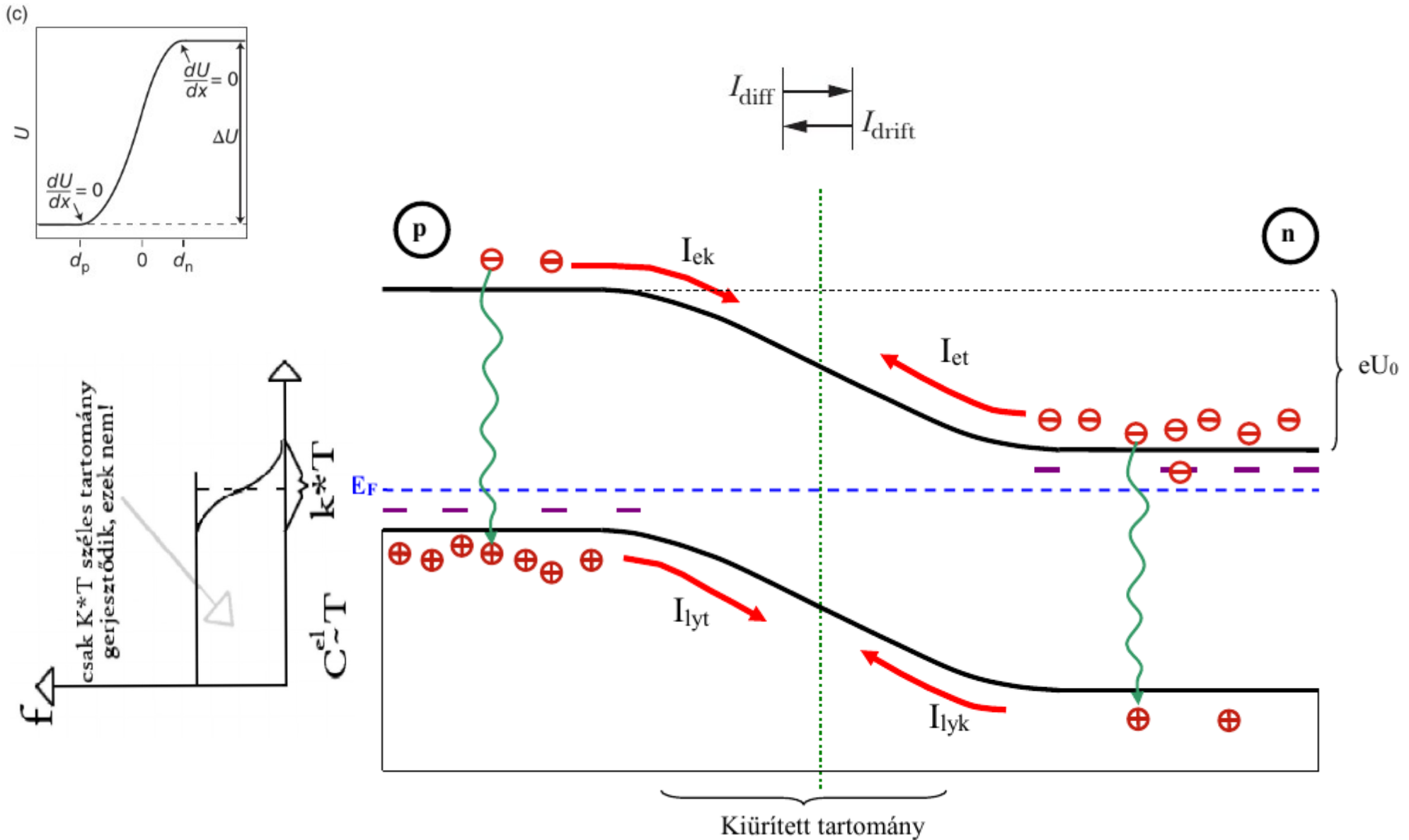


A potenciálkülönbséget is figyelembe véve a sávok “görbülnek” a pn-átmenetnél



Miért balra emelkedik a sáv, ha egyszer az elektromos potenciál jobbra emelkedik?

Dinamikus egyensúly: a kiürített tartományon keresztül diffúzióval többségi, drifttel kisebbségi töltéshordozók áramlanak.



A pn-átmeneten kialakuló feszültség miatt a diffúziós áram olyan kicsi, mint a termikus gerjesztések által okozott drift-áram

drift-áram:

kiürített tartományban termikus gerjesztések e-okat és lyukakat párkeltenek. A tértöltések miatt lyukak balra, e-ok jobbra folynak

$$I_{\text{drift}} \propto e^{-\frac{E_g}{k_B T}}$$

diffúziós (rekombinációs) áram:

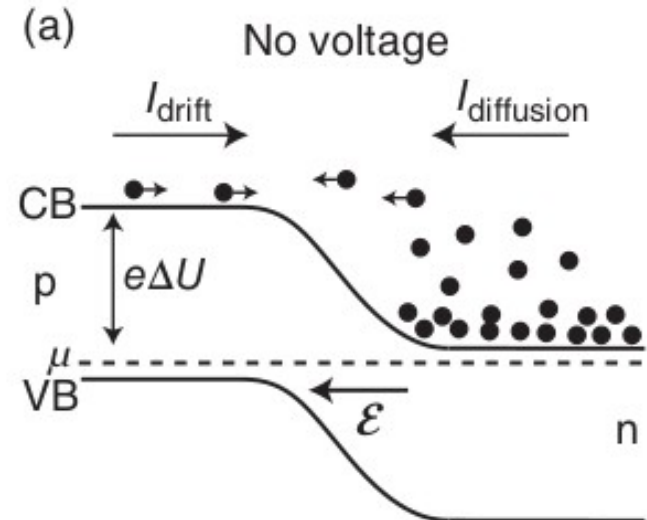
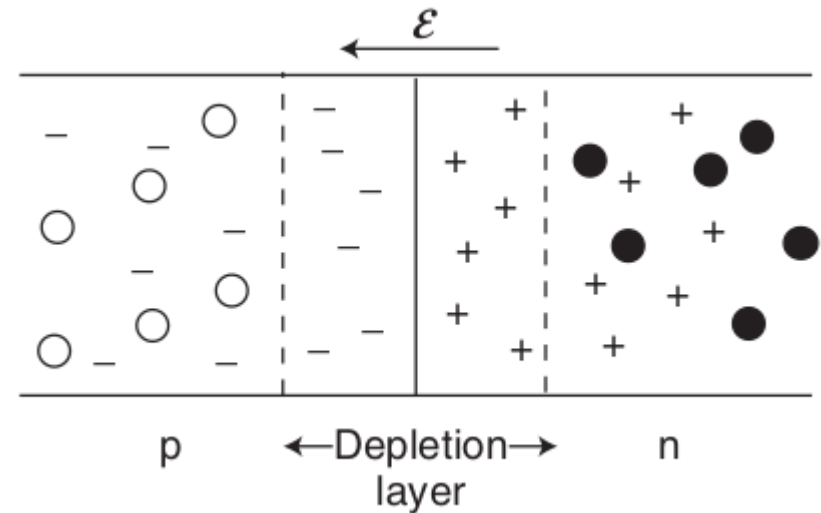
a többségi töltéshordozók a potenciálkülönbséget leküzdve átdiffundálnak, rekombinálódnak.

Termikusan aktivált:

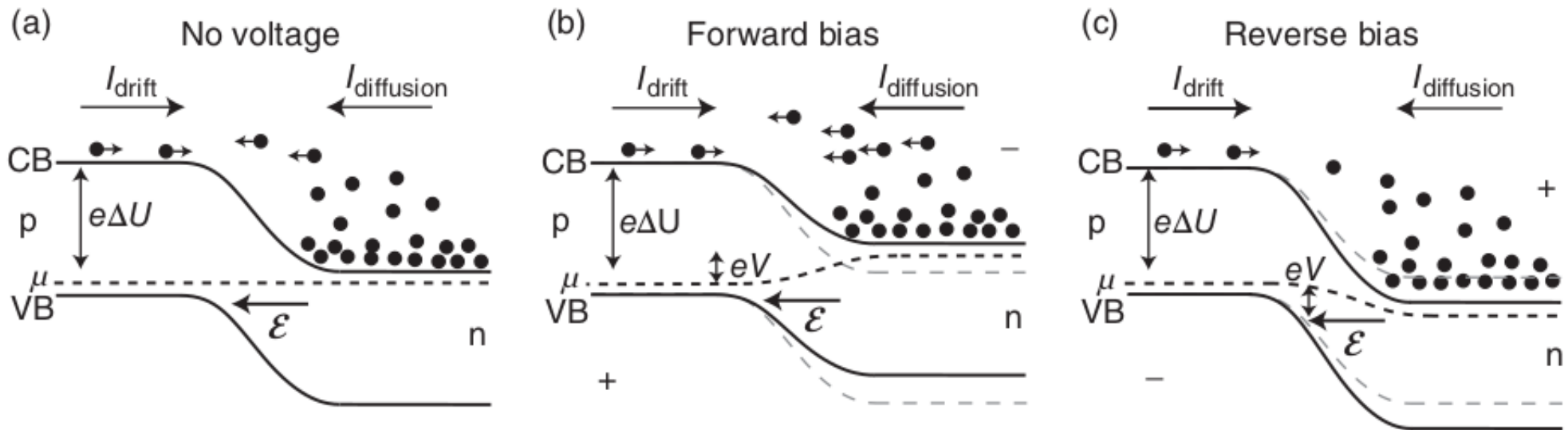
$$I_{\text{diffusion}} \propto e^{-\frac{\Delta U_e}{k_B T}}$$

dinamikus egyensúly: I_0 áram folyik balra és jobbra is

$$I_{\text{diffusion}} = I_{\text{drift}} = I_0$$



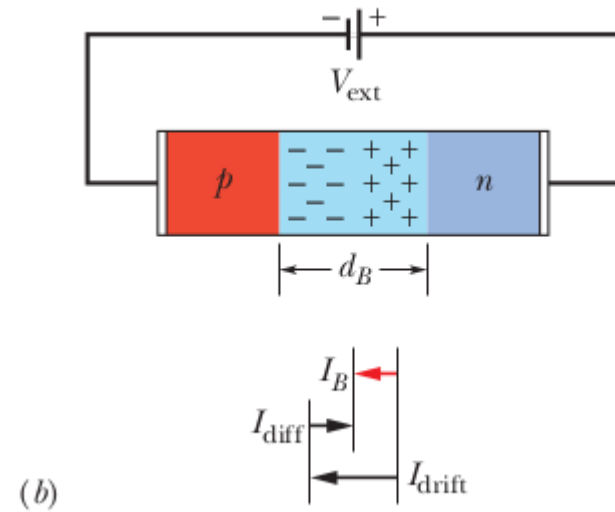
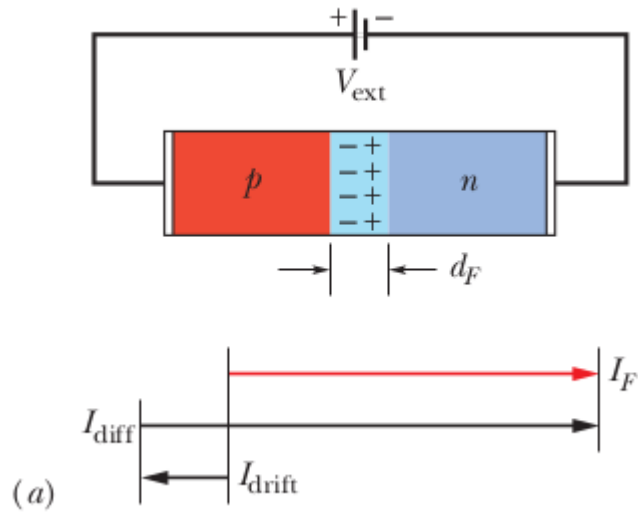
pn-átmenet egyenirányít: többségi töltéshordozókat benyomni a kiürített tartományba könnyű, több rekombináció, de kihúzni onnan nehéz.



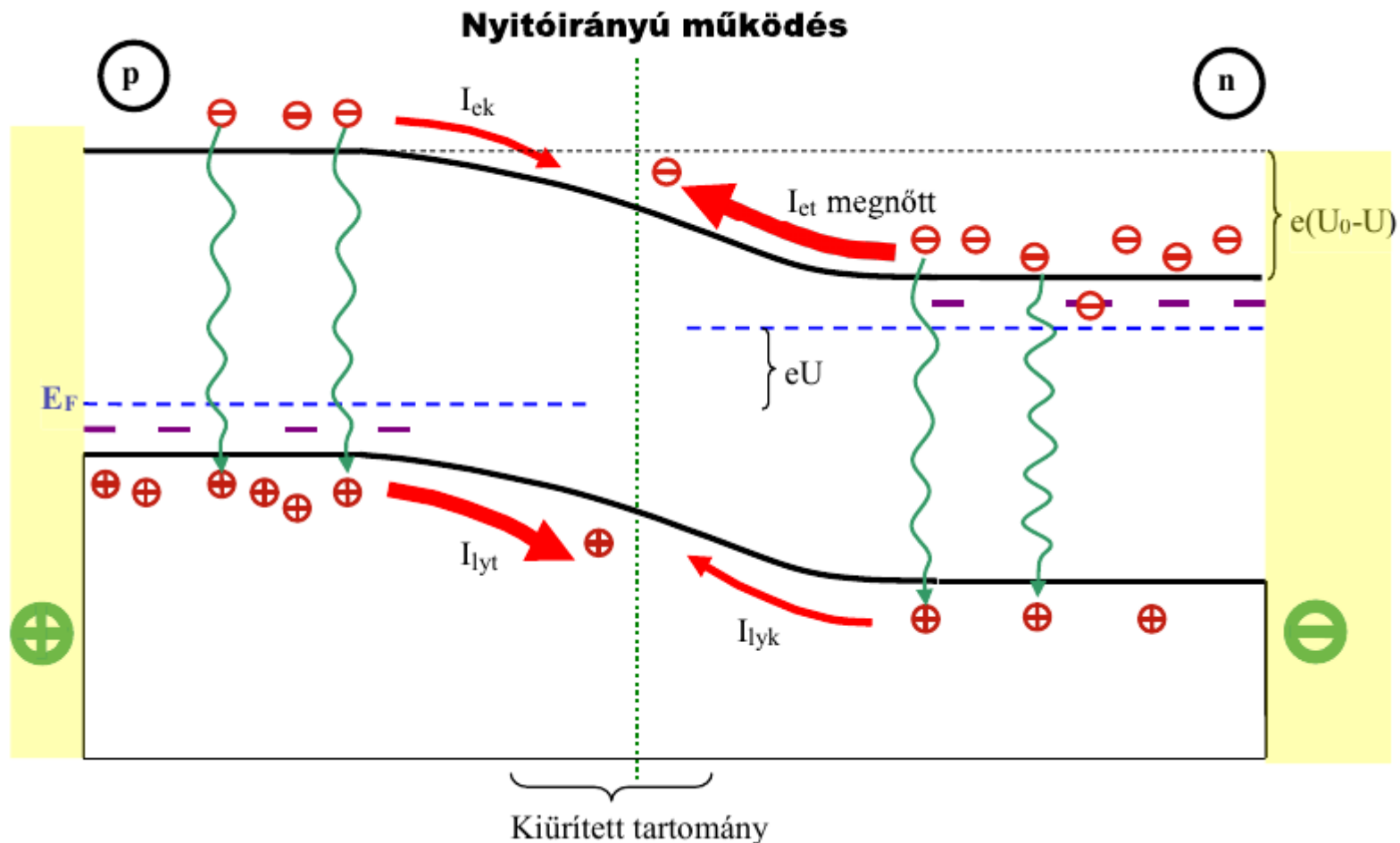
U extra feszültség a kontaktuson: $I_{diffusion}$ nő vagy csökken, I_{drift} változatlan

$$I_{diffusion} \propto e^{-\frac{(U+\Delta U)e}{k_B T}} \Rightarrow I_{diffusion} = I_0 e^{-\frac{Ue}{k_B T}}$$

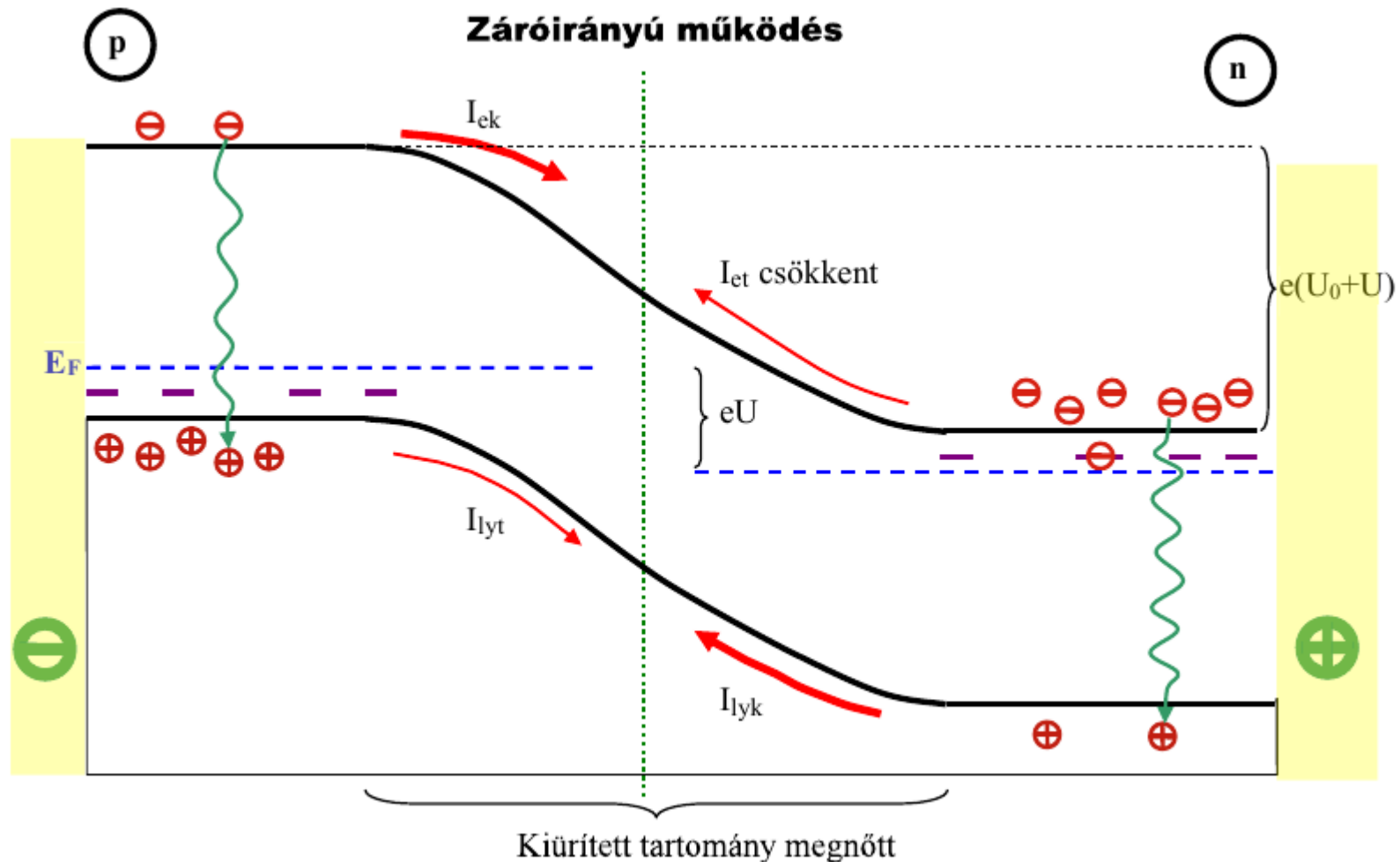
A kiürített tartomány nyitóirányú feszültségénél csökken, záróirányúnál nő



Nyitóirányú feszültség: a többségi töltéshordozókat benyomjuk a kiürített tartományba → sok rekombináció → nagy áram

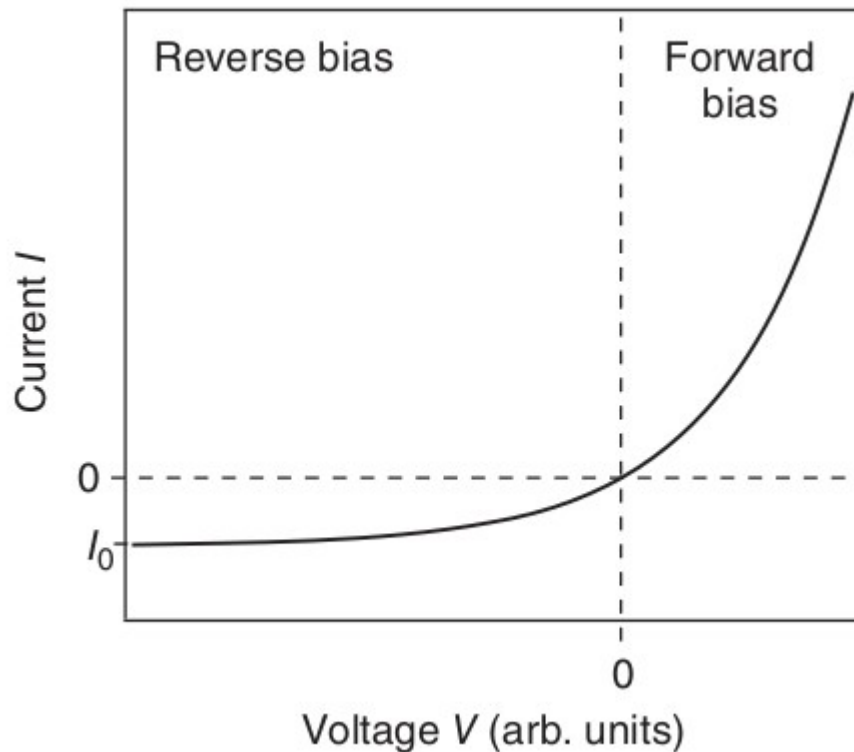


Záróirányú feszültség: a kisebbségi töltéshordozók áramát növeljük, de ők kevesen vannak → kis áram

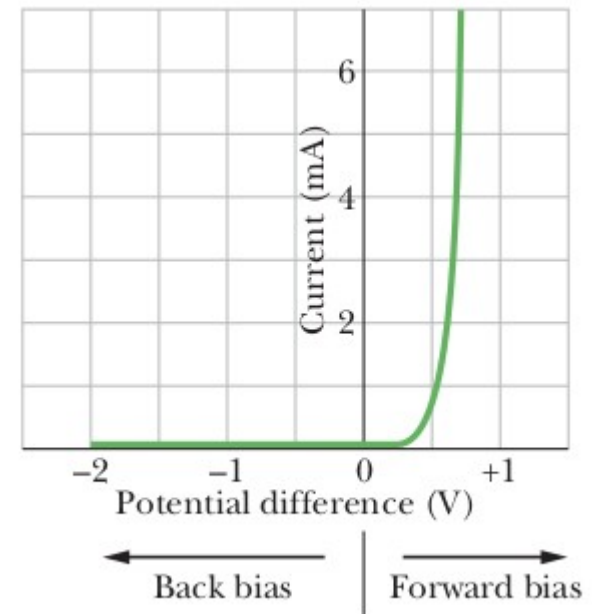


pn-átmenet egyenirányítását egyenletekkel modellezhetjük → dióda feszültség-áram karakterisztikája

$$I = I_{\text{diffusion}} - I_{\text{drift}} = I_0 \left(e^{-\frac{-U_e}{k_B T}} - 1 \right)$$



I_0 nagyon kicsi:



pn átmenetben tér iránya

Egy p-n átmenet kiürített tartományában merre mutat az elektromos tér?

A) p felé

B) n felé

C) Nincs elektromos tér, hiszen a minta semleges

D) p felé vagy n felé, a dőpolások mértékétől függően

pn-átmenet alkalmazásai

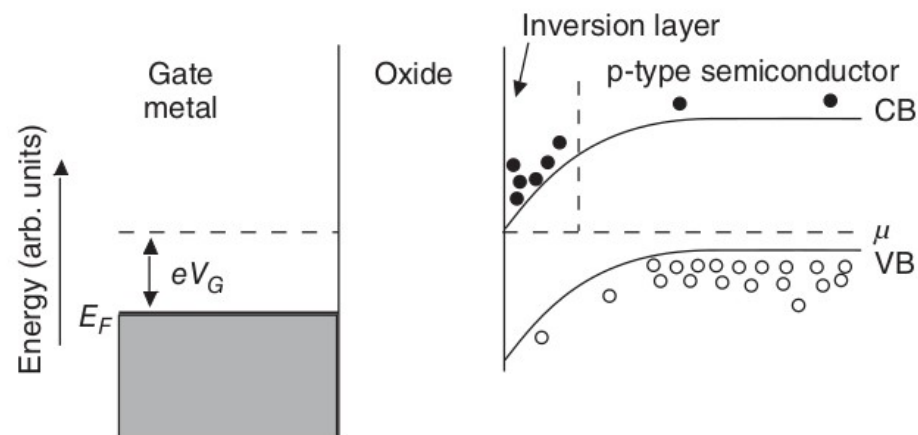
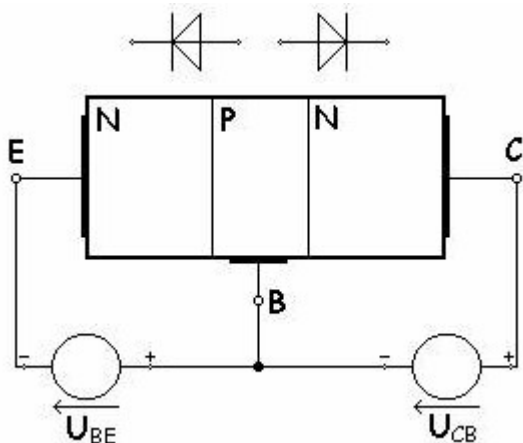
tranzisztor

fotodióda (LED)

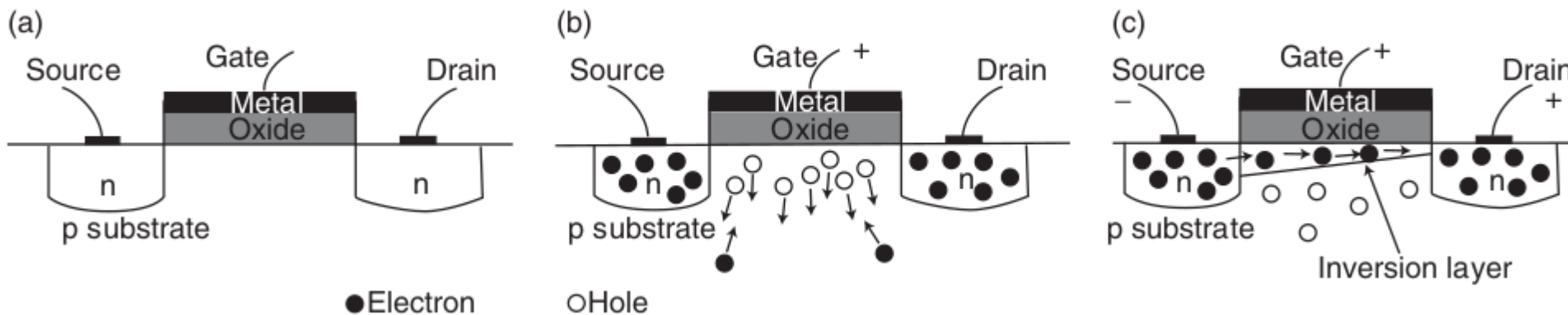
fotocella (napelem)

A tranzisztorban a kapufeszültséggel (vagy - árammal) vezéreljük az emitter és kollektor között folyó áramot. MOSFET: a kiürített tartomány méretét hangolja a kapufeszültség

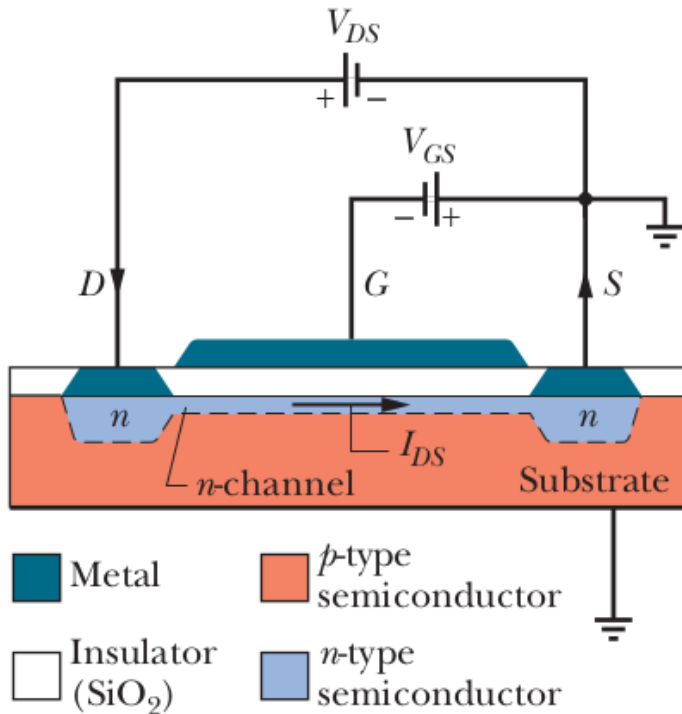
MOSFET = Metal-Oxide-Semiconductor Field Effect Transistor



Ha a kapufeszültség (bázis) pozitív,
elektronokat vonz be az emitter és kollektor
közé → vezetési csatorna



A tranzisztornak az ötlettől a praktikus késztermékig 30+ év kellett.

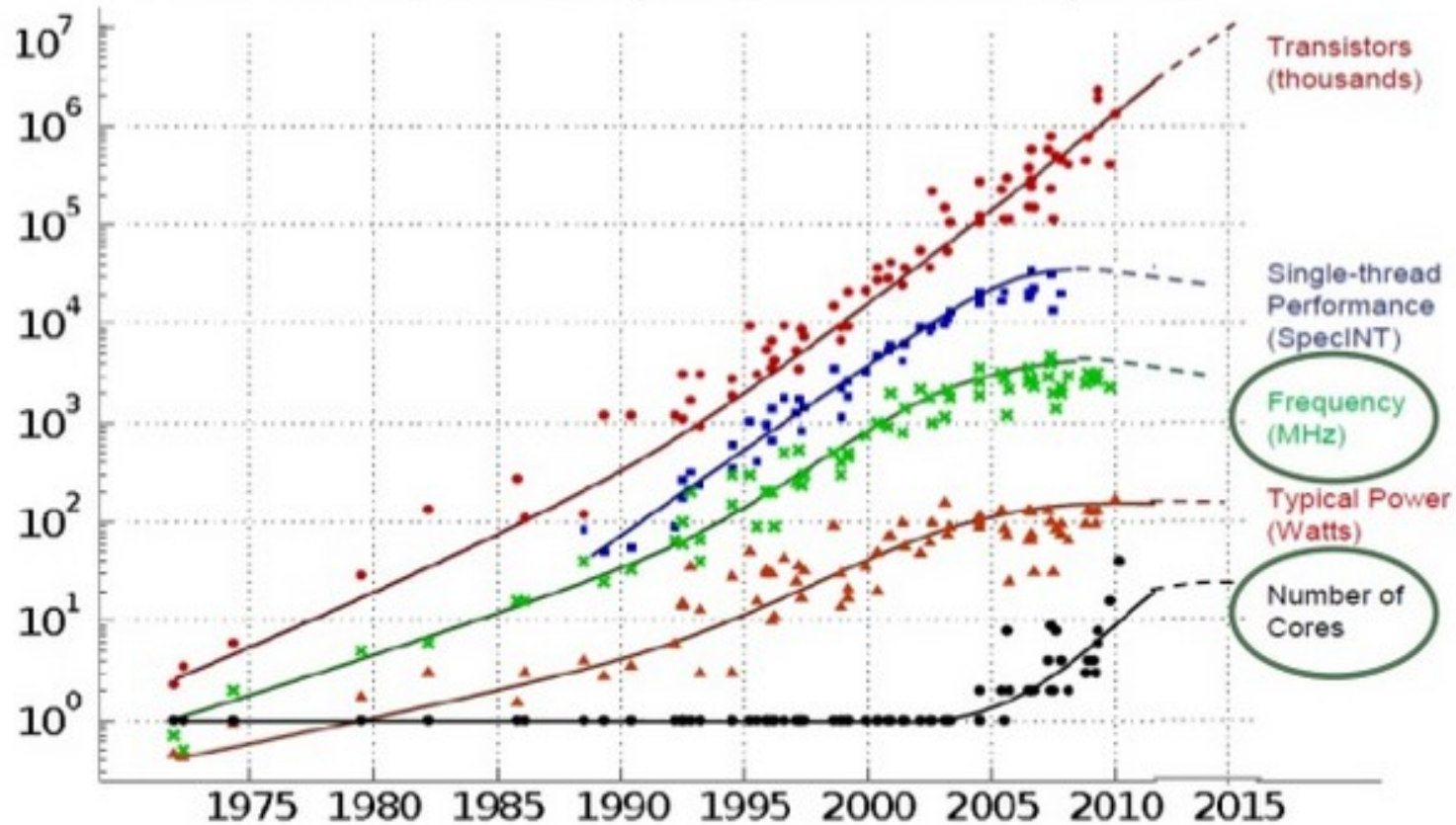


1926 Julius Lilienfeld osztrák fizikus: FET szabadalom (szigetelő réteg a kapuhoz)

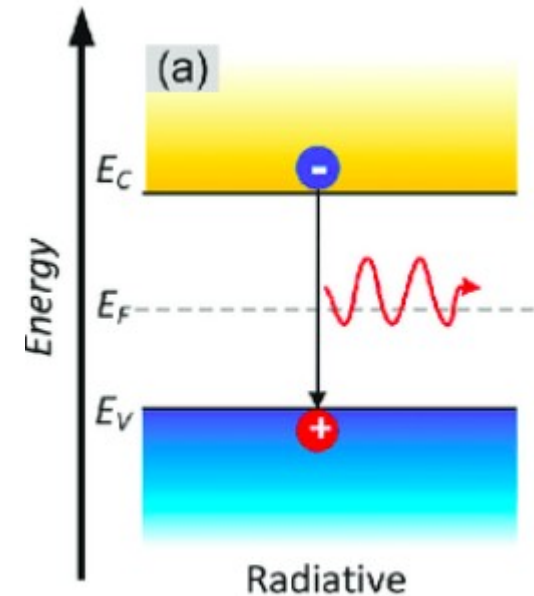
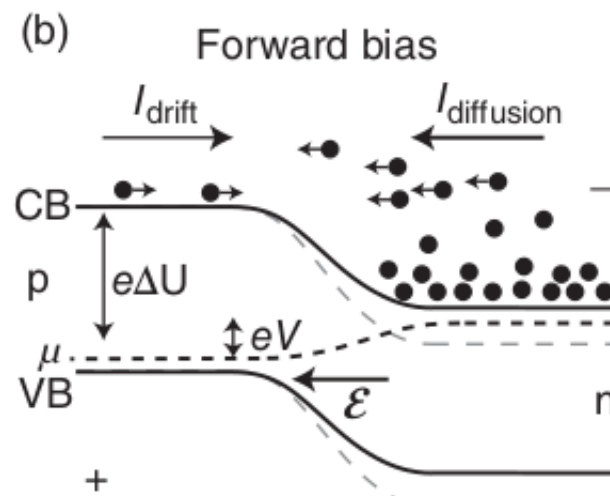
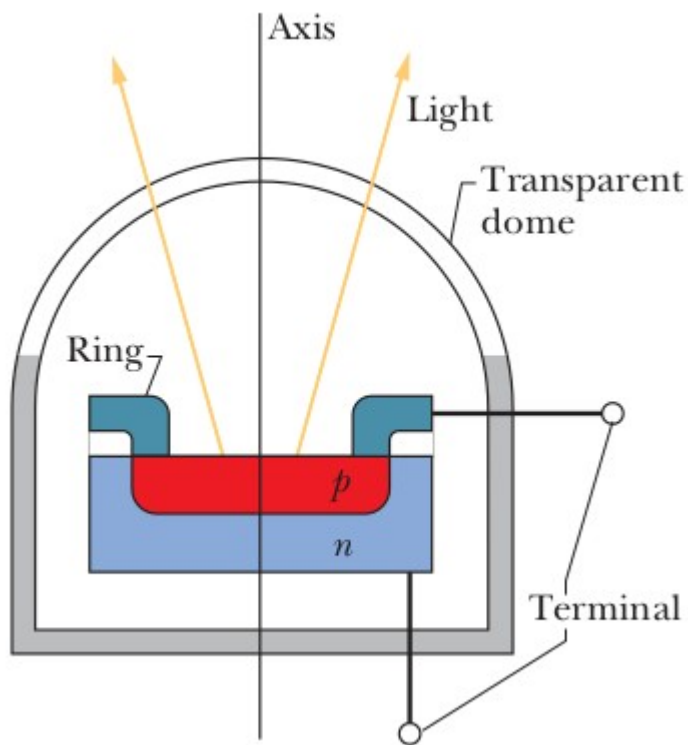
1959: felfedezés, Mohamed M. Atalla and Dawon Kahng at Bell Labs, SiO₂ legyen a szigetelő réteg!

Moore-törvény: 1 csipre integrált tranzisztorok száma exponenciálisan nő

Power and Heat Problems Led to Multiple Cores and Prevent Further Improvements in Speed

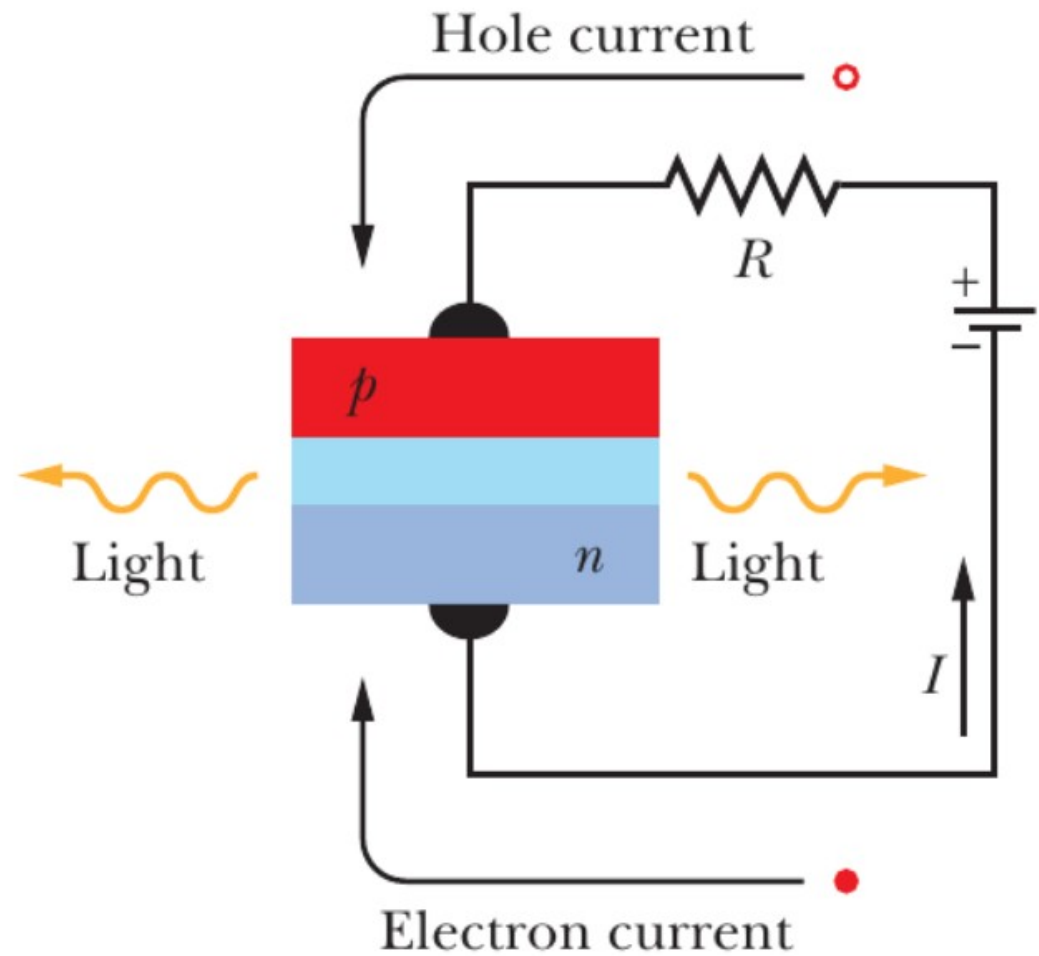


Fotodióda: pn-átmeneten nyitóirányú áram \rightarrow sok rekombináció \rightarrow sok fotonkibocsátás



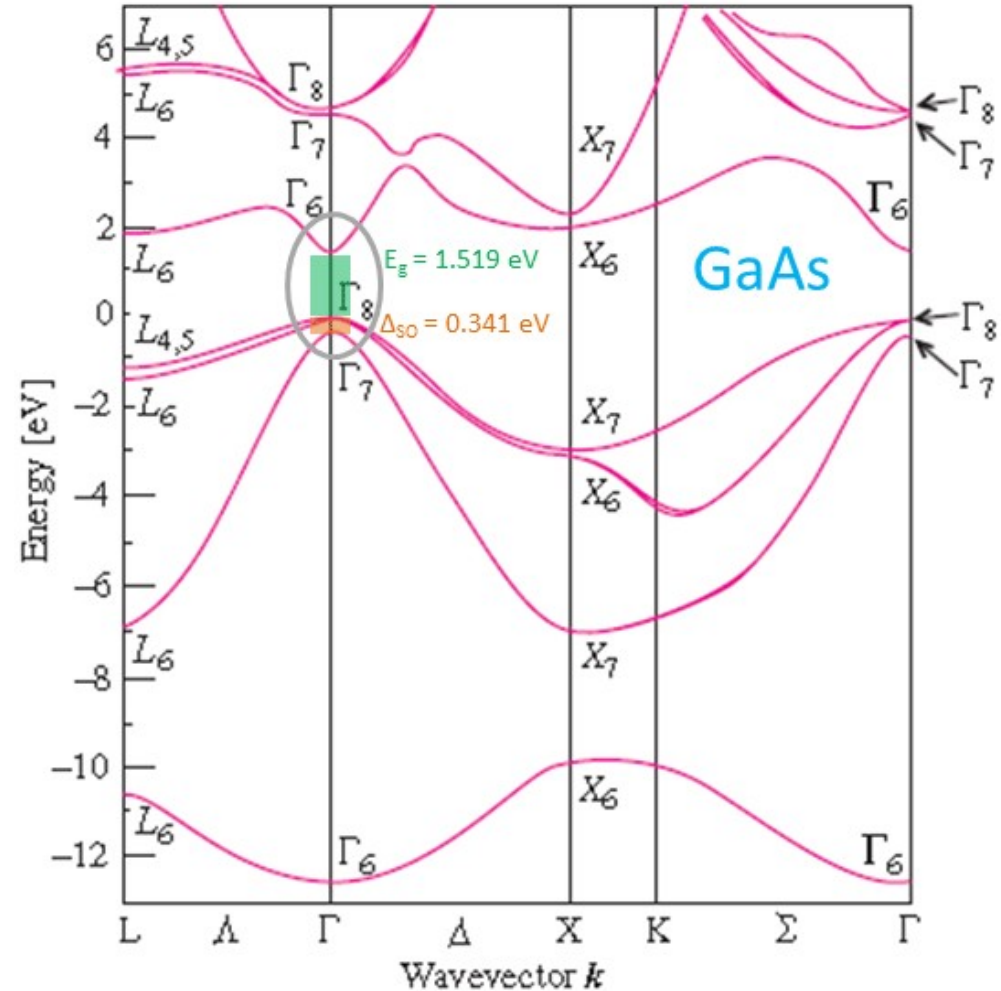
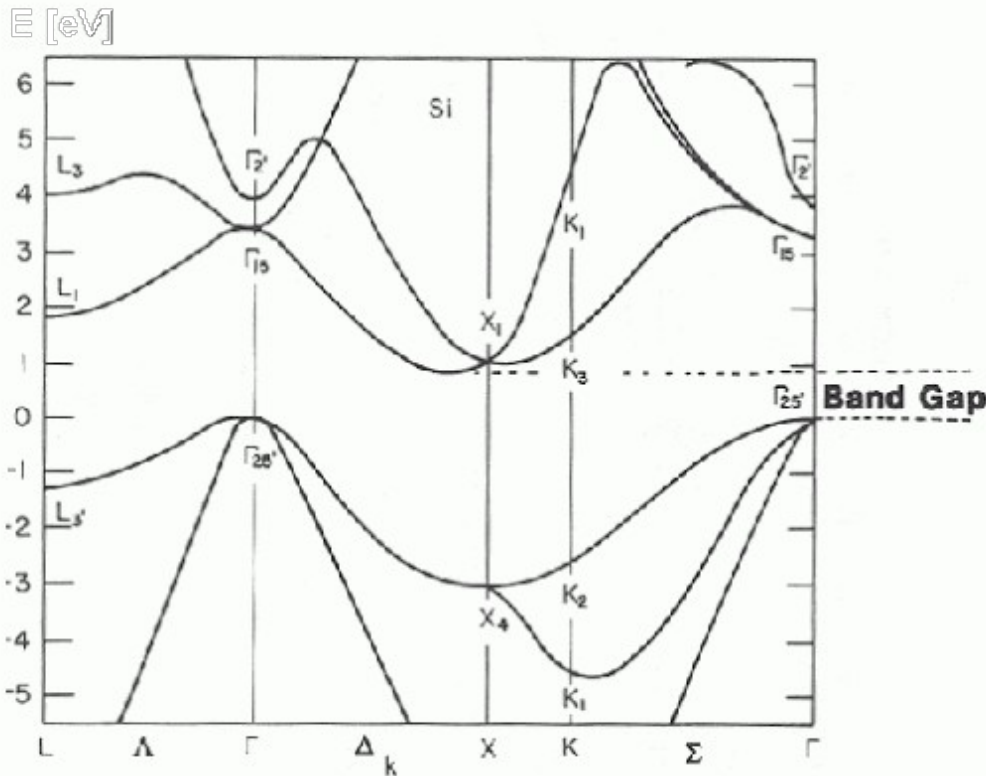
$$h\nu \approx E_g$$

LED: lyuk- vagy az elektronáram a nagyobb?



- A)** elektronáram
- B)** attól függ, mekkorák az effektív tömegek
- C)** egyformák
- D)** attól függ, a kiürített tartomány p vagy n oldala vastagabb

Fotodióda: Tiszta kristályban direkt gap kell az impulzusegmaradás miatt



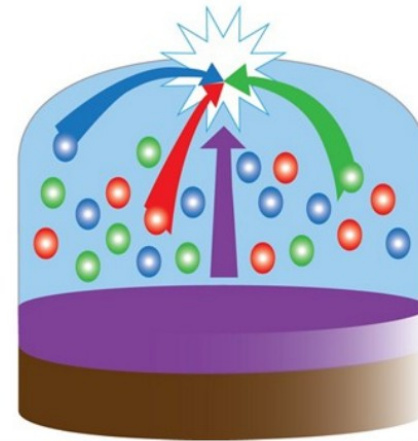
$$p_{\text{foton}} = \frac{E_g}{c} \ll \hbar k_{\text{max}} = \frac{h}{a}$$

pl. szilícium: $E_g = 1.12 \text{ eV}$, $a = 0.54 \text{ nm}$
 $6e-28 \text{ kgm/s} \ll 1.2e-24 \text{ kgm/s}$

egy fononnak kell elvinnie a CBM és VBM impulzuskülönbségét
 → kisebb valószínűség (foton ÉS fonon)

Fehér fényt LED-ekkel: RGB keveréssel (monitor) vagy foszforeszkáló bevonattal (lámpa)

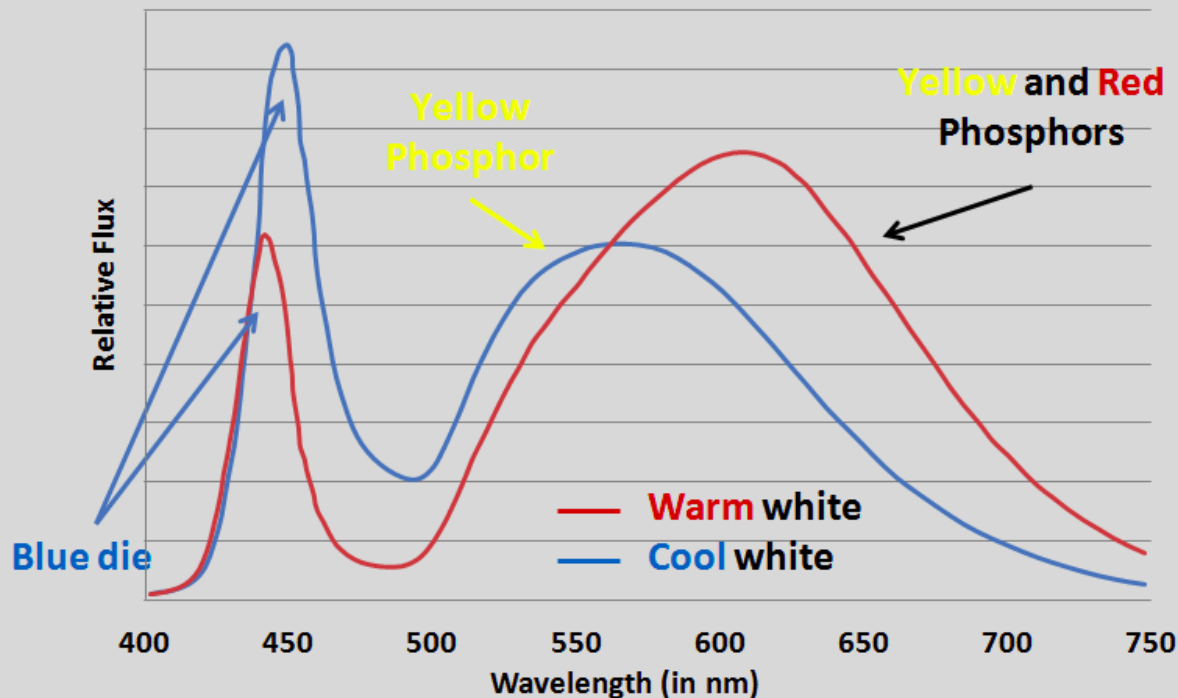
foszforeszkáló bevonat: szélesebb spektrum, közelebb a természetes napfényhez



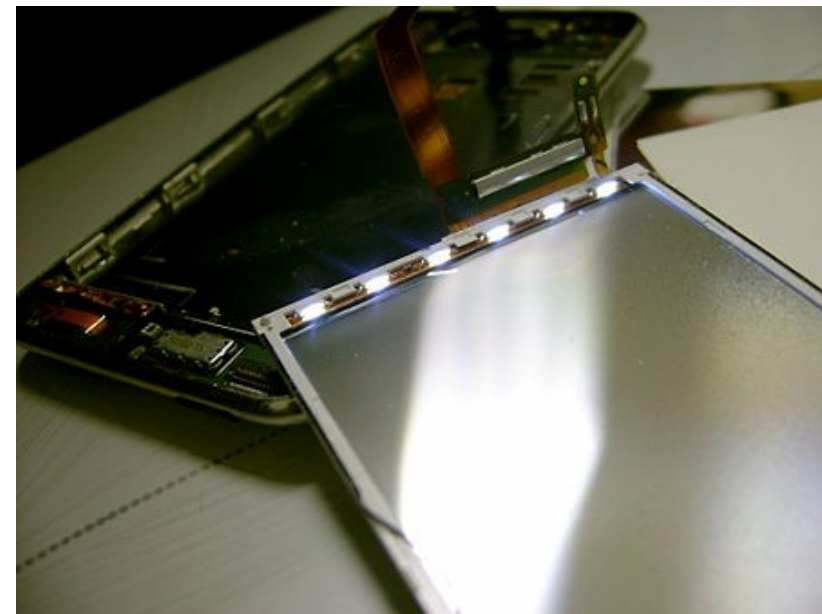
RGB: a spektrum vonalas, viszont bármilyen színhatás elérhető

Credit: C&EN

Comparison of White LEDs



LED-kijelzők: valójában LCD-LED, fehér LED-ek fényét szűrik (pl. iPod Touch)



A fehér LED-izzóhoz kékes fényű LED kellett, ezt 1993-ban Nakamura fejlesztette ki → 2014, Nobel



2014 fizikai Nobel-díj:
Nakamura, Akasaki,
Amano,

"for the invention of efficient blue light-emitting diodes, which has enabled bright and energy-saving white light sources"

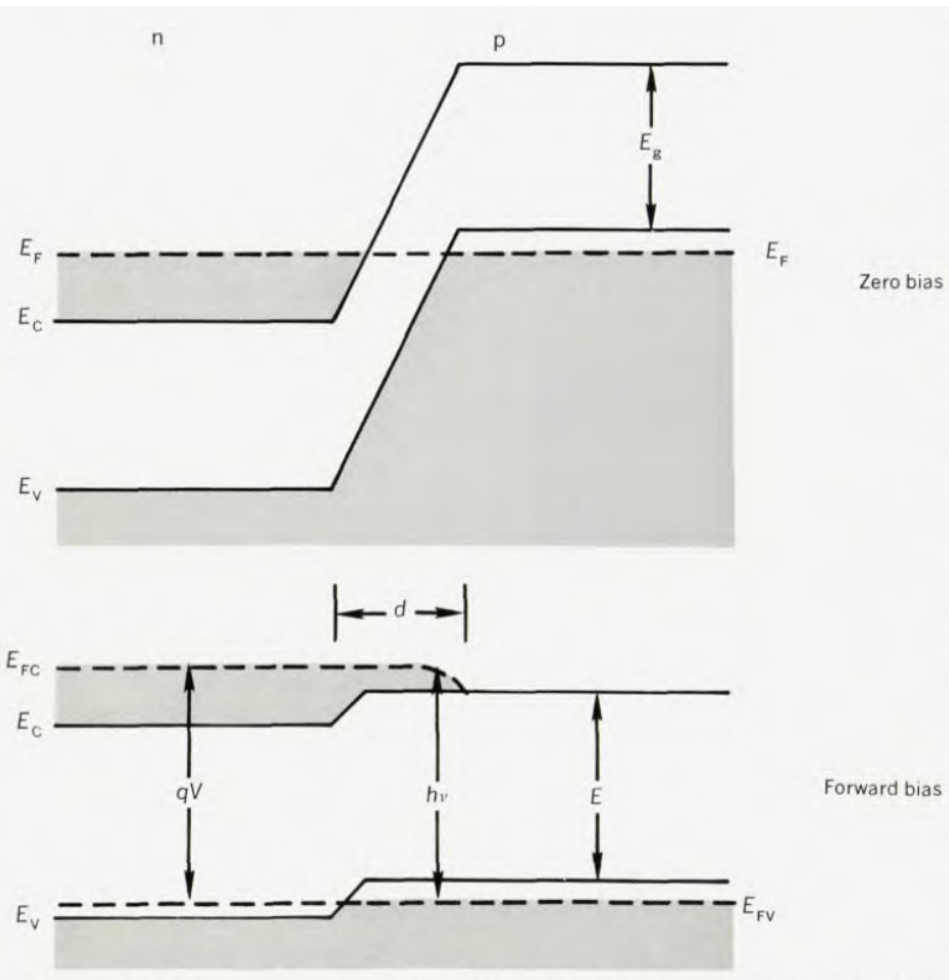
GaN – en alapul

At the time, many considered creating a GaN LED too difficult to produce; the founder of Nichia, Nobuo Ogawa (1912–2002), supported and funded Nakamura's GaN project.

1989: Ogawa ceded presidency to his son-in-law Eiji Ogawa, who ordered to suspend work on GaN: too much time and money. Nakamura continued on his own.

1993: Nakamura succeeded in creating a commercial viable prototype, more than 100 times brighter than other blue LEDs. Nichia pursued developing the product. The company's gross receipt: 1993, just over ¥20 billion yen(≈US\$200 million) → 2001, ¥80 billion(≈US\$800 million), 60 percent is sales of blue LED products.

Diódából robusztus, olcsó, könnyen vezérelhető lézert lehet csinálni (junction laser)



Lézerhez populációinverzió kell: sok elektron és lyuk. Ehhez pn-átmenet egyik oldalán a Fermi-energia a sávba kell eszen (dópolás)

Physics Today 24, 3, 42 (1971)

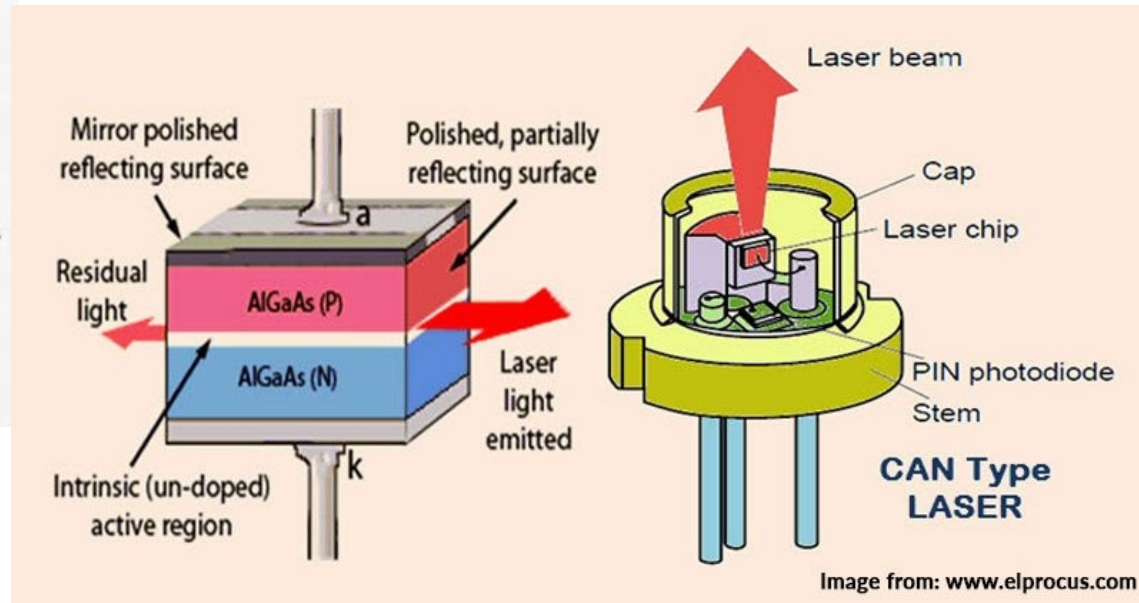
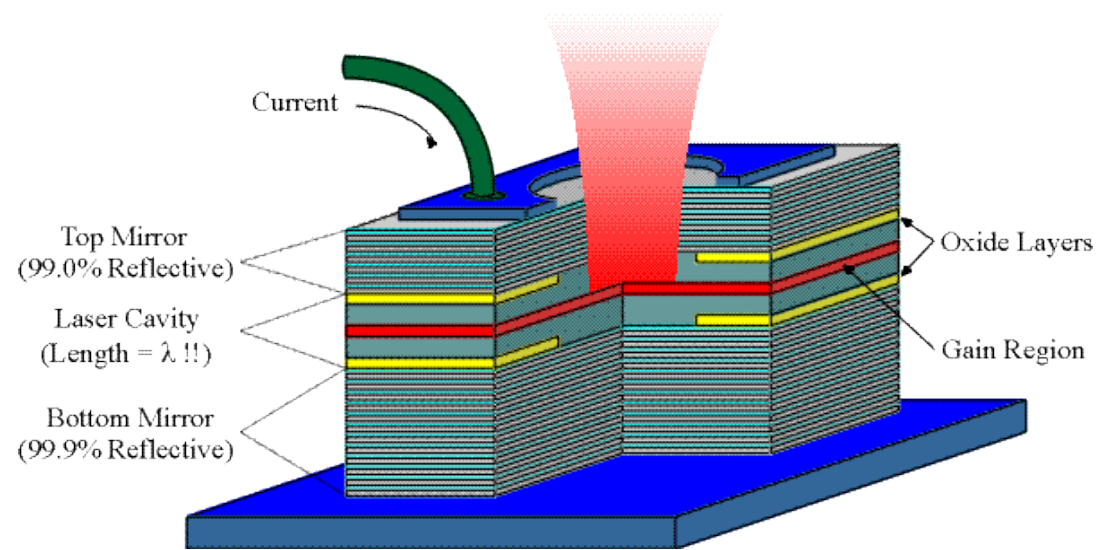


Image from: www.elprocus.com

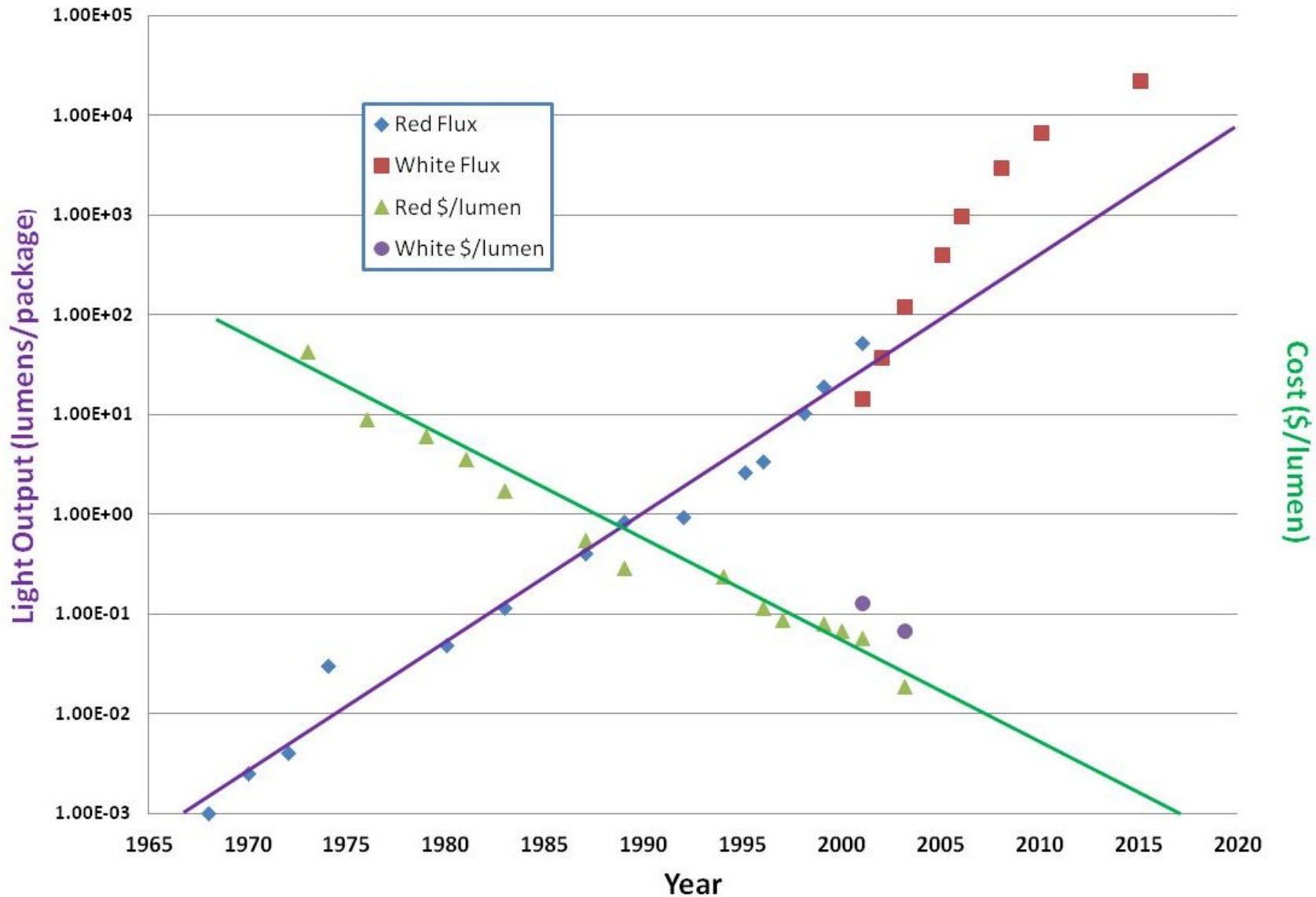
A lézerdiódák optikai adatátvitelt tesznek lehetővé (CD/DVD, optikai kábel)



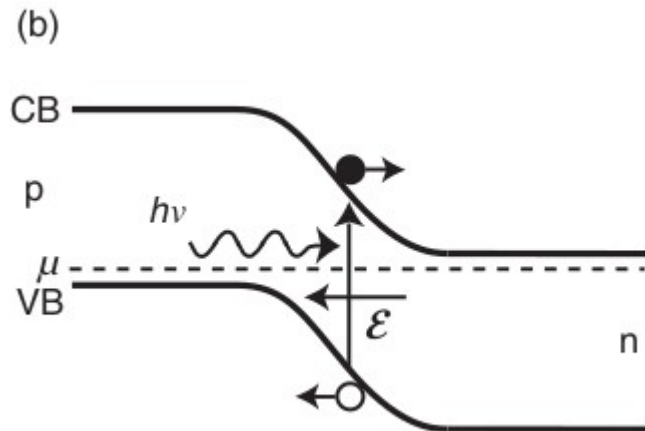
VCSEL (Vertical Cavity Surface Emitting Laser)

A diódák fejlődése exponenciális: olcsóbbak, fényesebbek

Haitz's Law



Fotocella, napelem: foton hoz létre e/lyuk párt, amit a tértöltés kisöpör a pn-átmenet kiürített tartományából

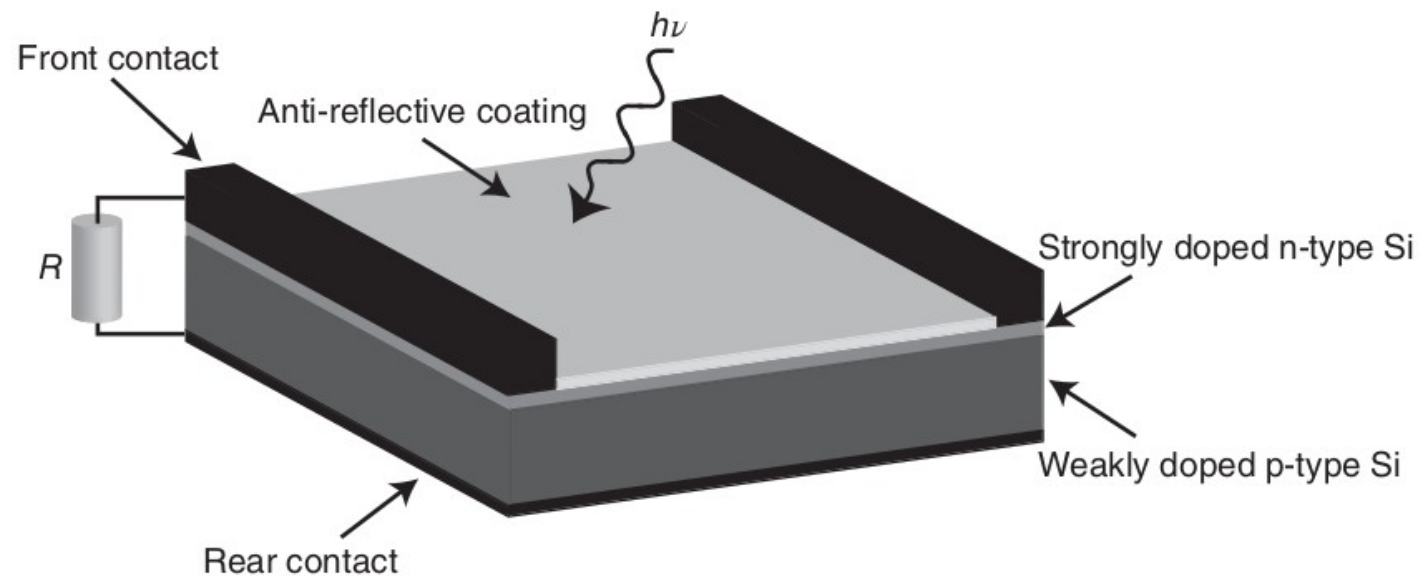


1) beeső foton e-lyuk párt kelt a kiürített tartományban

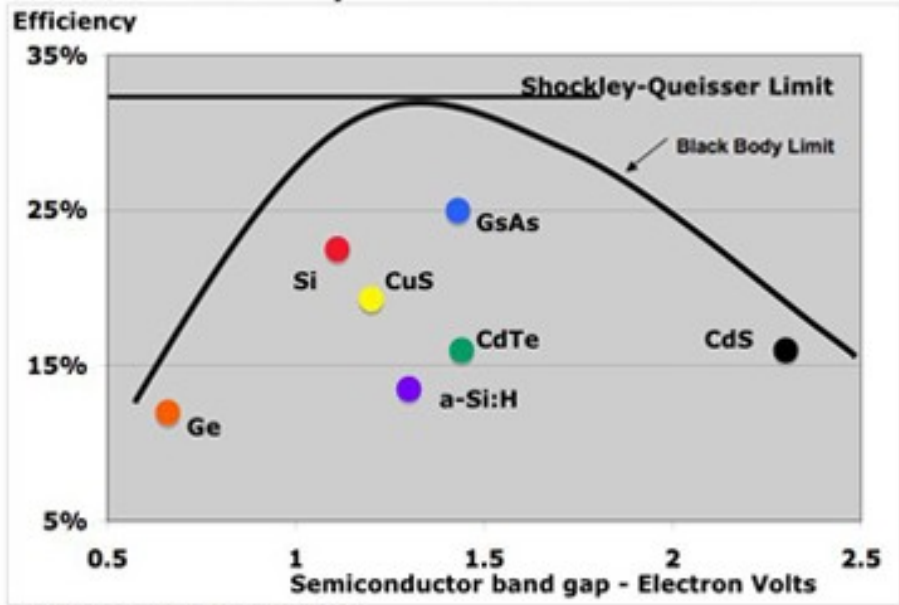
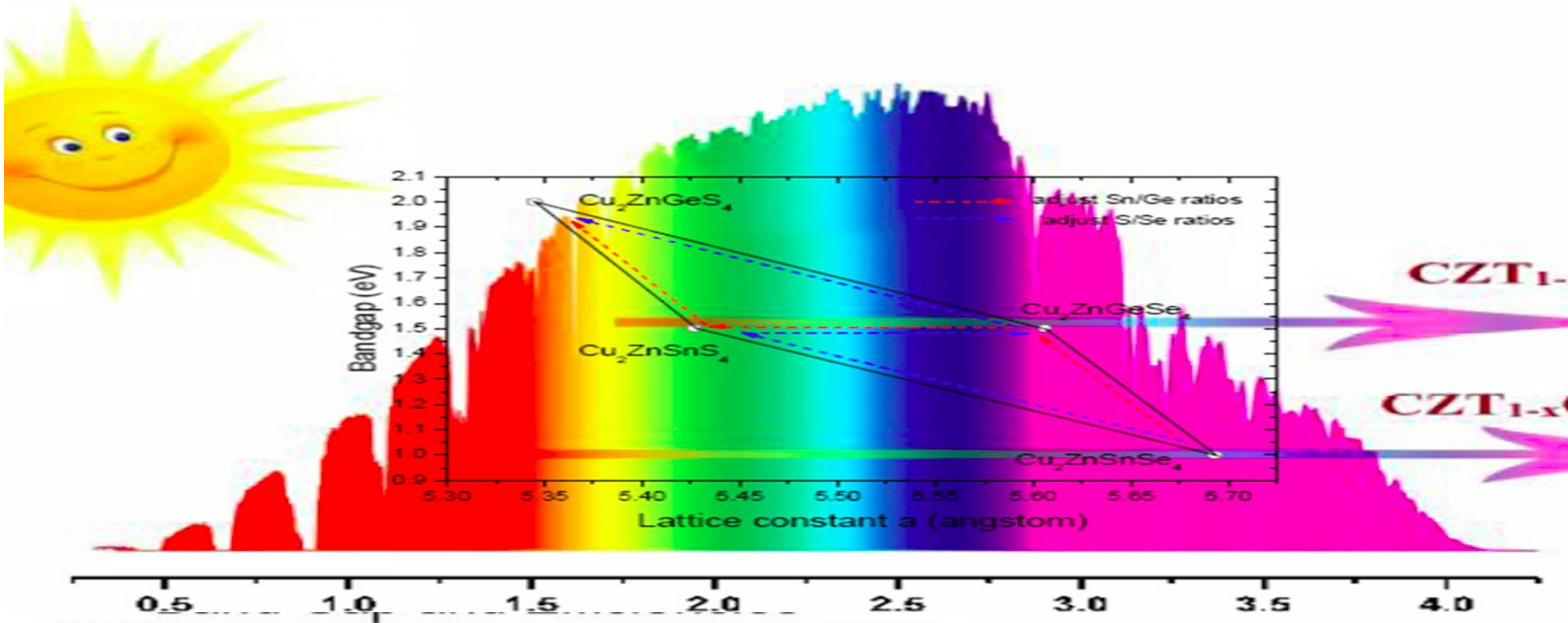
2) tértöltés e-t jobbra, lyukat balra söpri

3) e gyorsan lecsorog CBM szintre, lyuk felcsorog VBM szintre

4) hasznosítható feszültség: $U_e = \text{CBM} - \text{VBM}$



A hasznosítható munka félvezetőtől függ, az egyszerű napelemekre a hatékonyság határa 35%



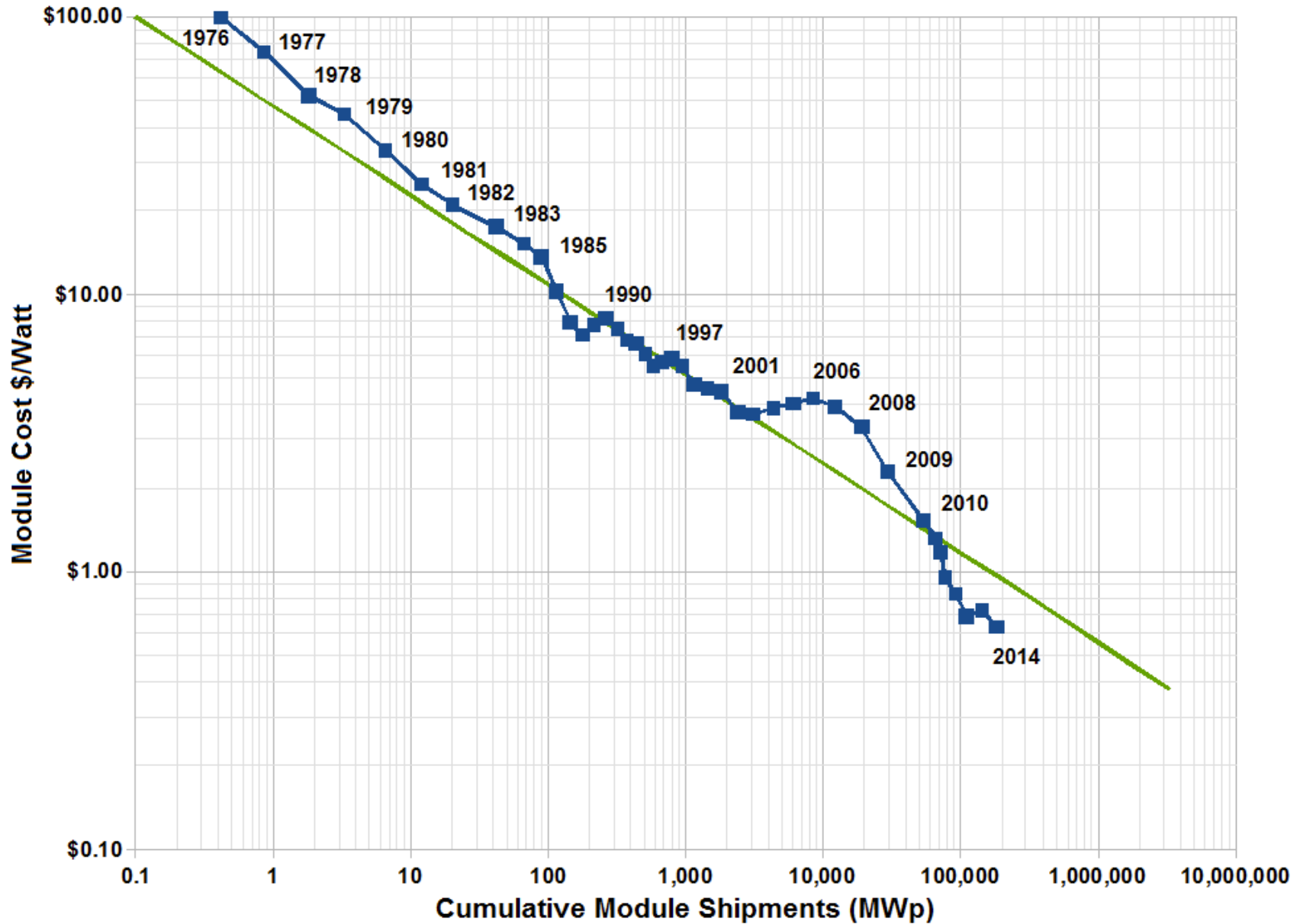
Kis tiltott sáv E_g : sok fotont elnyel, de kicsi a hasznosítható feszültség

Forrás, stratégiák a napelemek hatékonyságának javítására:

http://solarcellcentral.com/limits_page.html

A napelemek fejlődése is exponenciális

Swanson's Law



Tiszta félvezető: hol van a kémiai potenciál?

Egy tiszta félvezetőben a tiltott sáv 1.15 eV, a lyukak és elektronok effektív tömege az elektron tömegének 0.75-szöröse, ill. 0.3-szorosa. Szobahőmérsékleten az alsó sávtól hány eV-ra van a kémiai potenciál?

megoldáshoz: az előző órai képletekből az elektronok/lyukak effektív állapotsűrűsége:

$$N_{\text{eff}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{m^* k_B T}{\pi \hbar^2} \right)^{3/2}$$

betöltési valószínűségük: elektronok: $f_{\text{FD}}(E=E_g)$,
lyuk=nincs elektron: $1-f_{\text{FD}}(E=0)$

koncentráció = állapotsűrűség \times betöltési valószínűség

tiszta félvezetőben ugyanannyi elektron van, mint lyuk: $n = p$

$$N_{\text{eff, e}} f(E_g) = N_{\text{eff, h}} (1 - f(0))$$

kis levezetéssel:

$$\mu = \frac{E}{2} + \frac{3}{4} k_B T \ln \left(\frac{m_h^*}{m_e^*} \right)$$

Példa: Félvezetőben nagyenergiás foton

Egy pn-átmenet kiürített tartományába ($E_g = 1.2 \text{ eV}$) egy nagyenergiás foton érkezik, 10 pm hullámhosszú. Több, a vegyértéksávbéli elektronon szóródik, amiket felgerjeszt a vezetési sávba. Legfeljebb hány elektront tud felgerjeszteni?

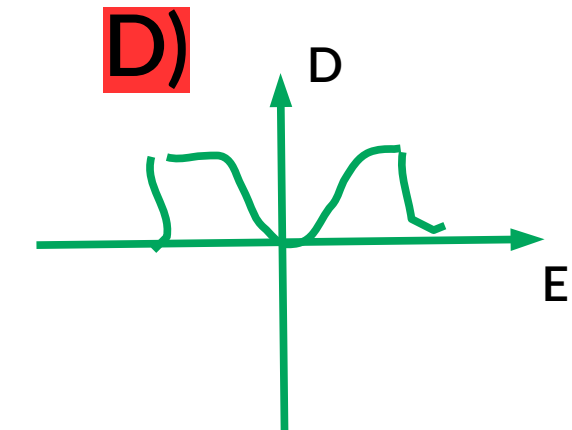
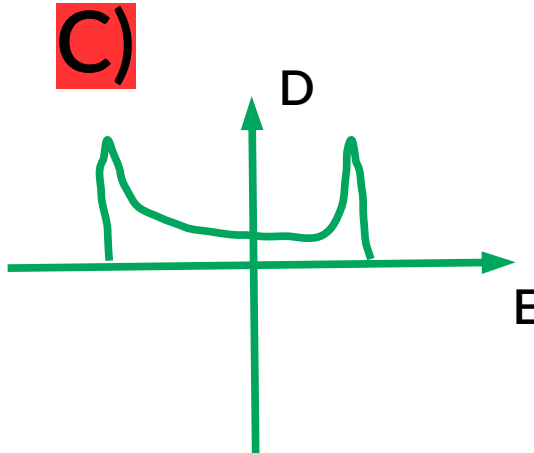
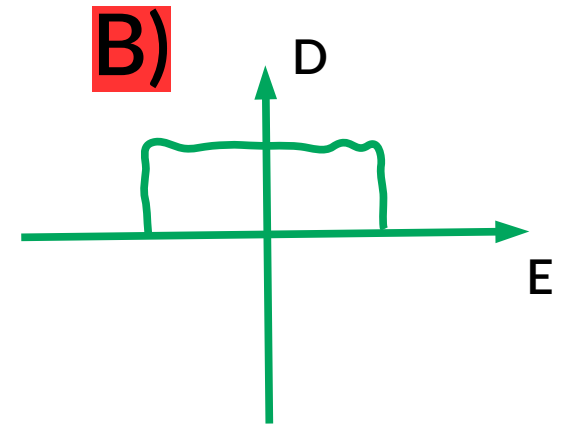
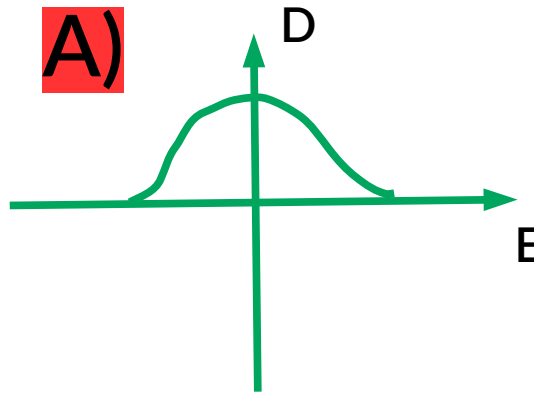
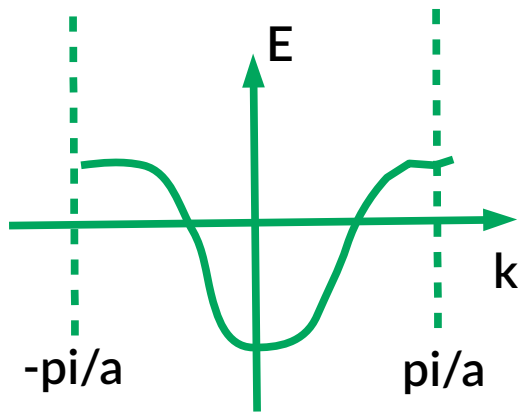
Példa: Fermi-Dirac-eloszlás

Egy 114.5 Celsius hőmérsékletű fémekben az E energiaszint betöltési valószínűsége 0.28. Ez a szint hány eV távolságra van a Fermi-energiától? A válasza legyen negatív, ha a Fermi-energia alatt van, pozitív, ha felette.

Az elektron tömege $m=9.11 \cdot 10^{-31}$ kg, a Planck-állandó $h=6.62 \cdot 10^{-34}$ Js, a Boltzmann-állandó $k=1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K, az elektron töltése $e=-1.6 \cdot 10^{-19}$ C

Melyik állapotsűrűség?

Az ábrázolt egydimenziós diszperziós relációhoz melyik állapotsűrűség-görbe tartozhat?



Félvezető vezetőképessége

Hogyan változik egy (tisztá, azaz intrinsic) félvezető vezetőképessége, ha emeljük a hőmérsékletet?

- A)** Nő, hőmérsékleti gerjesztés miatt
- B)** Csökken, atomtörzsek hőrezgése miatt
- C)** Nem változik (egyik hatás sem lényeges)
- D)** Nő vagy csökken, aszerint, hogy lyukak vagy elektronok adják a vezetést

Dópolt félvezető tömbi töltéssűrűsége

Egy dópolt félvezetőben milyen tértöltés alakul ki a tömbi részben?

- A) Pozitív
- B) Negatív
- C) Semmilyen (elektromosan semleges)
- D) Pozitív vagy negatív, attól függően, hogy p- vagy n-dópolt