

109. Áramvezetés homogén félvezetőben. Elektron áram, lyuk áram, Hall effektus. 110.

Félvezető ellenállások. Gunn effektus.

111. Félvezető eszközök fenomenologikus tárgyalásának alapegyenletei. Töltéshordozó mozgékonyág («drift») és diffúziós áram. Einstein összefüggés a mozgékonyág és a diffúziós állandó között.

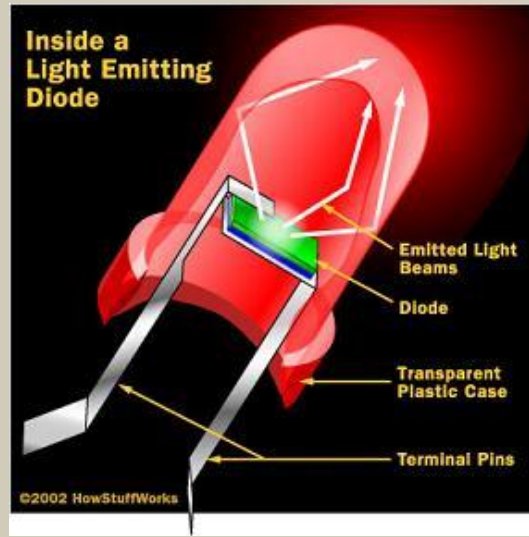
112. A p-típusú és az n-típusú félvezetők között összeérintés esetén fellépő kontakt potenciál. Az energianívók (szintek) külső statikus potenciállal történő eltolása.

113. A p-n átmeneti rétegen külső statikus feszültség hatására átfolyó áram. A rétegdióda kvalitatív modellje.

114. Elektron és lyuk áramok félvezetőkben. A sodródási áram, a diffúziós áram. A töltéshordozók dinamikája. Az egyensúlyi állapotból való kimozdítás és az oda visszatérő relaxáció. Elektron-lyuk párok gerjesztés, majd rekombinációja. Az elektron és lyuk transzport mozgásegyenletei.

115. Fotonok abszorpciója, spontán és indukált (stimulált) emissziója. Az atomok és elektron illetve lyuk-gáz alkotta test és a foton-sokaság kölcsönhatása. A termikus egyensúly Einstein egyenletei. A Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation (MASER) és a Light Amplification by Stimulated emission of Radiation (LASER) működési elve.

P – N RÉTEG-DIÓDA

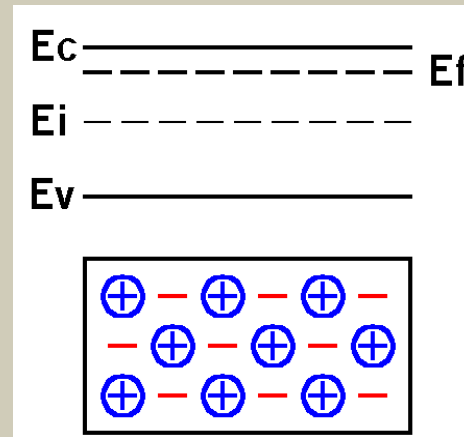
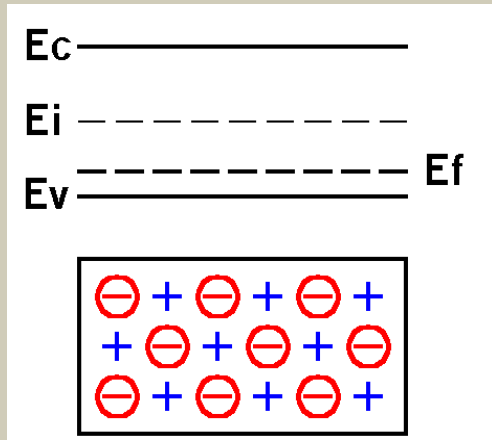


A legegyszerűbb elektronikus eszköz: a p – n rétegdióda

A működés megértésének alapja:
„BAND DIAGRAM” Sáv szerkezet

Kiindulás:
termodinamikai egyensúlyi állapot

P – N RÉTEG-DIÓDA



+ = mobile holes, p

Mi történik, ha a sávokat összeérintjük?

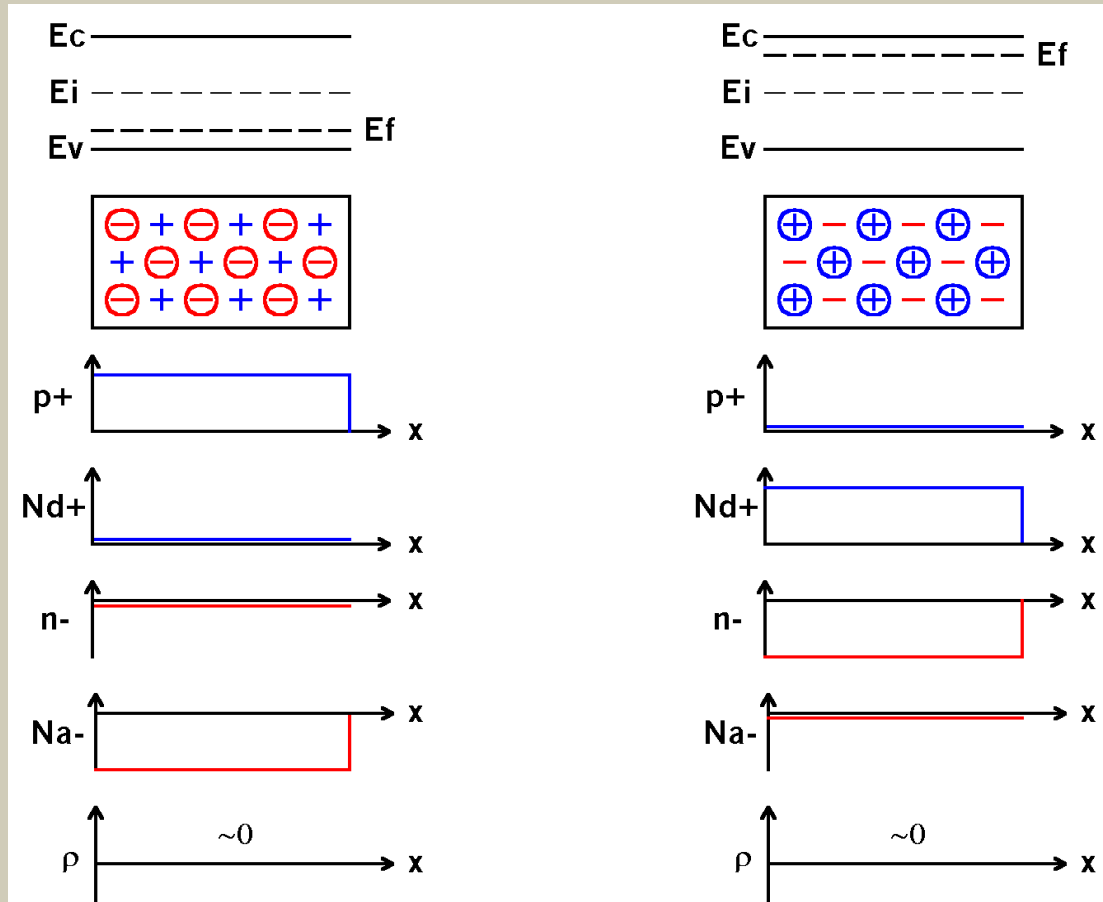
A Fermi energia szintek
egyensúlyban kiegyenlítődnek

Összeérintés előtt $t < 0$: kockák elválasztva

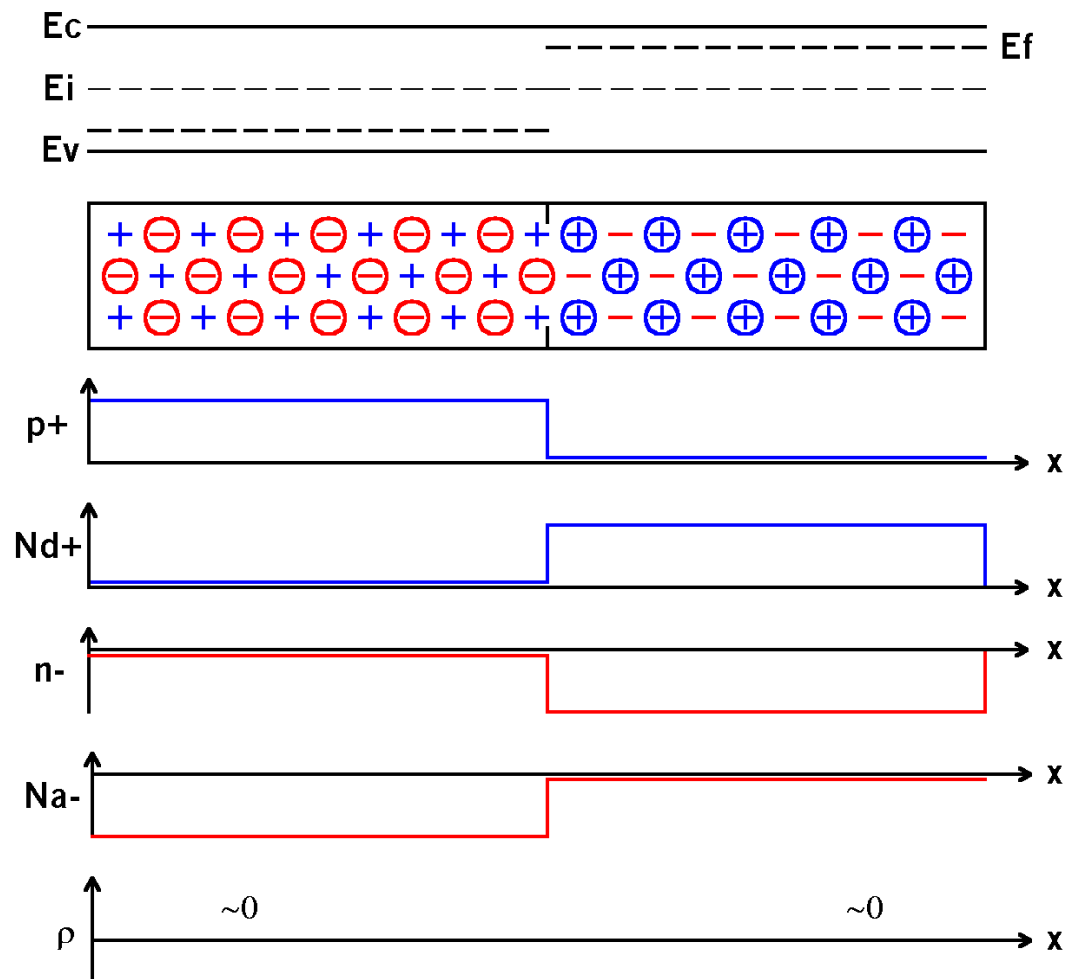
Time < 0

P-type piece

N-type piece

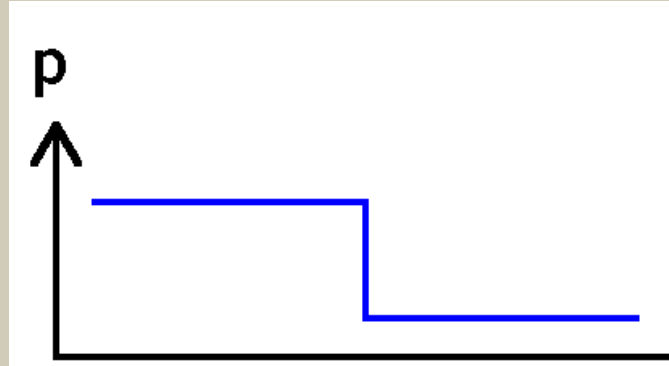


Összeérítés $t=0$: kockák határán töltés-gradiens



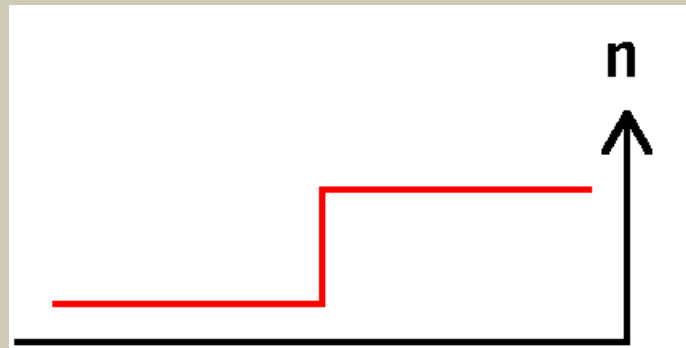
Töltés gradiens diffúziót okoz

Hole gradient



$$J_{p, \text{diffusion}} = -qD_p \frac{dp}{dx} = \text{current right, holes right}$$

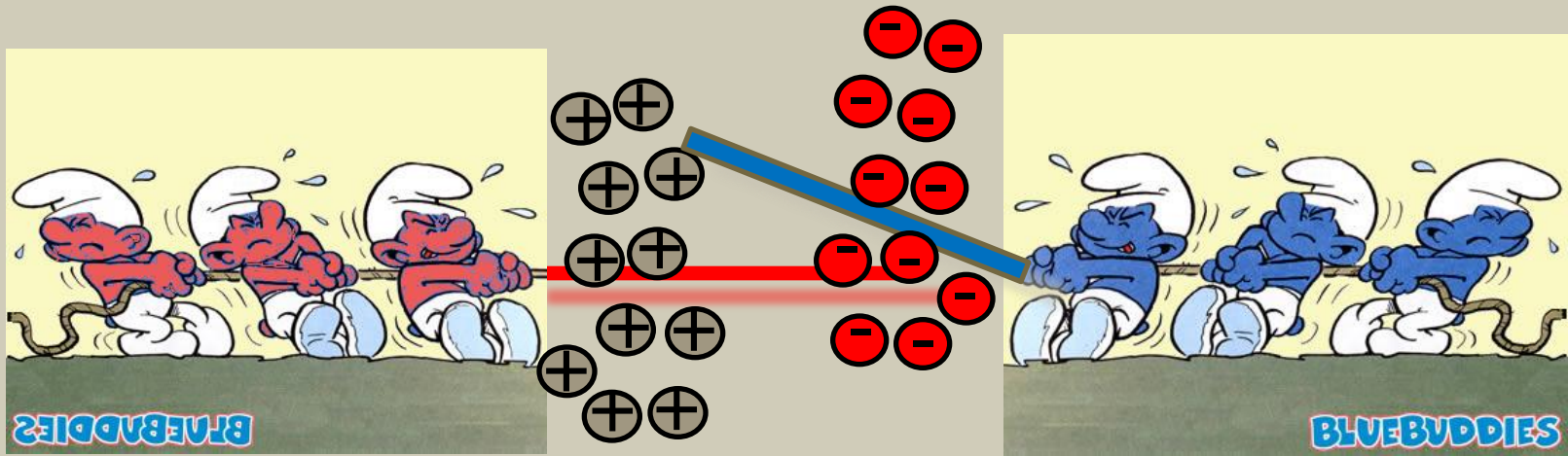
Electron gradient



$$J_{n, \text{diffusion}} = -qD_n \frac{dn}{dx} = \text{current right, electrons right}$$

Töltés gradiens diffúziót okoz



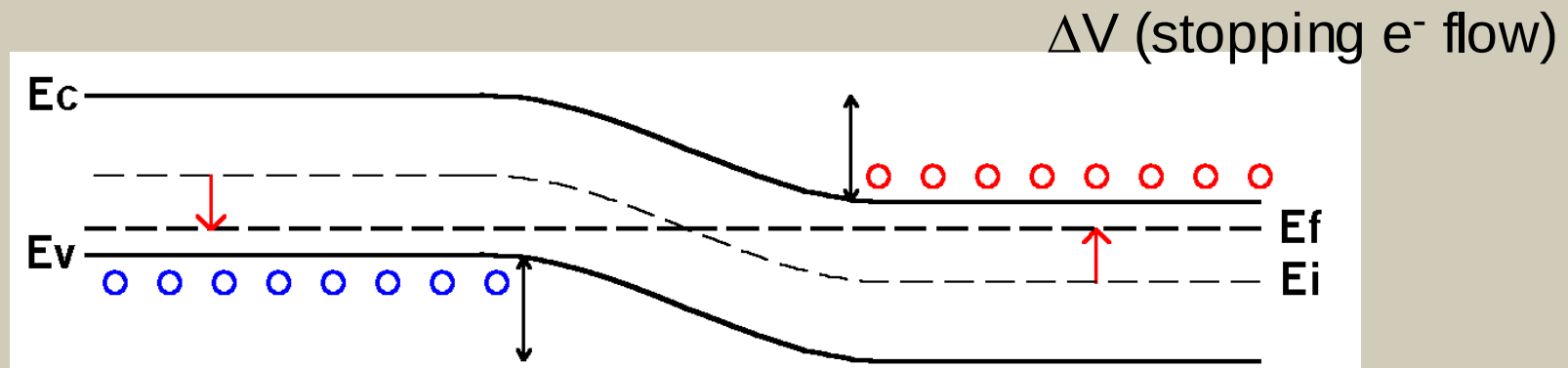


De a p és n töltések nem nagyon távolodhatnak el a réteghatártól, mert Coulomb vonzóerő hat közöttük, ami visszahúzza őket

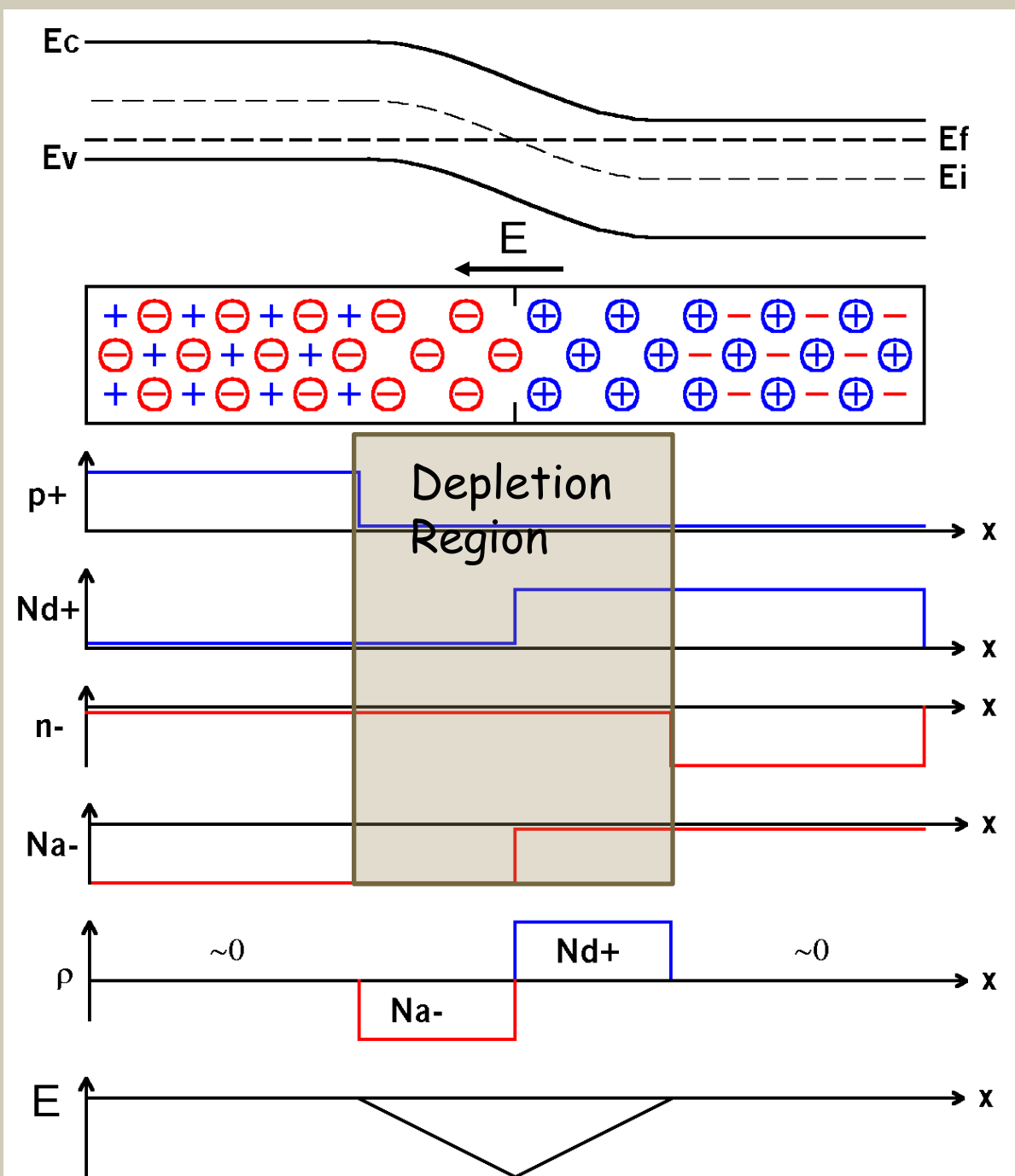
A töltés-”tengerek” szétválasztása kiürített réteget (depletion layer) hagy maga mögött



A rétegben „kontakt” feszültség-ugrás keletkezik



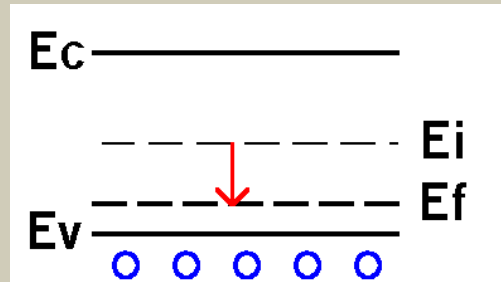
ΔV (stopping e^+ flow)



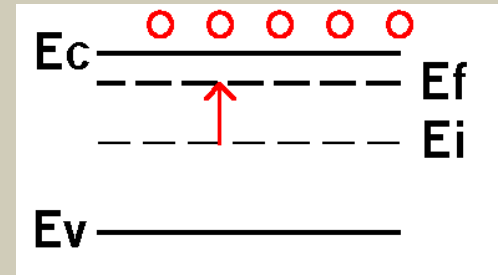
Mekkora a kontakt feszültség ugrás?

$$qV_{bi} = (E_i - E_F)_{Left} + (E_F - E_i)_{Right}$$

P side



N side



$$p \approx N_a$$

$$N_a = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$

$$(E_i - E_F)_{Left} = kT \ln \left(\frac{N_a}{n_i} \right)$$

$$n \approx N_d$$

$$N_d = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

$$(E_F - E_i)_{Right} = kT \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right)$$

$$V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a}{n_i}\right) + \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_d}{n_i}\right)$$

$$\Rightarrow V_{bi} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{N_a N_d}{n_i^2}\right)$$

N_a acceptor a p oldalon

N_d donor az n oldalon

„Egyoldalú” réteg

- Az egyik oldal erősen dópolt – a Fermi szint a sávhatáron .
- pl. p⁺-n réteg (erős B adalék enyhén dópolt szeleten)

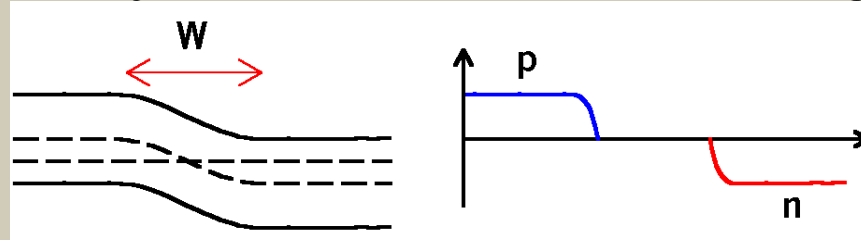
$$(E_i - E_F)_{Left} \approx E_i - E_V = E_G / 2$$

$$(E_F - E_i)_{Right} = kT \ln \left(\frac{N_D}{n_i} \right)$$

$$\Rightarrow V_{bi} = \frac{E_G}{2q} + \frac{kT}{q} \ln \left(\frac{N_d}{n_i} \right)$$

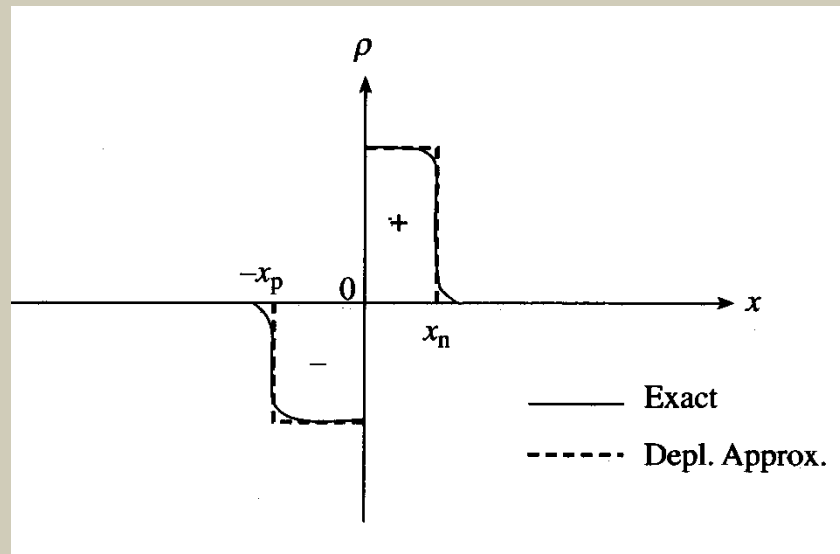
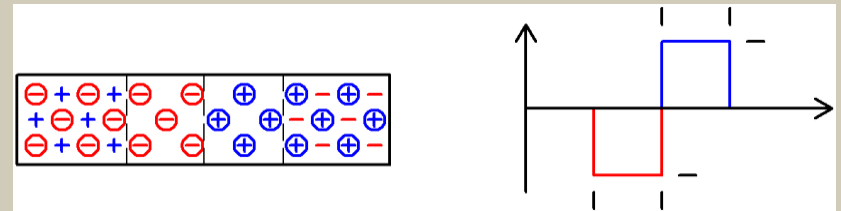
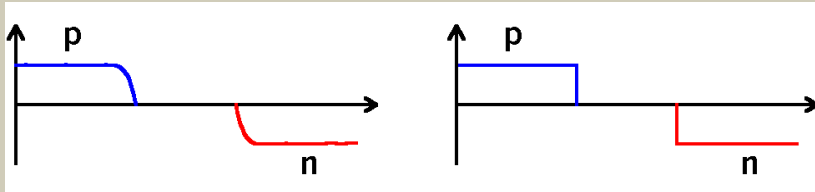
Milyen széles a kiürített réteg?

$$p = n_i e^{(E_i - E_F)/kT}$$



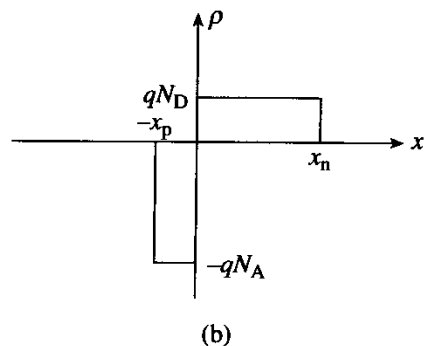
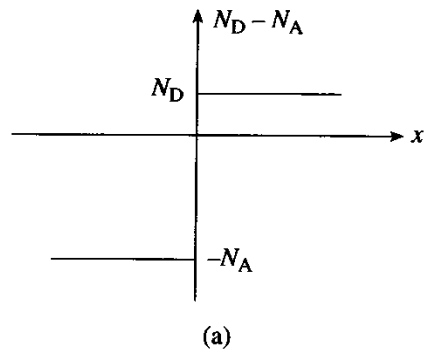
$$n = n_i e^{(E_F - E_i)/kT}$$

Közelítés: lépcsős függvényekkel



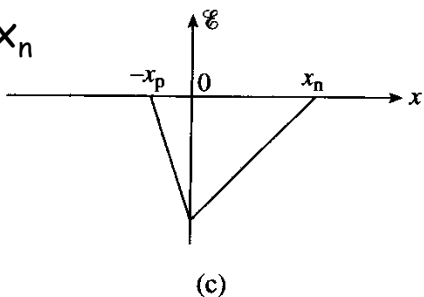
$$N_A x_p = N_D x_n$$

$$= W_D / (N_A^{-1} + N_D^{-1})$$

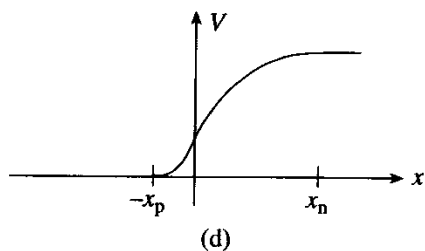


$$K_s \epsilon_0 \epsilon_m = -q N_A x_p = -q N_D x_n$$

$$= -q W_D / (N_A^{-1} + N_D^{-1})$$



$$V_{bi} = \frac{1}{2} |\epsilon_m| W_D$$



Adalék

Töltés
sűrűség

Elektromos
Tér

Elektrosztatikus
Potenmciál

A kiürített réteg vastagsága

$$W \equiv x_n + x_p = x_n + x_n \frac{N_D}{N_A} = x_n \left(1 + \frac{N_D}{N_A} \right) = x_n \left(\frac{N_A + N_D}{N_A} \right)$$

$$W = \left[\frac{2K_S \varepsilon_0}{q} \frac{N_A}{N_D (N_A + N_D)} V_{bi} \right]^{1/2} \left(\frac{N_A + N_D}{N_A} \right)$$

$$\Rightarrow W = \left[\frac{2K_S \varepsilon_0 (N_A + N_D)}{q N_D N_A} V_{bi} \right]^{1/2}$$

Meddig nyúlik át a kiürített réteg a p illetve n kockába?

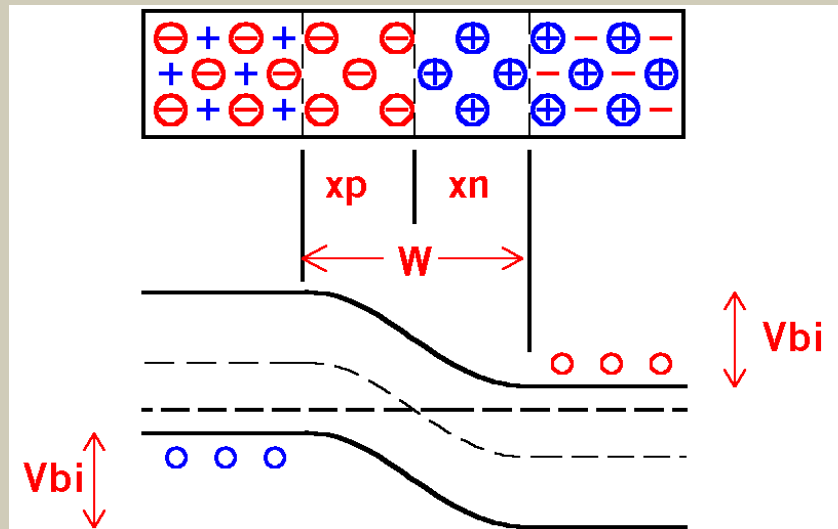
$$W = x_n \left(\frac{N_A + N_D}{N_A} \right)$$

$$x_n = W \left(\frac{N_A}{N_A + N_D} \right)$$

$$W = x_n \left(\frac{N_A + N_D}{N_A} \right) = x_p \left(\frac{N_A}{N_D} \right) \left(\frac{N_A + N_D}{N_A} \right)$$

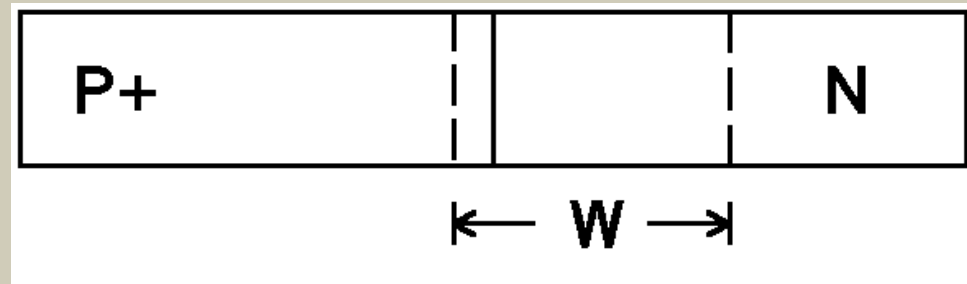
$$x_p = W \left(\frac{N_D}{N_A + N_D} \right)$$

Az n-oldali kiürítés p-oldali dópingtól függ
 A p-oldali kiürítés az n-oldali dópingtól függ
 pl. ha $N_A \gg N_D$ akkor $x_n \gg x_p$ „Egy oldalú réteg”

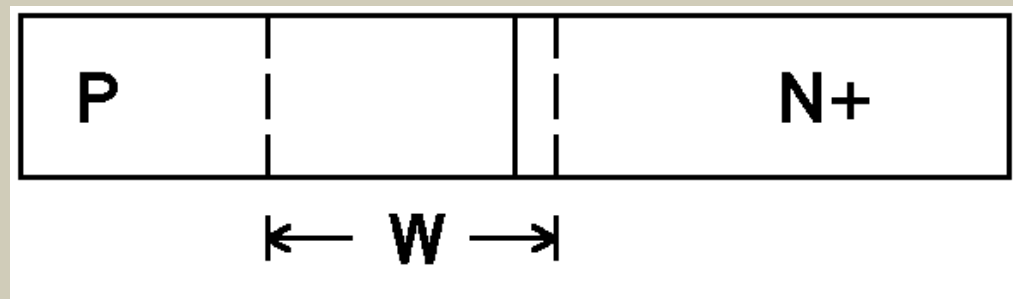


■

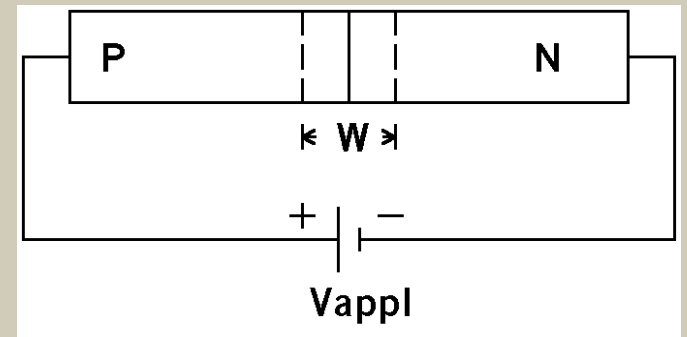
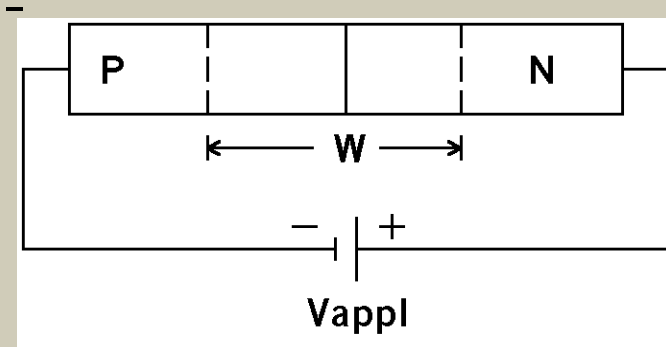
$$\text{"P}^+ - \text{N"} \Rightarrow N_a \gg N_d$$



$$\text{"P} - \text{N}^+ \Rightarrow N_a \ll N_d$$

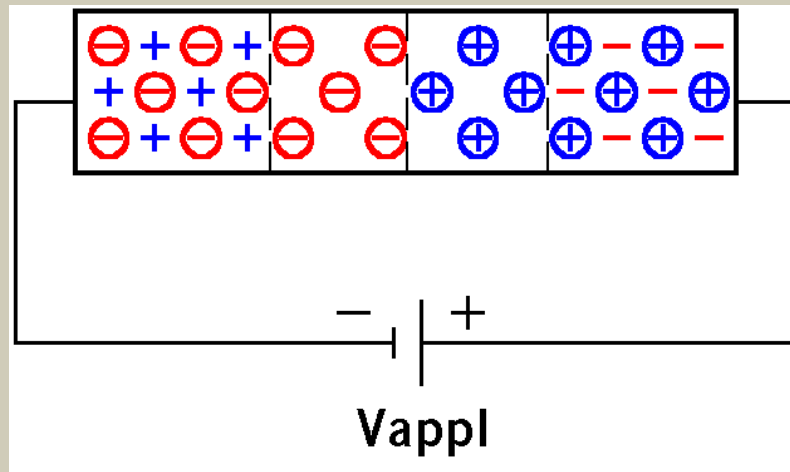


A P-N réteg feszültség alatt



Záró előfeszültség

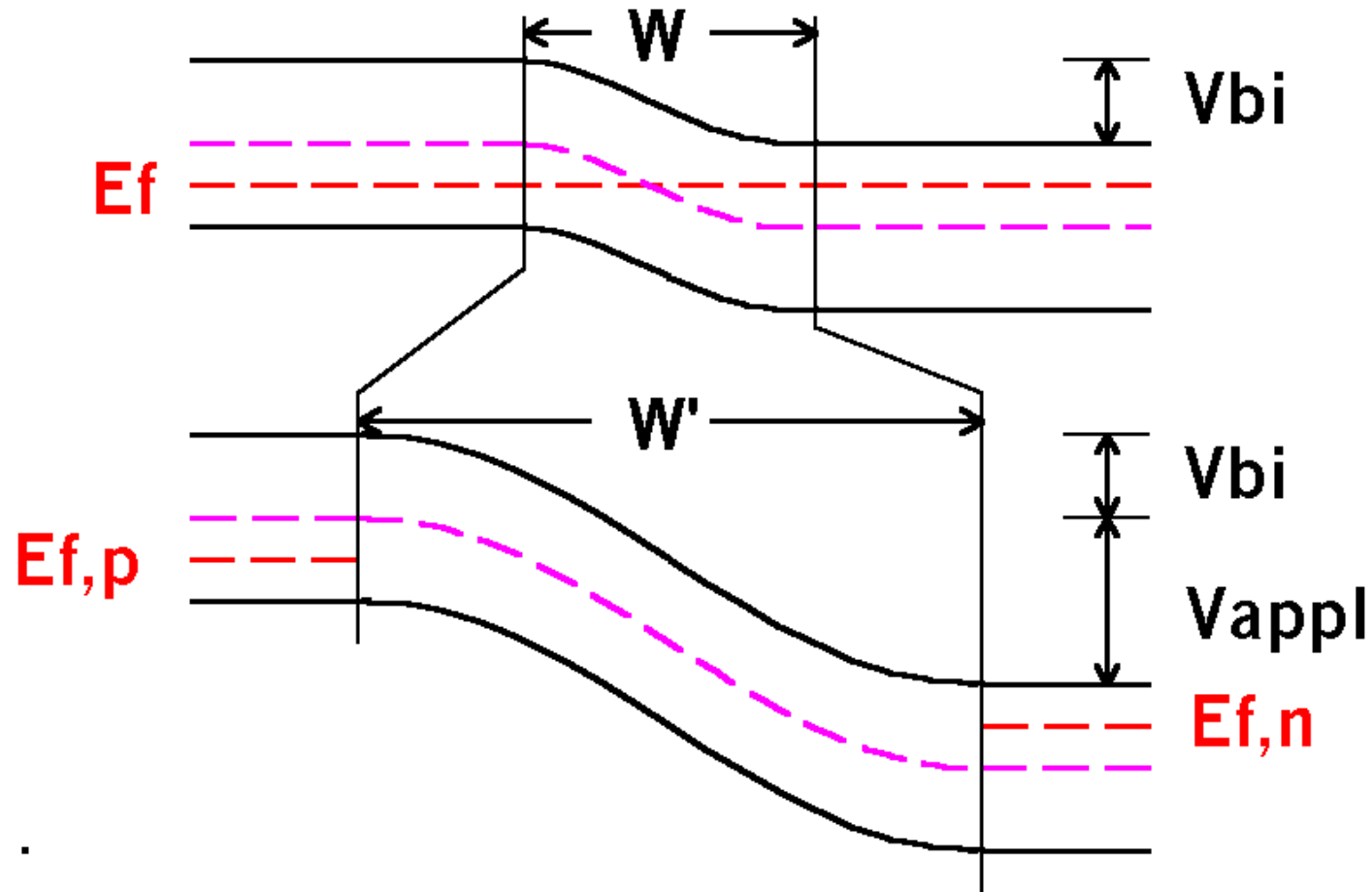
- +feszültség az n oldalon -feszültség a p oldalon:



$V_{applied}$ is sucking more:
holes (+) out of P-side
electrons (-) out of N-side

A kiürített réteg megnő

Záró feszültség sáv-szerkezet



Záró feszültség kiürítés

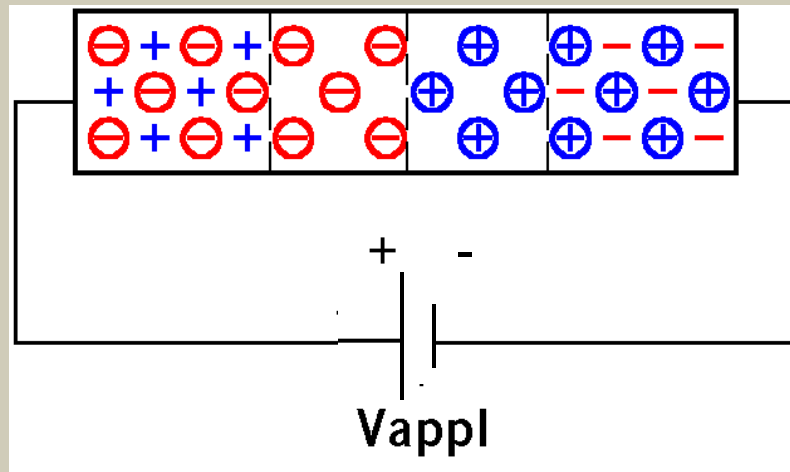
$$W = \left[\frac{2K_S \varepsilon_0}{q} \frac{(N_A + N_D)}{N_D N_A} (V_{bi} + V_{rev}) \right]^{1/2}$$

$$x_n = W(V_{rev}) \left(\frac{N_A}{N_A + N_D} \right) \quad x_p = W(V_{rev}) \left(\frac{N_D}{N_A + N_D} \right)$$

Az alkalmazott feszültség megzavarja az egyensúlyt E_F nem állandó

A záró feszültség hozzáadódik a beépített feszültséghez

Nyitó irányú feszültség



Negatív feszültség az n oldalon, pozitív a p oldalon

Több elektront adunk n-hez, több lyukat p-hez

A kiürített réteg összeszűkül

Nyitó irányú kiürítés

$$W = \left[\frac{2K_S \varepsilon_0}{q} \frac{(N_A + N_D)}{N_D N_A} (V_{bi} - V_{fwd}) \right]^{1/2}$$

$$x_n = W(V_{fwd}) \left(\frac{N_A}{N_A + N_D} \right) \quad x_p = W(V_{fwd}) \left(\frac{N_D}{N_A + N_D} \right)$$

Legyen $V_{appl} = +$ nyitó irány esetén

$V_{appl} = -$ záró irány esetén

$$W = \left[\frac{2K_S \varepsilon_0}{q} \frac{(N_A + N_D)}{N_D N_A} (V_{bi} - V_{appl}) \right]^{1/2}$$

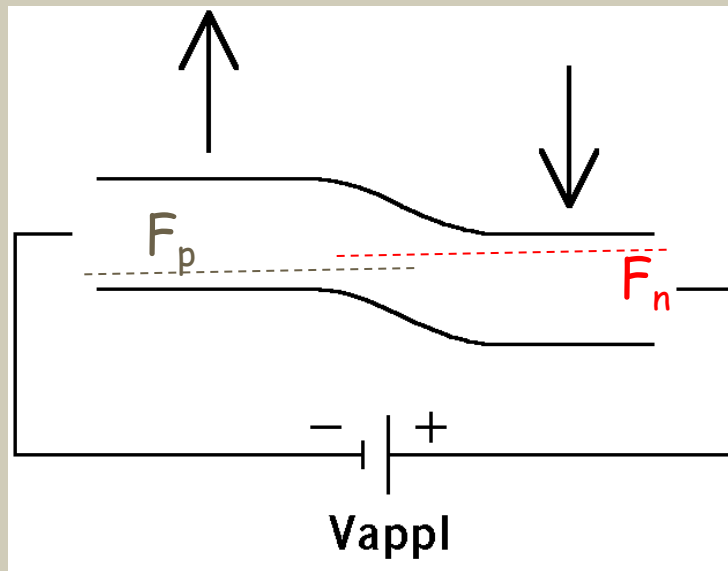
$$x_n = W(V_{appl}) \left(\frac{N_A}{N_A + N_D} \right)$$

$$x_p = W(V_{appl}) \left(\frac{N_D}{N_A + N_D} \right)$$

Positive voltage pulls bands down- bands are plots of electron energy

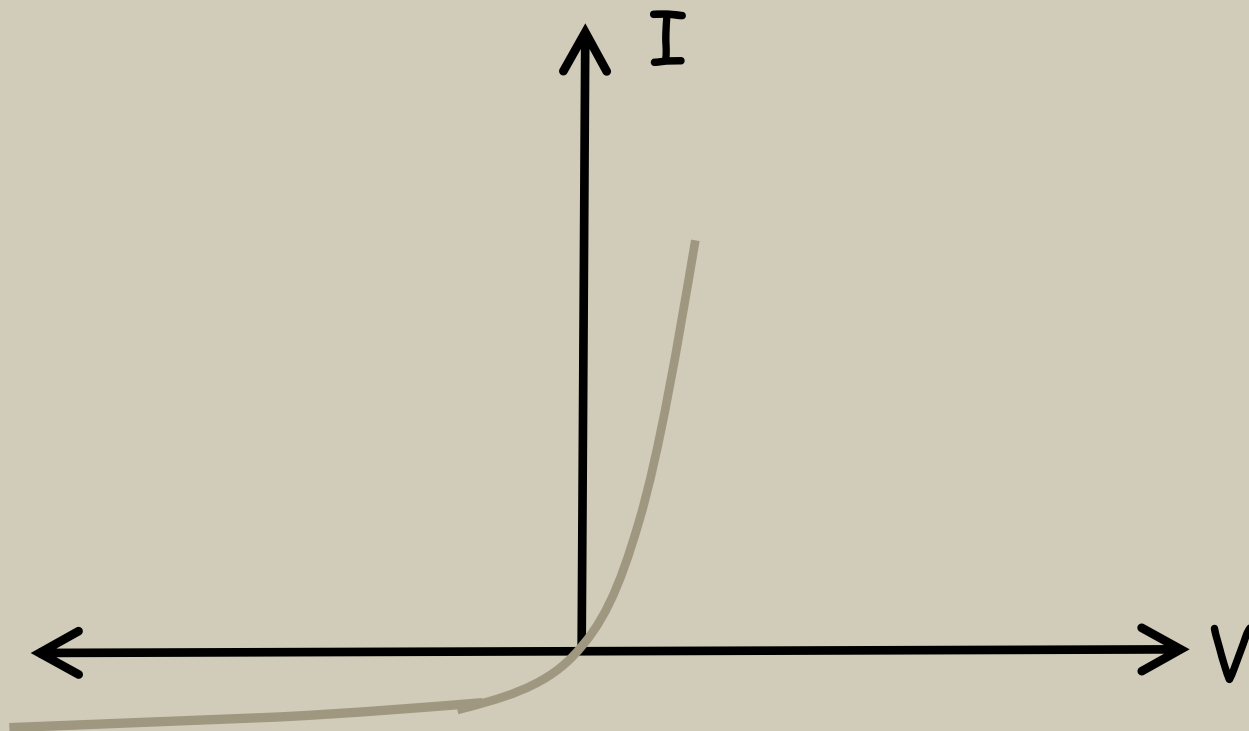
- Bands = plots of electron energy

Voltage = potential energy per (+) charge



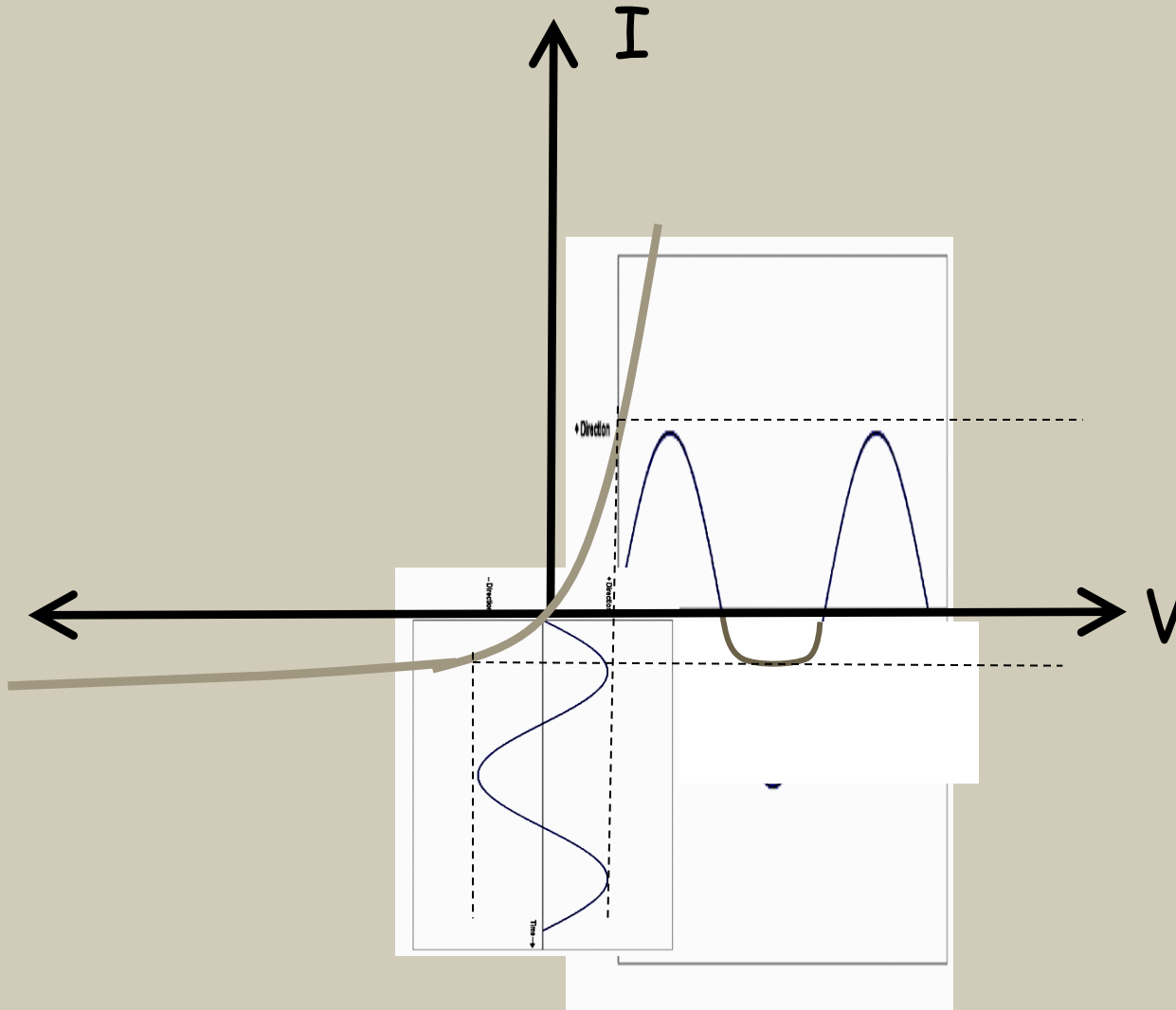
$$n = n_i e^{(F_n - E_i)/kT}$$
$$p = n_i e^{(E_i - F_p)/kT}$$

Fermi szint nem állandó $\Rightarrow$ Áram folyik



$$I = I_0(e^{qV/\eta kT} - 1)$$

P – N RÉTEG-DIÓDA



Összefoglalás

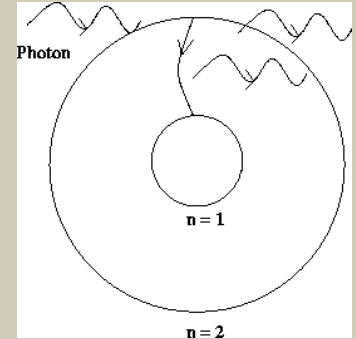
A p-n réteg egyensúlyban kiürített réteget és beépített kontakt potenciál ugrást tartalmaz. Értéküket a doping koncentrációk határozzák meg.

Nyitó irányú feszültség szűkíti a kiürített réteget, megnő az áram. Az áramot a Fermi szintek eltolódása vezérli.

Záró irányú feszültség kiszélesíti a kiürített réteget, és a feszültség ugrást, csökkenti az áramot és az I-V karakterisztikában erős aszimetriát eredményez

Anyagok és az elektromágneses tér kölcsönhatása

Foton abszorpció	„Spontán” Foton emisszió	„Stimulált” (induklált) Foton emisszió
---------------------	--------------------------------	---

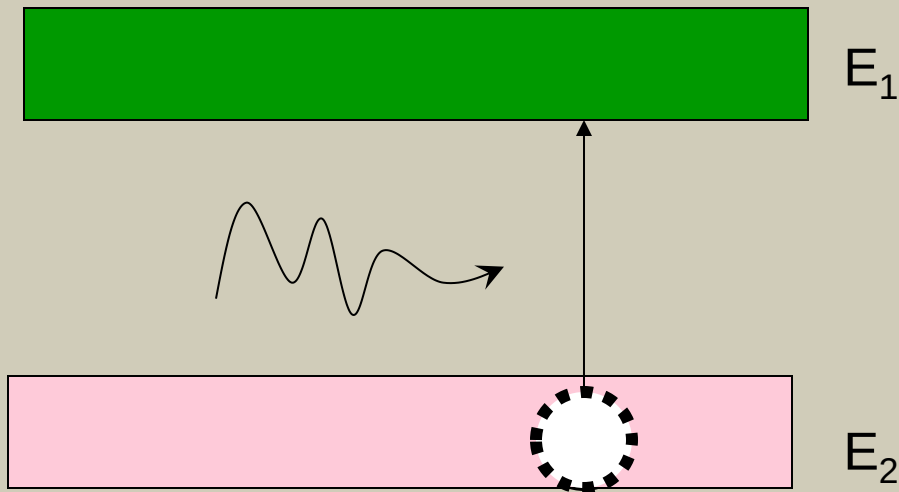


Termikus egyensúlyban lévő atomi rendszer a környezetével fény elnyelése (abszorpció) és kibocsátása (emisszió) útján van kapcsolatban:

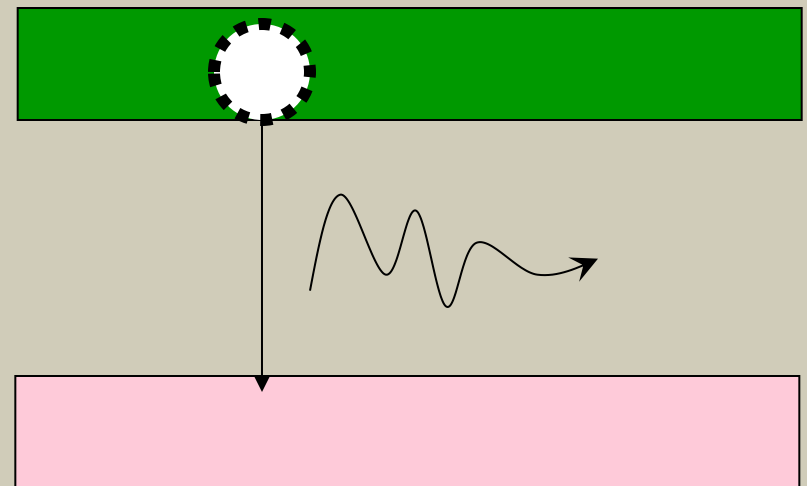
Az abszorpciót (foton elnyelést) egy foton „spontán” emissziója követheti

Bekövetkezik az is, hogy a már gerjesztett állapotban lévő atom „elnyel” egy újabb foton, és mégis visszaugrik az alacsonyabb energiaszintre két u.n. stimulált (indukált) foton kibocsátásával.

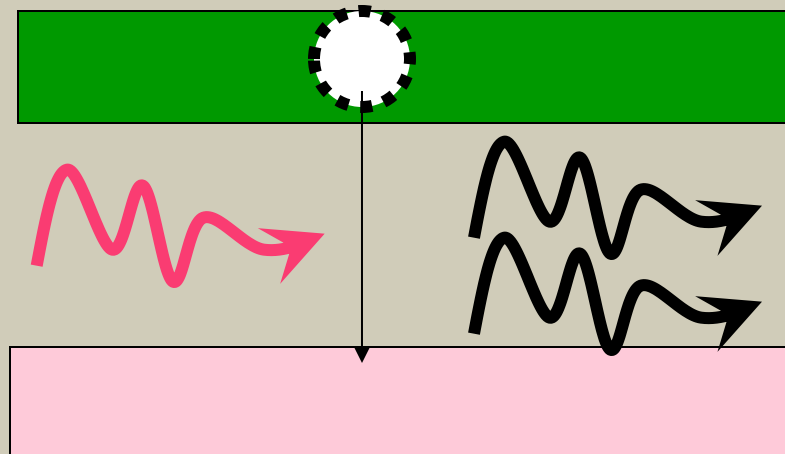
Absorption



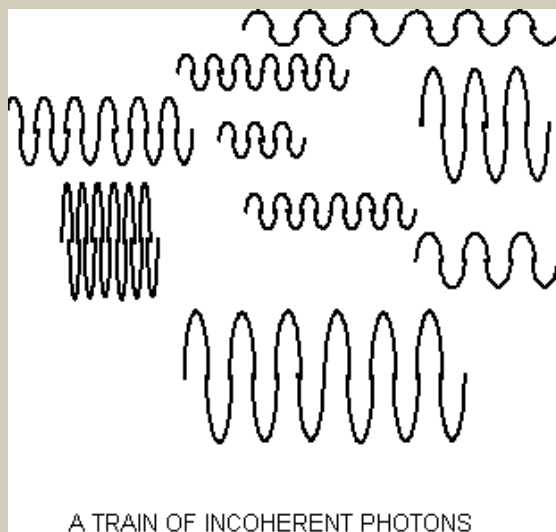
Spontaneous Emission



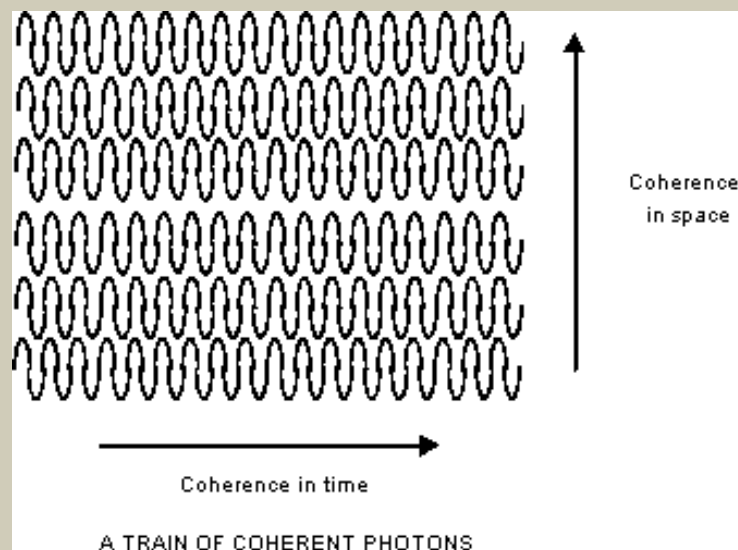
Stimulated Emission



Nem koherens fotonok



Térben is, időben is koherens fotonok



Elektromágneses mezőbeli atomok termikus egyensúlyban

(Csurgay_Simonyi: pp 553 – 558)

Termikus egyensúlyban az abszorpciók és emisszió száma egyenlő.

Absorptions

$$B_{12} \cdot N_1 \cdot \rho \nu$$

Bose-Einstein Statistics
Planck's Law of Radiation

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

Spontaneous
emissions

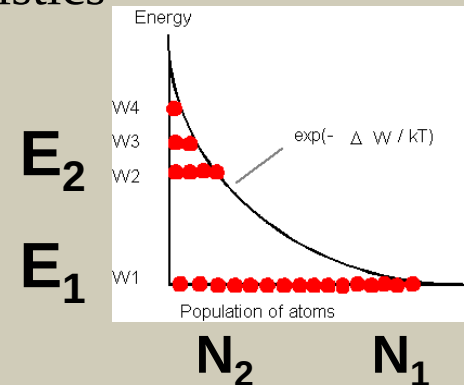
$$A \cdot N_2$$

Maxwell-Boltzmann Statistics

$$N_2 = N_1 e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}} = N_1 e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

Stimulated
emissions

$$B_{21} \cdot N_2 \cdot \rho \nu$$



Equilibrium

$$\rightarrow B_{12} N_1 \rho \nu = A N_2 e^{-\frac{h\nu}{kT}} + B_{21} N_2 e^{-\frac{h\nu}{kT}} \rho \nu$$

$$B_{12}N_1\rho_\nu = AN_1e^{-\frac{h\nu}{kT}} + B_{21}N_1e^{-\frac{h\nu}{kT}}\rho_\nu$$

$$\left(B_{12} - B_{21}e^{-\frac{h\nu}{kT}}\right)\rho(\nu) = Ae^{-\frac{h\nu}{kT}} \rightarrow$$

$$\rho(\nu) = \frac{A}{\frac{h\nu}{B_{12}e^{\frac{h\nu}{kT}} - B_{21}}}$$

Fotonok a Bose-Einstein
statisztikát követik
(Planck's Law of Radiation)

$$\rho(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1}$$

A két eloszlásnak meg kell egyeznie

$$B_{12} = B_{21} = B; \quad \frac{A}{B} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}$$

Figyeljük meg: az abszorpció és stimulált emisszió „szimmetrikus”

$$B_{12} = B_{21}$$

Az anyag elektromágneses energiát disszipál $N_2 / N_1 < 1$

A kisugárzott koherens teljesítmény kiszámítható::

$$N_2 w_{21}$$

Az időegység alatt lezajló foton kibocsátás

$$h\nu$$

Egyetlen foton emissziója során kibocsátott energia

$$N_1 w_{12} h\nu$$

Absorbed power

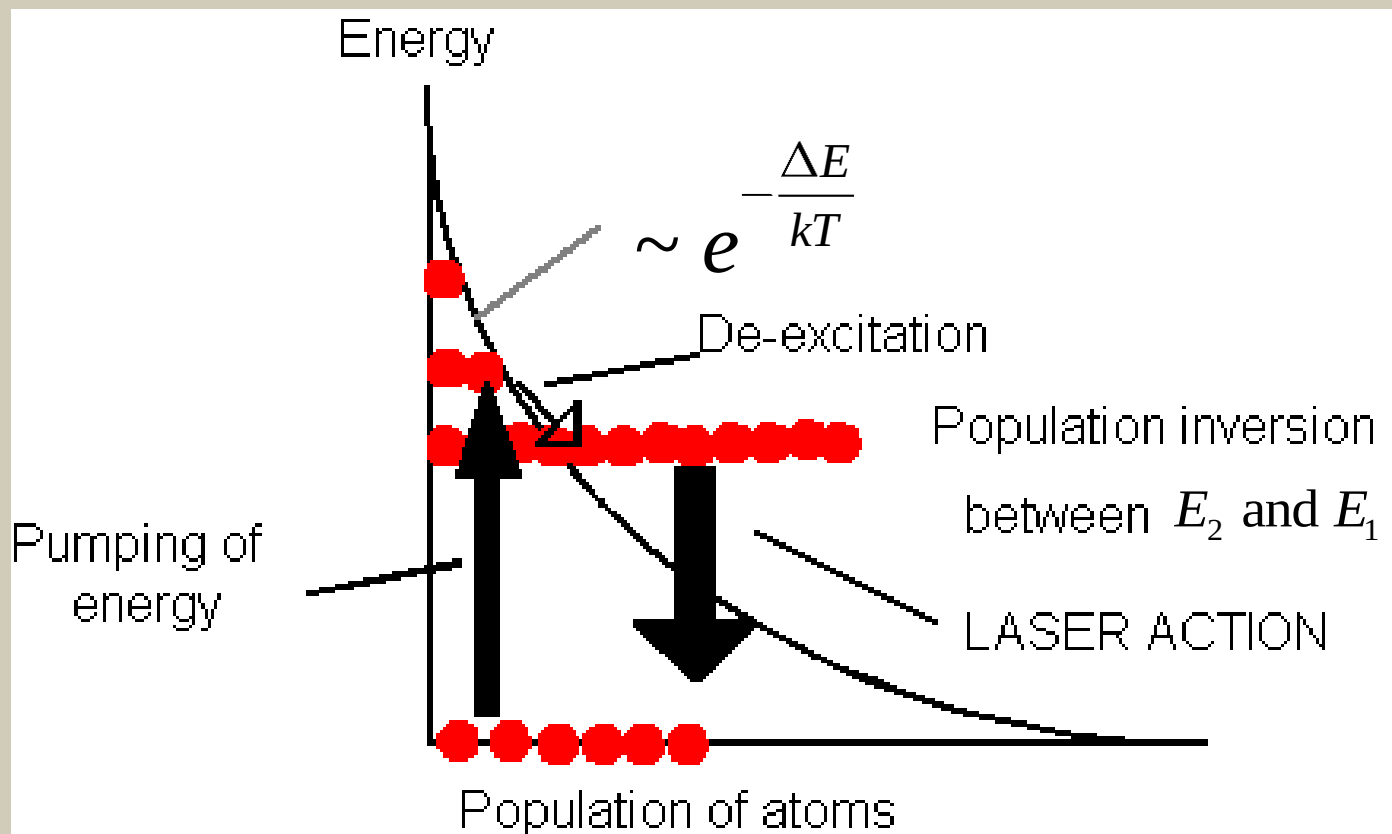
$$P = N_2 w_{21} h\nu - N_1 w_{12} h\nu = (N_2 - N_1) w_{21} h\nu$$

Az AN_2 spontán kisugárzott fotonok nem járulnak hozzá a kibocsátott koherens teljesítményhez, csak „zajt” jelentenek.

Az Erősítés feltétele $N_2 > N_1$, azaz a populáció a magasabb Energiaszinten legyen nagyobb, mint az alacsonyabb szinten.

Az erősítés feltétele $N_2 > N_1$

Szükséges a populáció „inverziója” “Pumping”



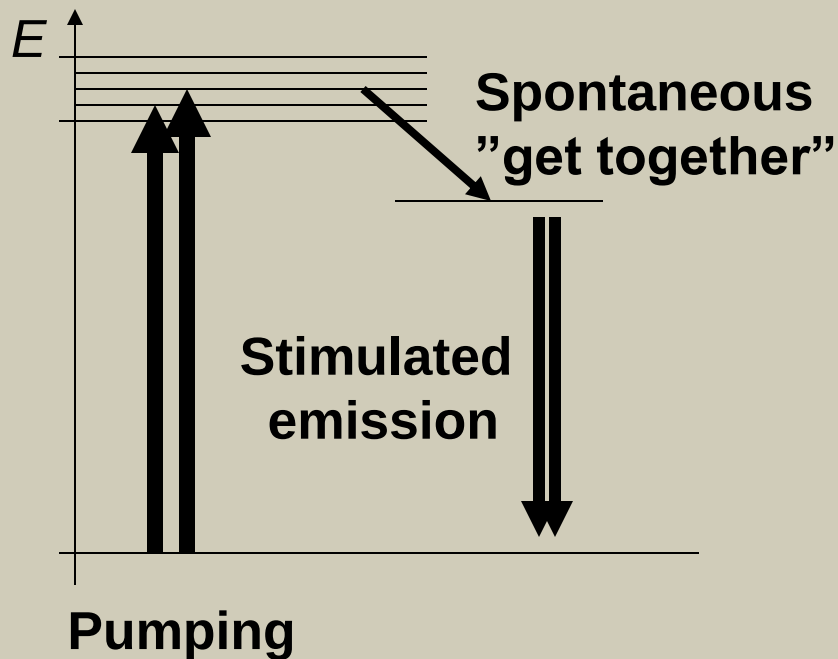
Microwave Amplification
by Stimulated Emission of Radiation

MASER

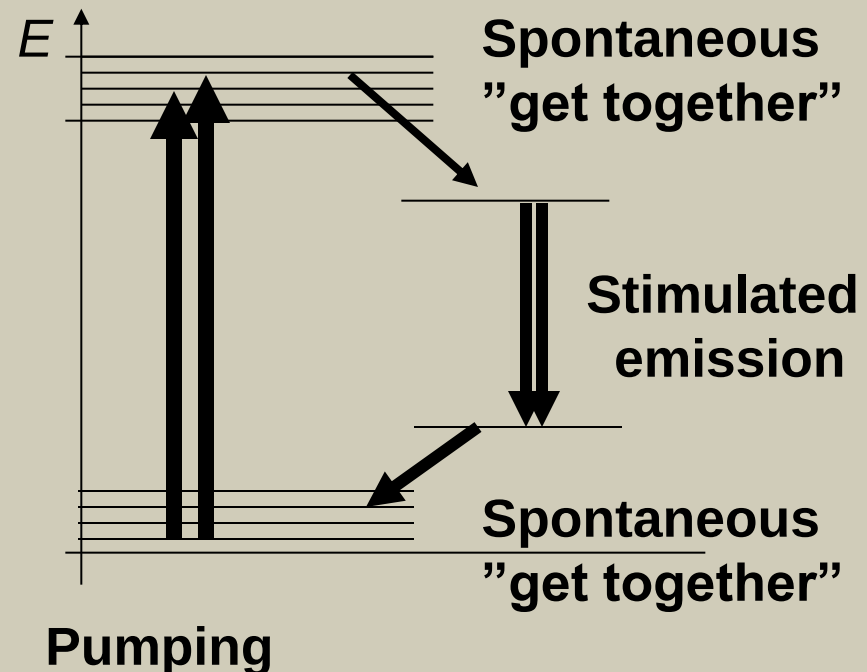
Light Amplification
by Stimulated Emission of Radiation

LASER

Three level LASER



Four level LASER

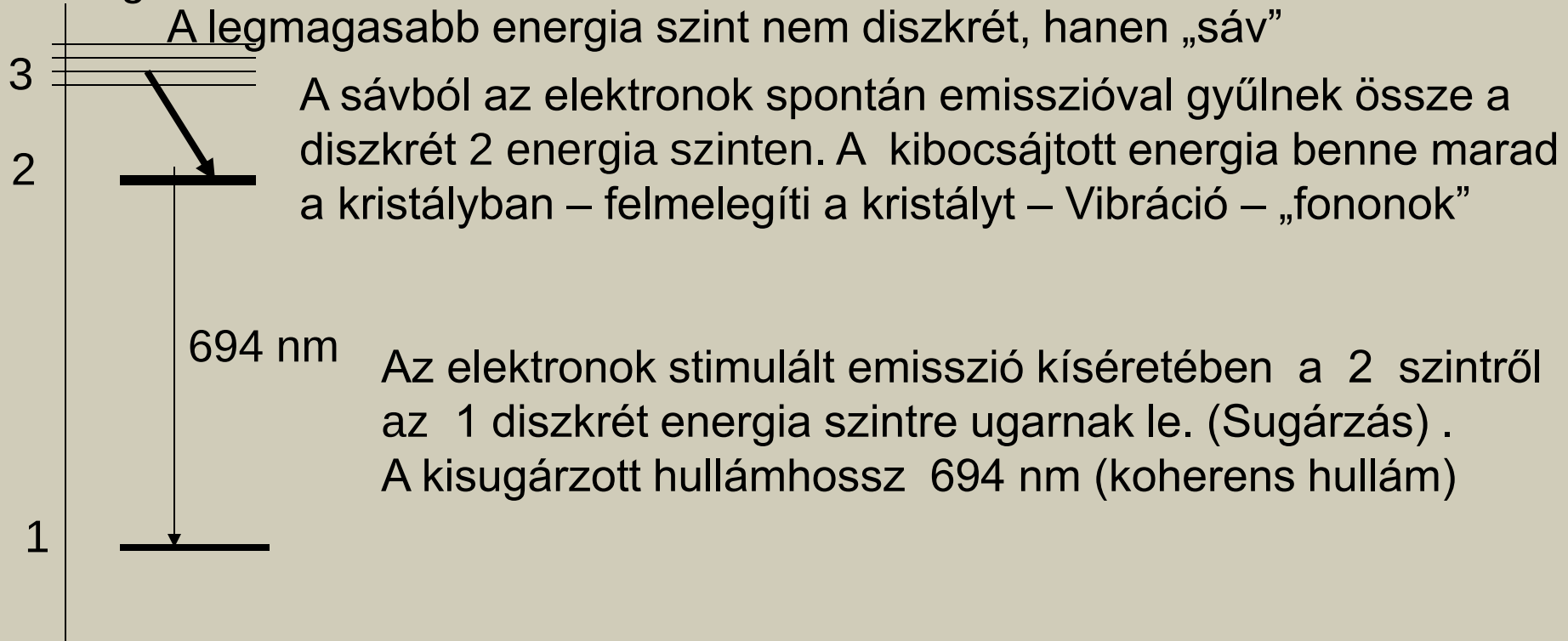


Az első LASER a rubin szilárdtest laser volt.

A rubin laser három szintű laser.

Aluminum oxid (Al_2O_3) kristályt 0,05% Cr^{3+} -al adalékolunk

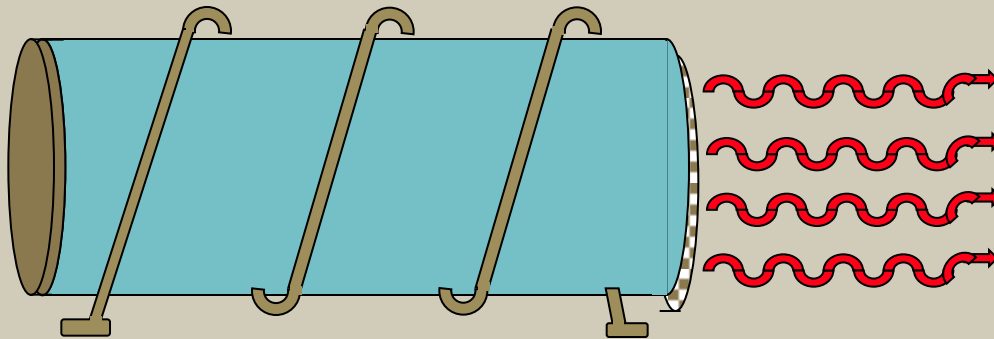
Energia szintek



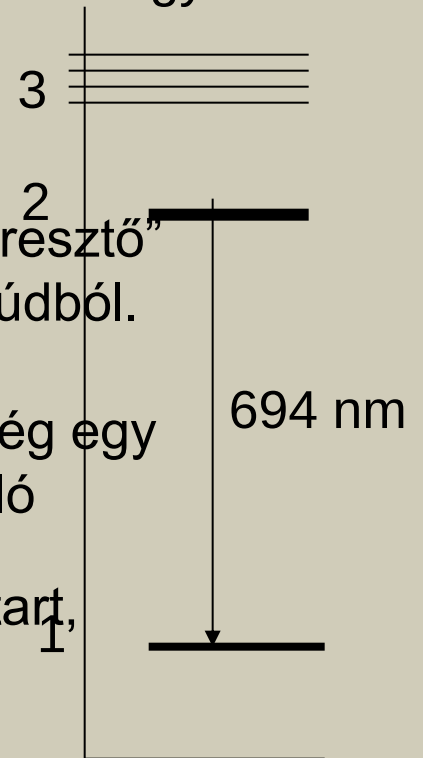
Rubin Laser

A rubin rudat flash-lampa spirál veszi körül.

A flash-lampa felvillanása „pumpálja fel” az elektronokat az 1 szintről a 3 szintre



Energy levels



A rubin rúd két végén tükrök vannak. Az egyik „félig áteresztő”
Így megengedi, hogy a koherens sugárzás kilépjen a rúdból.

A két tükrő rezonáns optikai üregrezonátort alkot.

Az üregben mindig van 694 nm hullámhosszú foton. Elég egy foton, hogy elindítsa koherens foton-sokaságot generáló „lavinát”.

A lavinát generáló stimulált emissziós folyamat addig tart, amíg $N_2 > N_1$ feltétel teljesül.

A rubin laser „impulzius üzemmódban” működik.

Fényforrások

„Incandescence” (izzítás)

Planck's feketetest sugárzás útján

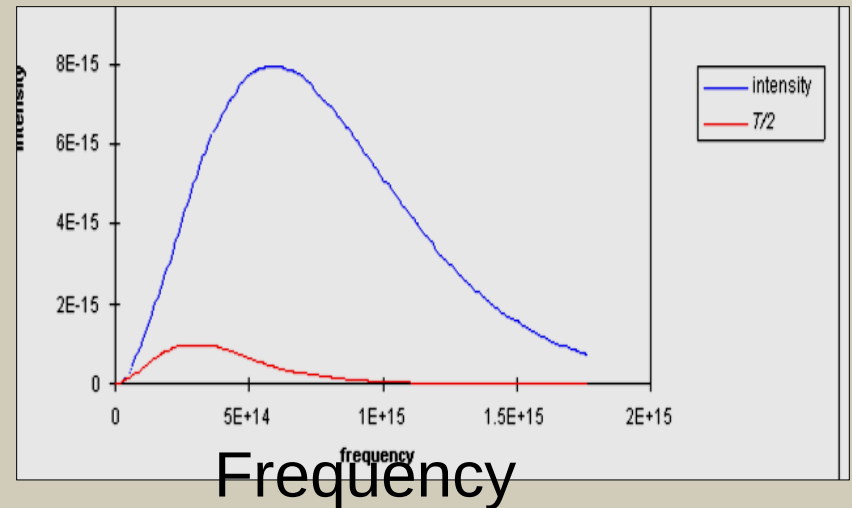
$$\rho(\nu)d\nu = \frac{8\pi\nu^2}{c^3} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} d\nu$$

Wien törvény

$$\nu_{\max} = 2.82 \frac{kT}{h} =$$

$$\nu_{\max}^{[GHz]} = 103,6 \cdot T^{[K]}$$

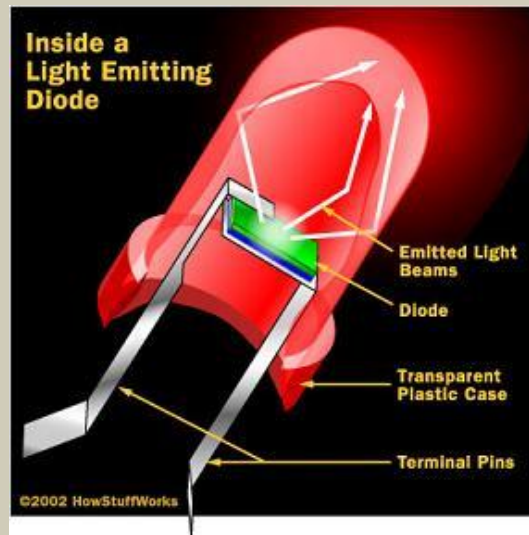
$$\lambda_{\max}^{[nm]} \cdot T^{[K]} = 2,896 \cdot 10^6 [nmK]$$



Frequency

Stefan-Boltzmann törvény $P = \sigma T^4 \times \text{Area}$

$$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$



Luminescencia: LED, Laser. Flat Panel

A fényt (fotonokat) elektronok kvantum átmenete állítja elő (nem melegítés)

Ha a kvantum átmenet gerjesztő oka

electrical current →

electroluminescence

electron „bombázás” →

cathod-luminescence

photon „bombázás” →

photo-luminescence

Ha a késleltetési idő rövid (nanosec electron-lyuk rekombináció)

fluorescence

Ha a késleltetési idő hosszú (sec, perc, óra, ...)

phosphorescence

Cathod-luminescence: Példa: Cathode Ray Tube CRT

Typical phosphor is ZnS doped with Cu

Excited conduction electrons make a 530 nm (green) transitions at Cu ion

Photo-luminescence Példa: Optical Repeater for fiber links

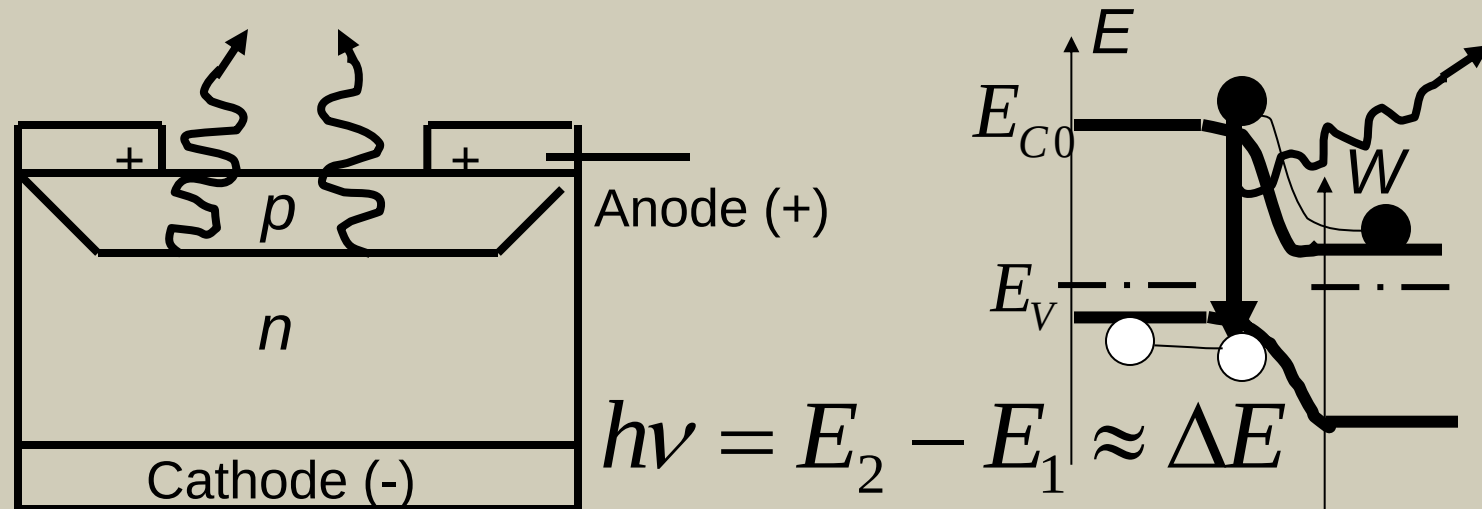
Silicium optikai kábelt erbium ionokkal dopolunk. (pumped by a 1480 nm local laser into excited state.

When a signal photon arrives, it stimulates emission at 1500 nm.

ELECTROLUMINESCENCE

Példa: Light Emitting Diode LED

“Injection” electroluminescence : a photon is produced when a conduction electron falls into a valence hole.



A ~500 nm-es színt „vonalszélessége” ~ 10 nm (Túl széles

Csurgay

Majus 6, 2016

$\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ Amint x 0 és 0.45 között változik

a tiltott sáv szélessége 1.4 eV és 2 eV közötti.

$$1.4 \text{ eV} \rightarrow \sim \frac{1.4 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.625 \times 10^{-34}} \sim 0.34 \times 10^{15} \text{ Hz} \rightarrow 880 \text{ nm} \quad \text{Infrared}$$

$$2 \text{ eV} \rightarrow \sim \frac{2 \times 1.6 \times 10^{-19}}{6.625 \times 10^{-34}} \sim 0.48 \times 10^{15} \text{ Hz} \rightarrow 625 \text{ nm} \quad \text{Red}$$

Nitrogén dópolással 2.2 eV, azaz zölden világító LED is előállítható.

GaN (gallium nitride) tiltott sáv szélessége 3.4 eV – ig növelhető,

Kék, sőt UV LED is előállítható.

LASER diodes : Koherensek ! Vonalszélesség ~ 0.10 nm

Frequency, phase, position, etc. under control !