

Műszaki lézerfizika

6. előadás: A szilárdtest lézerek

Ellenőrző kérdések

Melyik állítás jellemző a CO₂ lézerre? (Három választ kell megjelölni!)

- a) az egyik legnagyobb teljesítményű lézertípus
- b) a gerjesztési energia átadása a két gáz között másodfajú ütközéssel történik
- c) három energiaszintű lézer
- d) az első Magyarországon működő lézer ilyen volt
- e) A CO₂ molekula két rezgési állapota között populáció inverzió áll fenn
- f) gerjesztése félvezető lézerrel történik

Megoldás: a), b), e)

Az ionlézerek általában kisebb hullámhosszon működnek, mint az atomi lézerek, mert a gerjesztett ionállapotoknak általában magasabb az energiája, mint a gerjesztett atomi állapotoknak.

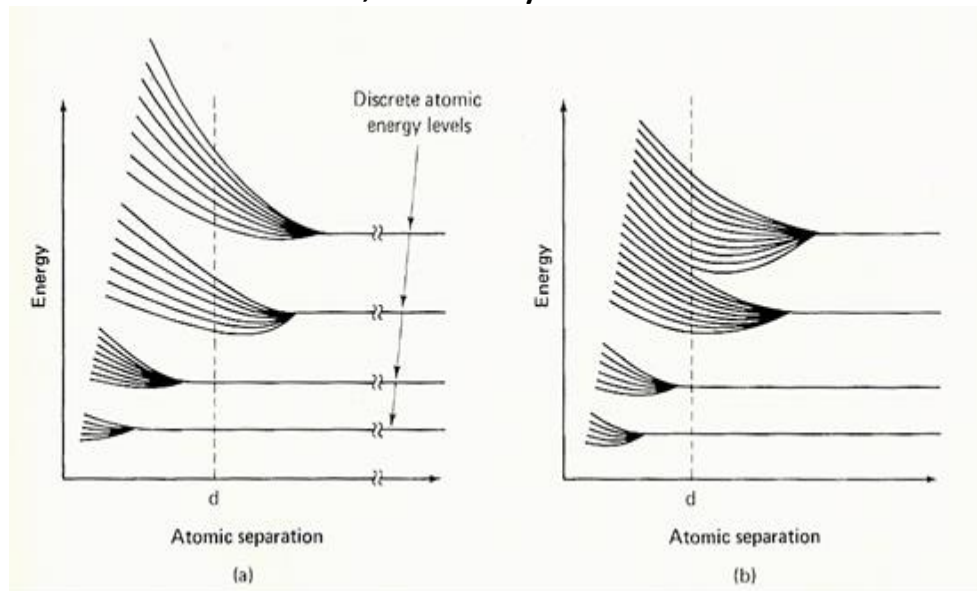
- a) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük nincs oki kapcsolat
- b) Az állítás hamis, de az indoklás önmagában helyes
- c) Az állítás igaz, de az indoklás nem
- d) Az állítás és az indoklás is helyes, közöttük oki kapcsolat van

Szilárdtestek sávmodellje

Ha két atom egy molekulává egyesül, akkor az egyes atomi energiaszintek két energiaszintté hasadnak fel (egy kötő és egy lazító pálya).

Ha több, pl. N darab atom létesít kötést, akkor ugyanígy elmondható, hogy a Pauli elv következtében nem lehet az összes elektronnak ugyanaz a hullámfüggvénye, tehát itt is N energiaszintre **hasad fel** minden egyes eredeti energiaszint.

Sok atom esetén azt mondjuk, hogy egy szintből egy **sáv** lesz. Tehát egy energiasávban annyi diszkrét, egymáshoz igen közel lévő energiaszint van, ahány atomból áll a kristály, vagyis az atomok eredeti energiaszintjei annyi szintre hasadnak fel, amennyi az atomok száma a kristályban.



Az atommagok távolságának függvényében láthatjuk két esetben az energiaértékek felhasadását. Függőleges szaggatott vonallal van jelölve a d egyensúlyi távolság. Mindkét esetben négy energiasávot ábrázoltunk (az alsó kettő még nem hasadt fel észrevehető mértékben). A bal oldalon a 3. és a 4. sávot tiltott sáv választja el, a jobb oldalon nem. Általában elmondható, hogy a belső (mélyebb energiájú) szintek kevésbé, a külső szintek jobban felhasadnak.

Szilárdtestek sávmodellje/2

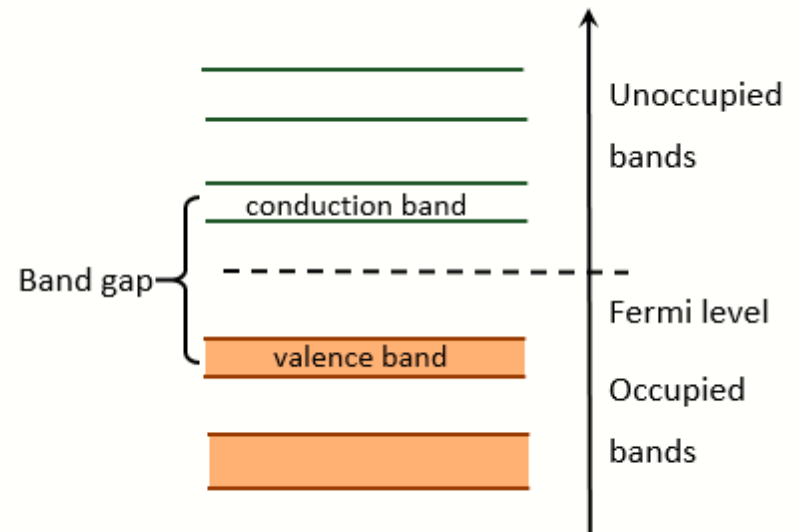
Egy kis kiterjedésű kristály atomjainak a száma 10^{22} nagyságrendű, így az energiasávon belüli diszkrét energiaszintek közötti távolság 10^{-22} eV-nál kisebb. A Pauli-elv értelmében a feles spinű elektronoknak energiaszintenként legfeljebb egy ellentétes spinű párja helyezkedhet el. A kiszélesedett energiasávban tehát maximálisan $2N(2l+1)$ elektron fér el. Az azonos energiaszintről származó elektronok számára lehetséges energiaszintek összességét **megengedett** energiasávnak nevezzük.

A megengedett energiasáv lehet üres, lehet részben betöltött, vagy teljesen betöltött. Egyes esetekben a megengedett energiasávok részben fedik egymást.

Sok esetben viszont ún. **tiltott sáv** választja el tartozik stacionárius állapot.

A legnagyobb energiájú sávot, amely alapállapotban ($T=0\text{K}$ -en) tartalmaz elektronokat, **vegyértéksávnak** vagy **valenciasávnak** nevezzük.

Ha a vegyértéksáv nincs teljesen betöltve, akkor egyben **vezetési sávnak** is tekintjük, ha teljesen be van töltve, akkor a következő üres sávot tekintjük vezetési sávnak.



Szilárdtestek osztályozása

a, Félig betöltött sáv

A töltéshordozók n száma nagyon magas és független a hőmérséklettől, feszültség rákapcsolása után vezetni fog (pl. alkáli fémek: Na, K, ...), hiszen a sávon belül vannak nem betöltött energiaszintek, ahová az elektronok igen kicsi energiával gerjeszthetők.

bármilyen frekvenciájú foton gerjeszti az elektront, tehát nem átlátszóak

b, Összeér egy tele és egy üres sáv

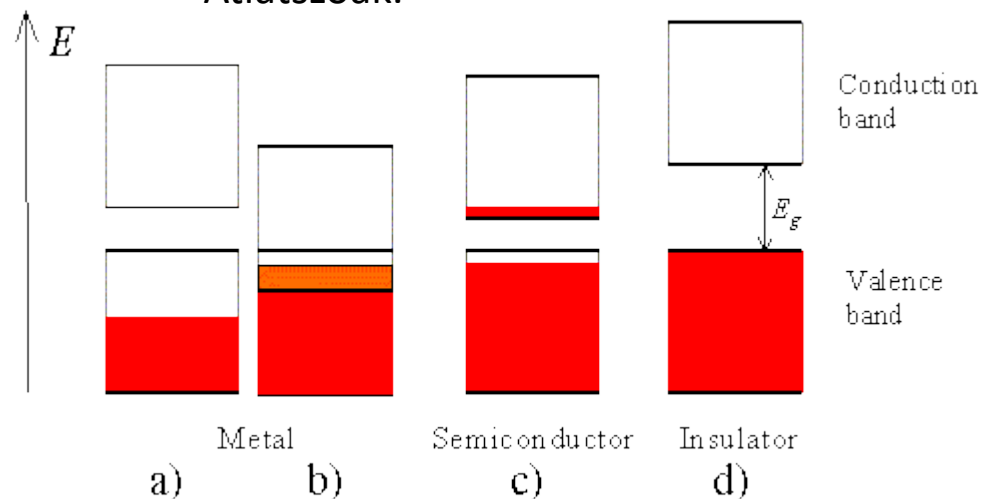
Pl. alkáli-földfémek (Ca, Mg, ...) - Ugyanúgy viselkednek, mint az *a*, pontban

d, Teljesen betöltött és jóval föllette egy teljesen üres sáv

A két sáv között széles tiltott sáv (gap) található. A tiltott sáv szélessége pl. a gyémántonál $E_g \approx 4eV$

Nincs töltéshordozó a vezetési sávban (ha $T=0$), a vegyértéksáv pedig tele van. Ez utóbbiban az elektronok nem tudnak folytonosan energiát felvenni, tehát az elektronok gyorsulására nincs lehetőség, ezek a **szigetelők**, melegítés hatására nagyon rosszul, de vezetni kezdenek.

Átlátszóak.



c, Keskeny tiltott sáv (félvezetők)

$E_g \approx 1eV$ könnyebb felugrania az elektronnak a vezetési sávba, mint a szigetelőknél

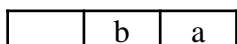
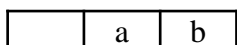
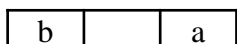
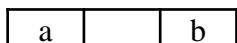
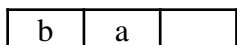
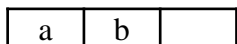
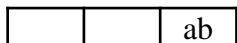
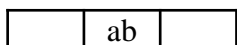
$T=0K$ –nél szigetelők: nem tud az elektron feljebb menni

$T \uparrow \rightarrow$ beindul a vezetés (nem túl jól, de sokkal jobban, mint a szigetelőkben)

A klasszikus és a kvantumstatisztikák

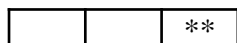
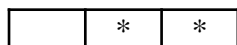
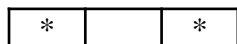
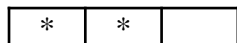
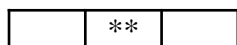
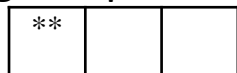
2 db részecskét 3 cellába hányféleképpen helyezhetünk el?

Boltzmann
klasszikus



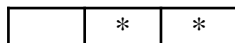
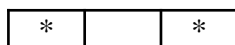
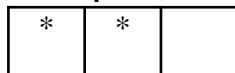
A klasszikus fizika szerint a részecskék megkülönböztethetők és egy cellába akárhány befér

Bose-Einstein
egész spinű



A fotonok megkülönböztethetetlenek és egy cellába akárhány befér

Fermi-Dirac statisztika
feles spinű részecskékre



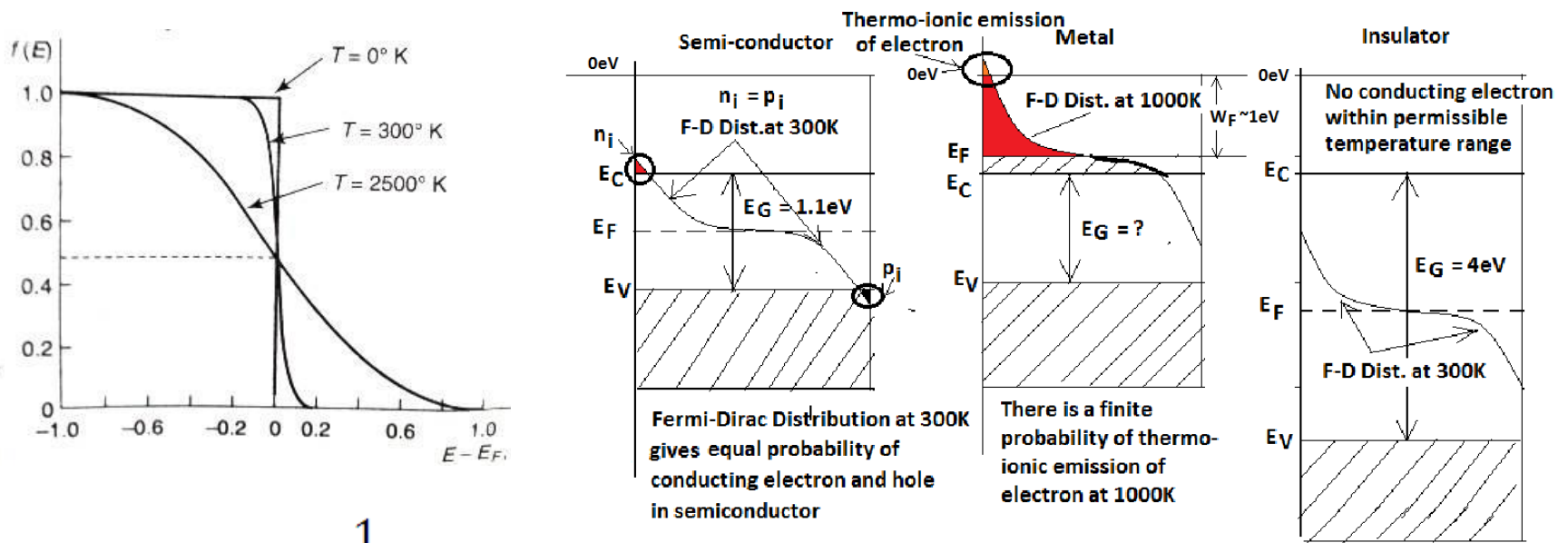
Az elektronok megkülönböztethetetlenek és egy cellába csak egy fér bele (Pauli-elv)

$$f_F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

emlék: Planck-törv.
$$I(f) = \frac{Khf^3}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

emlék: Boltzmann-eloszl.
$$N_i = N_0 e^{-\frac{E_i}{kT}}$$

A Fermi-Dirac statisztika



$$f_F(E) = \frac{1}{1 + \exp\left(\frac{E - E_F}{kT}\right)}$$

E_F : Fermi-energia: az 50%-os betöltöttséghez tartozó energia. 0K-en ez alatt minden szint be van töltve, fölötté egy sem. Jobb oldalt láthatjuk az elhelyezkedését a különböző típusú kristályokban.

Mielőtt a szilárdtest lézerekre rátérnénk...

- Csak olyan szilárdtest felel meg, ami átlátszó (hisz kijut belőle a fény), tehát **szigetelő kristály kell** (esetleg alaktartó folyadék (üveg))
- Szigetelő anyagok **elektromos árammal közvetlenül nem gerjeszthetőek**, csak fénnel
- A gerjesztő fényt a kristálynak el kell nyelnie, de a keltett lézerfényt át kell engednie, ez csak **adalék atomokkal** (szennyező, dopping (dope)) oldható meg
- A nagy atomsűrűség miatt nagy erősítés is elérhető, ezért kisebb reflexiójú kicsatoló tükör is szóba jöhet. A nagy törésmutatójú kristályok esetén magának a kristálynak a felszíne is elegendő tükröződést jelenthet. Merőleges beesésre a kristály felületén ez

$$R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2$$

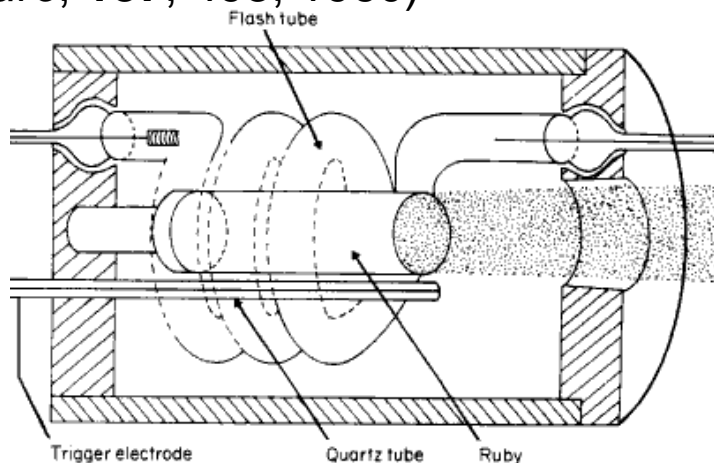
reflexiós tényezőt jelent. Ha $n=1,5$ (üveg) akkor R csak 4%. Oxid kristályokra ($n \approx 1,8$) ez kb. kétszeres reflexiót jelent. Ezek még nem feltétlenül elegendő visszacsatolások, de a GaAs esetében ($n=3,5$) érvényes 30% már elegendő lehet.

A szilárdtest lézerek: a rubinlézer az első lézer

1957 Gordon Gould (Columbia University): a lézerek működési elve („30 éves szabadalmi háború”) **LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**

1958 Arthur L Schawlow and Charles H Townes (Columbia University): első cikk „optikai” MASER működési elvéről (*Phys. Rev.* **112**, 1940, 1958) **1960** szabadalom

1960 Theodore Maiman (Hughes Research Laboratories): első működő rubin lézer (*Nature*, **187**, 493, 1960)



60 éve volt!



Az „optikai” MASER működési elvét Schawlow és Townes publikálta először, de megépítenie a működő lézert Maiman-nak sikerült először!

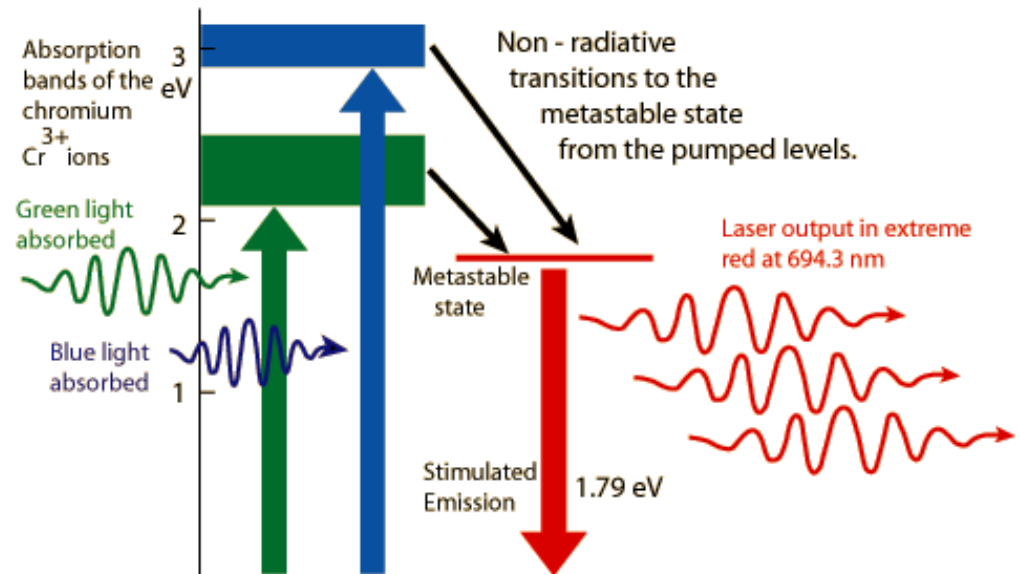
A rubinlézer



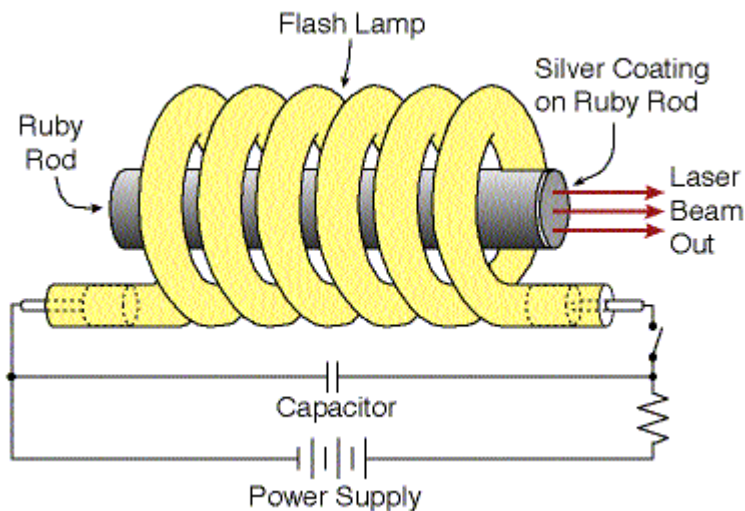
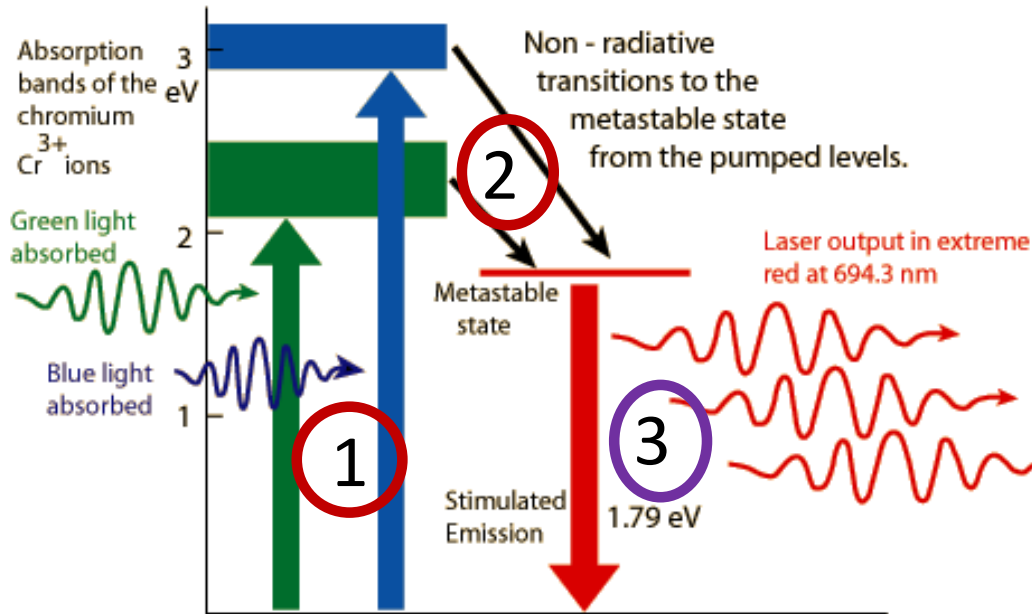
A rubin ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) a **korund** ásványfajhoz tartozik. A vegyileg tiszta korund színtelen és áttetsző, de szennyeződések hatására elszíneződhet: vörös színű változata a **rubin**, minden más színű változatai a **zafír**. A rubin vörös színét a vas és a króm „szennyezés” adja.

A **rubinlézer** mesterséges egykristály rudat tartalmaz. Ez a természetes rubinhoz képest haloványabb (csak króm adalékot tartalmaz).

A **rubinlézer háromszintű**, ezért rossz hatásfokú és csak impulzus üzemű. A populációinverzió a **króm szintjei között** alakul ki a villanólámpa villantása utáni μs -ban.



A rubinlézer



Működés 3 lépésben:

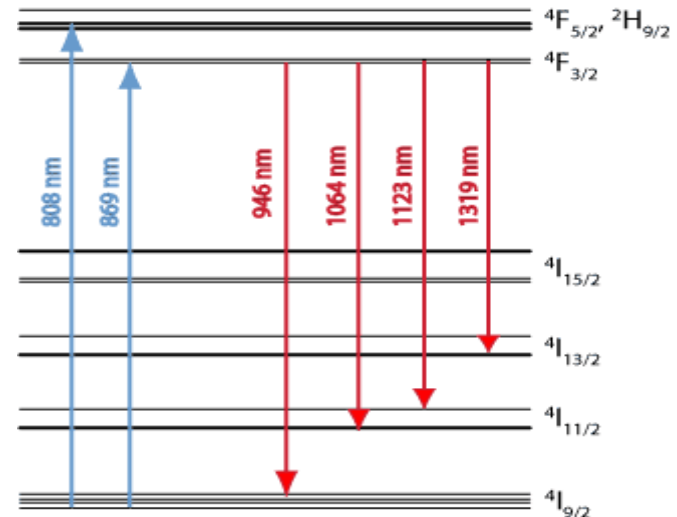
1, Gerjesztés villanó lámpával. Hatékony mért szélesek az abszorpciós sávok (és sűrű az anyag)

2, Sugárzásmentes átmenettel az elektronok igen gyorsan a felső szennyező szintre kerülnek (a mátrix anyag sávos szintű, de a kevés szennyező anyagnak élesek a szintjei)

3, Populációinverzió alakul ki **króm szintjei között** a villanólámpa villantása utáni μs -ban. Ez rövid ideig tart, mert az alsó lézerszintről nincs út tovább lefelé

A szilárdtest lézerek adalék (szennyező, dopping) anyagai

- A szilárdtestlézerekben szennyezőanyagként ritka földfémeket, átmeneti fémeket és aktinoidákat alkalmaznak. A ritka földfémekben a 4s, 4p, 4d, 5s, 5p és 6s pályák teljesen betöltöttek, de a 4f pálya csak részlegesen betöltött. A **Nd (neodímium)** atomban pl. 4 elektron van a 4f pályán.
- Kristályokban ezek az atomok tipikusan három értékű, trivalens ionokat képeznek. Ennek során az atomok elvesztik a 6s pályán lévő két elektronjukat, valamint a 4f pályáról még egyet. Így pl. a **Nd³⁺ elektronszerkezete: ...4f³5s²5p⁶**.
- Mivel a külső, **zárt pályák (5s és 5p) árnyékolják a belső 4f pályán lévő, és a lézerműködésben fontos szerepet játszó átmeneteket**, a szennyező atomok fluoreszcencia spektruma keskeny marad, és csak enyhén függ a hordozóközegtől.
- Az aktinoidák hasonlítanak a ritka földfémekre, de esetükben az 5f pálya van részlegesen betöltve és árnyékolva a 6s és 6p pályák által.
- Az átmeneti fémek két legfontosabb eleme a króm és a titán. A króm elektronszerkezete: Cr:...3d⁵4s. A trivalens ionállapotban: **Cr³⁺:...3d³**. Mivel a krómban külső, betöltött pályák nem védik a betöltetlen pályákat, az optikai paraméterek erősen függenek a hordozótól.
- A titánnak hasonló az elektronszerkezete de 6 elektron helyett csak 4 elektronja van a külső pályákon: Ti:...3d²4s². Trivalens állapotban a 3d pályán egy elektronja lesz: **Ti³⁺:...3d**.



A szilárdtest lézerek mátrix anyagai

Magas optikai minőség kell, a törésmutató térbeli inhomogenitása nagy gond.

A hordozó mechanikai és **termális tulajdonságai**, különösen nagy lézerteljesítmények esetén válnak kritikussá.

A kristályszerkezet megválasztásánál fontos, hogy a szennyező atomok **homogén módon tudjanak diffundálni** a hordozóba.

Az **üvegek** az egyik legfontosabb hordozók. Nagy méretben és kitűnő optikai minőségben állíthatók elő, ami a nagy teljesítményű lézerek esetén különösen fontos paraméter. A kristályos hordozókhoz képest azonban a fluoreszcencia átmenetek kiszélesednek (ezáltal a pumpálási küszöbérték megnő), továbbá a hővezetési tulajdonságaik is kedvezőtlenebbek.

Az **oxidok** kristályszerkezetű hordozók, ezért az üvegekhez képest kitűnő termális tulajdonságokkal rendelkeznek, és a fluoreszcencia vonalak kevésbé kiszélesedtek. Az optikai tulajdonságaik azonban tipikusan rosszabbak, mert nagy méretű, jó minőségű kristályt növeszteni nagyon nehéz. A kristály homogén szennyezése további technológia kihívást jelent.

Legfontosabb hordozóként alkalmazott oxidok az Al_2O_3 , ami Cr^{3+} ionokkal szennyezve a **rubinlézer** aktív anyaga;

a $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ (yttrium-alumínium-gránát: **YAG**), ami a Nd^{3+} ionokkal szennyezve a neodímiumlézerek aktív anyaga;

a YAlO_3 (YAP), amit Nd^{3+} , Er^{3+} , Ho^{3+} és Tm^{3+} ionokkal lehet szennyezni és a YAP kristály anizotróp jellege miatt számos előnnyel rendelkezik;

A legfontosabb szilárdtest lézerek

Az alábbi lista a 3 legfontosabb gázlézert is tartalmazza

Lézeranyag	Hullámhossz λ_0 (μm)	Hatás- keresztmetszet σ_0 (cm^2)	Spontán időtartam t_{sp}	Átmeneti szélesség $\Delta\nu$	Törési mutató n
He-Ne	0,6328	1×10^{-13}	0,7 μs	1,5 GHz (i)	≈ 1
Rubin	0,6943	2×10^{-20}	3,0 ms	60 GHz (h)	1,76
Nd ³⁺ : YAG	1,064	4×10^{-19}	1,2 ms	120 GHz (h)	1,82
Nd ³⁺ : üveg	1,06	3×10^{-20}	0,3 ms	3 THz (i)	1,5
Er ³⁺ : Si-szál	1,55	6×10^{-21}	10,0 ms	4 THz (h/i)	1,46
Rhodamin-6G	0,56-0,64	2×10^{-16}	3,3 ns	5 THz (h/i)	1,33
Ti ³⁺ :Al ₂ O ₃	0,66-1,18	3×10^{-19}	3,2 μs	100 THz (h)	1,76
CO ₂	10,6	3×10^{-18}	2,9 s	60 MHz (i)	≈ 1
Ar ⁺	0,488; 0,514	3×10^{-12}	10,0 ns	3,5 GHz (i)	≈ 1

Optimális páros
Ez a legolcsóbb

A legszélesebb
erősítési görbe

Az rövid impulzusok keltéséhez széles erősítési görbe kell. A titán-zafír lézerrel lehet legrövidebb impulzusokat kelteni. A legnagyobb impulzust viszont Nd: üveg lézerrel keltik, amelyet hatalmas villanólámpák gerjesztenek.

Az Nd:YAG lézer



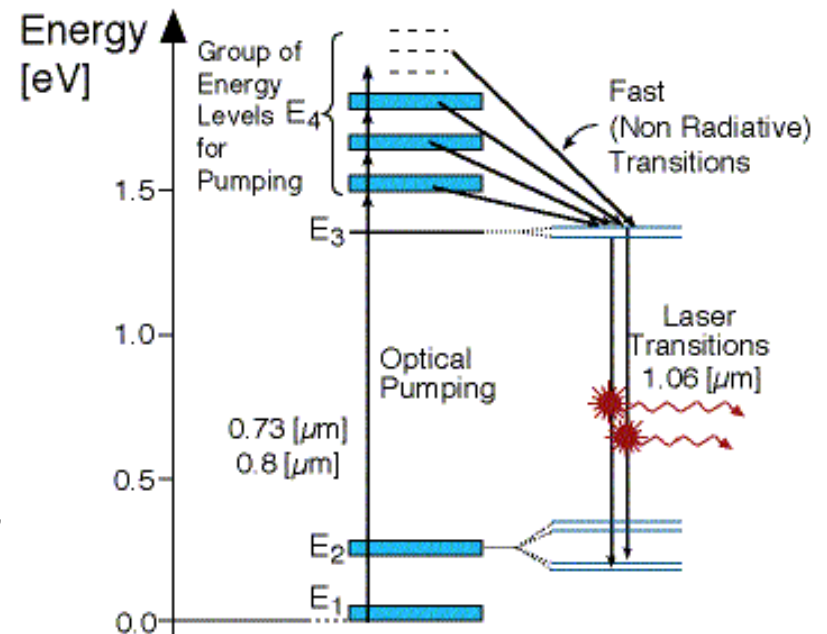
A **neodímium** és a YAG igen szerencsés párosítás, mert A neodímiumnak van az alapállapota fölött egy rövid életidejű szintje, ami alsó lézerszintnek kiváló (így **4 szintű lézer** építhető belőle),

A YAG yttrium alumínium gránát; ($Y_3Al_5O_{12}$)

A mesterséges egykristály kedvező optikai tulajdonságokkal bír, jó hővezető,

és a Nd ion mérete egyezik az Y ionéval, könnyen beépül a mátrixba.

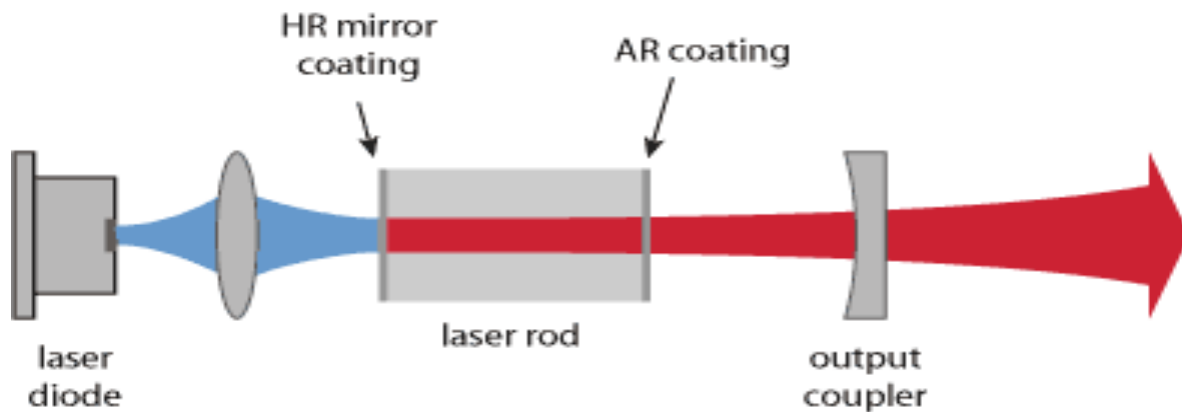
Vannak energia szintjei, amelyek egyeznek bizonyos félvezető lézerek fotonenergiájával, ezért nagy hatásfokkal gerjeszthető



Az Nd:YAG lézer és a Nd:üveg lézer

A villanólámpás gerjesztés (bár ma is létezik) igen kis hatásfokú (NIF 192 db Nd:üveglézer egyenként 20kJ-os 1ns-os impulzust ad).

Az optimális hatásfokot a félvezető lézeres hosszirányú gerjesztés jelenti az Nd:YAG lézerben.

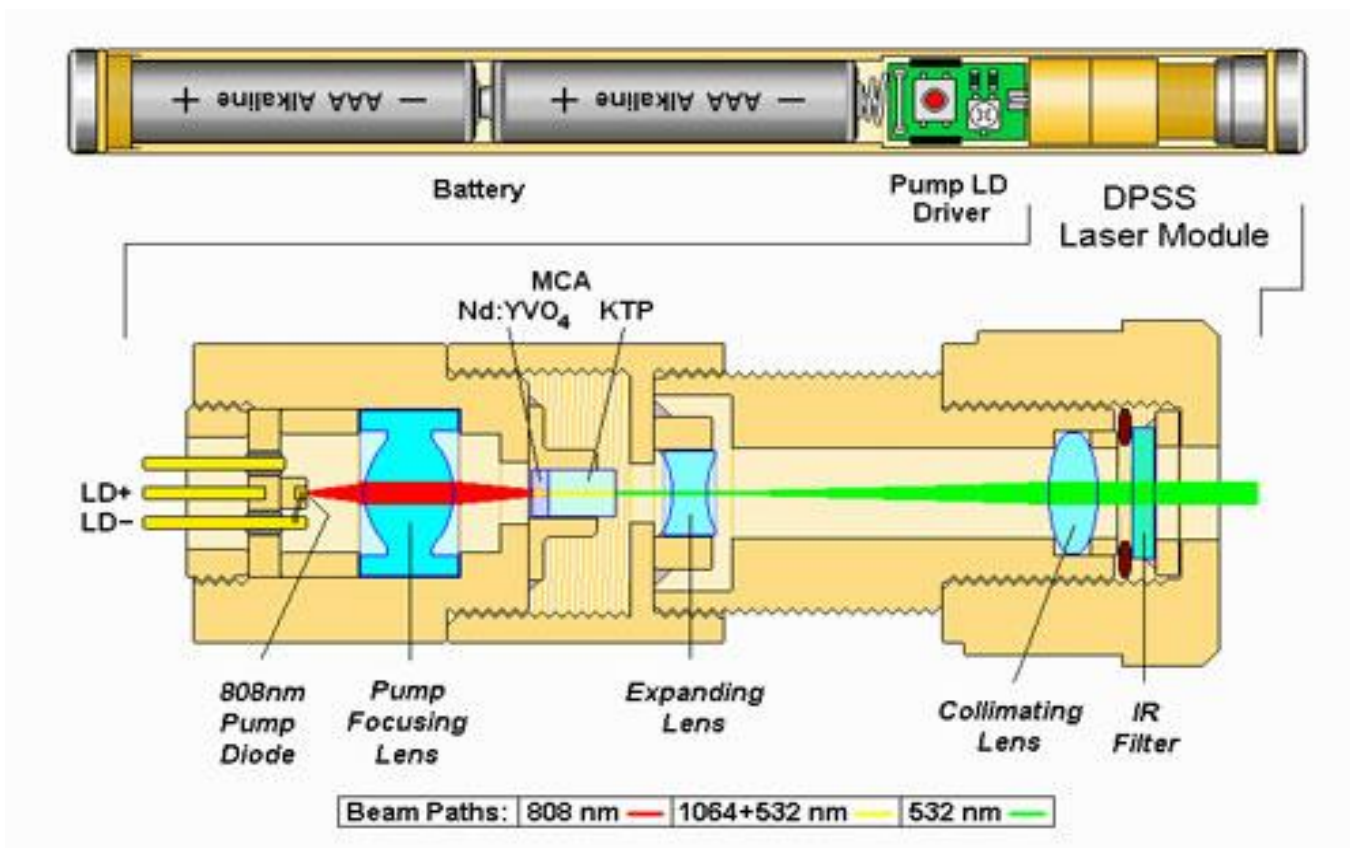


Zöld lézer pointer

DPSS: dióda pumpált szilárdtest

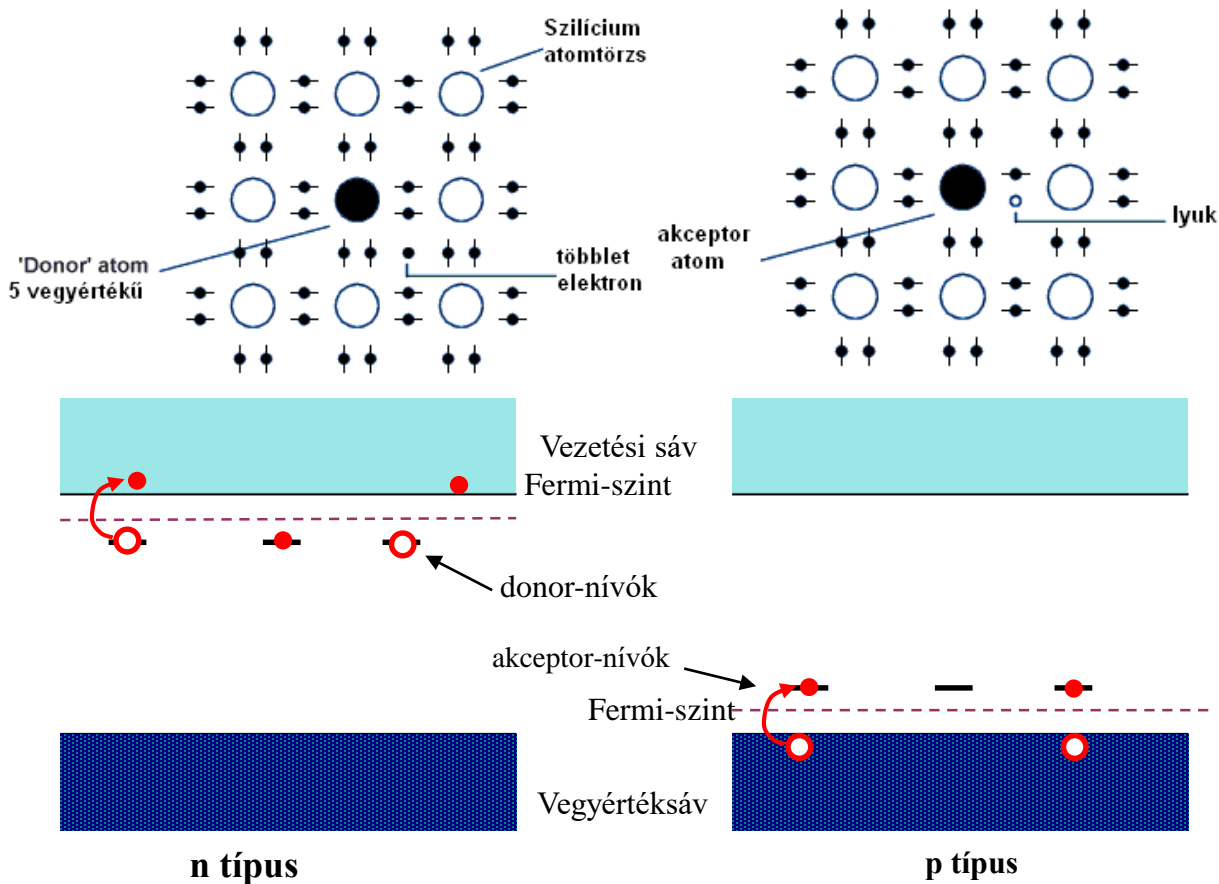
YVO: ittrium vanádium oxid (a YAG helyett)

KTP: kálium titanil foszfát (frekvencia kettőzéshez nemlineáris optikai anyag)



Adalékolt félvezetők

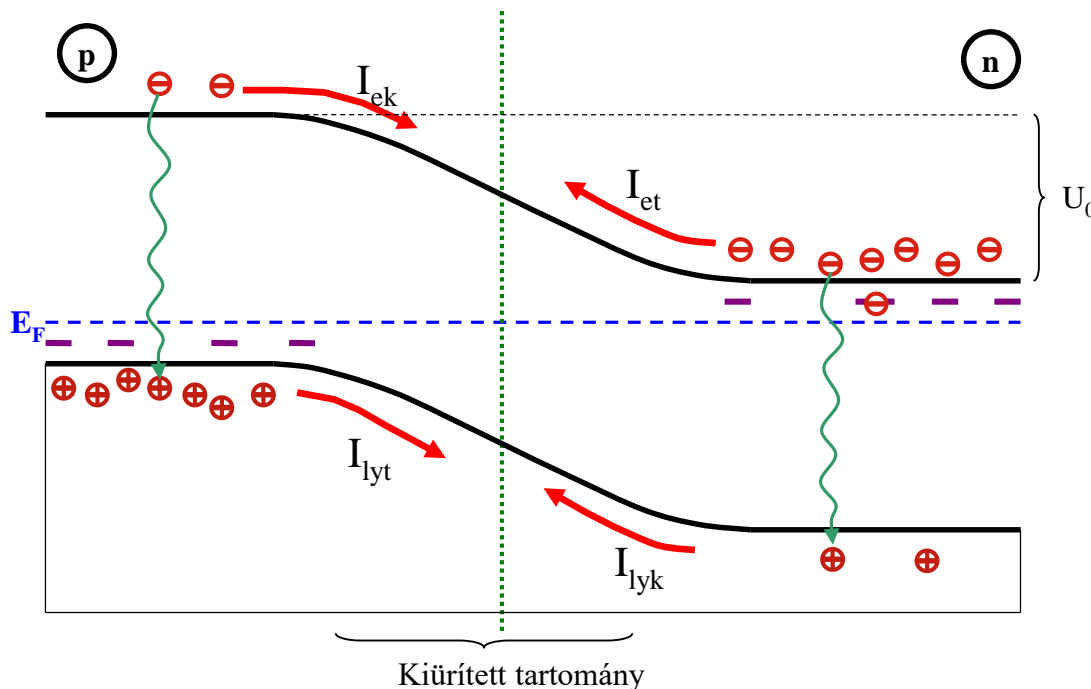
Ha a szilíciumot vagy germániumot olyan anyaggal szennyezik, aminek 5 vegyérték-elektronja van (arzén, foszfor, antimon), akkor a szennyező atom egy elektronja nem vesz részt a kötésben, könnyen leszakad és részt vesz a vezetésben. A szennyező atomot ilyen esetben **donor** atomnak nevezzük. Mivel a donor-nívók energiája közel van a vezetési sávhoz, szobahőmérsékleten az elektronok igen nagy része felkerül róluk a vezetési sávba és ott lényegében szabad elektronnak tekinthető. Az ilyen félvezetőt **n (negatív) típusú félvezetőnek** nevezzük.



Ha a szilíciumot olyan anyaggal szennyezzük, amelynek 3 vegyérték-elektronja van (*indium, bór, alumínium, gallium*), akkor a vele szomszédos Si vagy Ge atomnak marad egy elektronja, ami nem tud kötést létesíteni, mert hiányzik hozzá egy elektron, ezért ezeket a szennyező atomokat **akceptornak** nevezzük. Egy másik atomról egy, a kötésben részt vevő elektron a hőmérséklet hatására átmehet az akceptor-atomhoz és létrejöhét a hiányzó kötés. Ekkor viszont onnan fog egy elektron hiányozni, ahonnan ez az elektron jött, tehát **lyuk** keletkezik. Az ilyen félvezetőt **p típusú félvezetőnek** nevezzük.

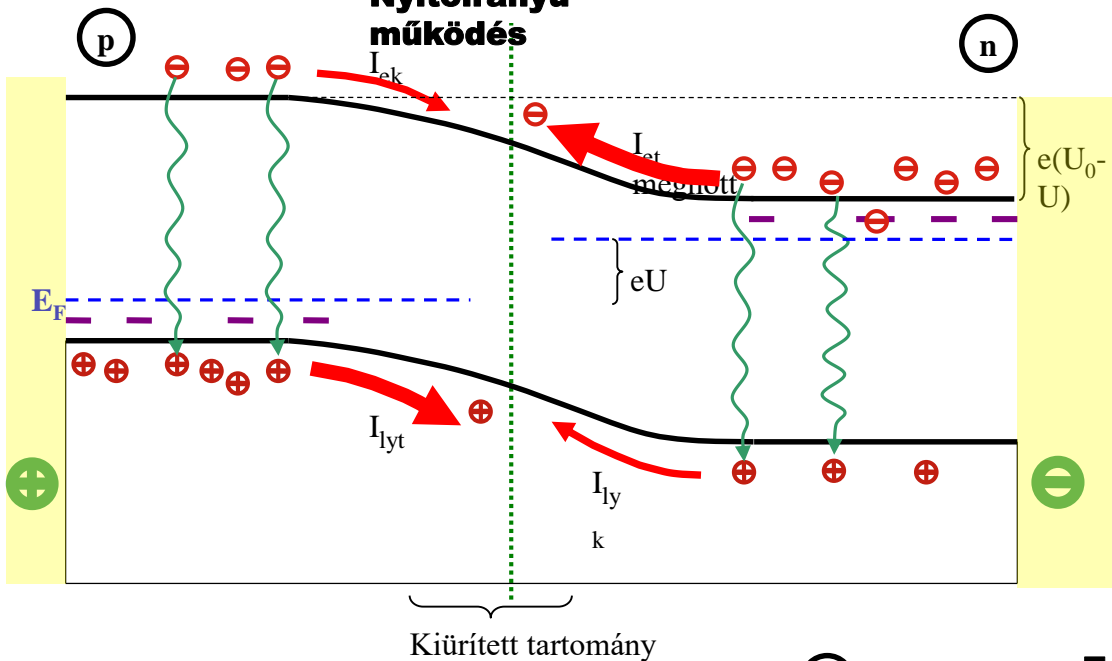
A p-n átmenet külső feszültség nélkül

A két réteg érintkezési felületénél a töltéshordozók koncentrációkülönbsége kismértékű diffúziót indít meg: a n-rétegből elektronok diffundálnak át a p-szennyezetségű rétegbe, a pozitív töltésű lyukak pedig a p-szennyezetségű rétegből átdiffundálnak az n-rétegbe. Amikor az n-rétegből kiinduló elektronok áthaladnak a határrétegen, egy olyan tartományba érkeznek, ahol igen nagy a pozitív töltésű lyukak sűrűsége. Mivel itt a rekombináció valószínűsége nagy, az elektron, mint szabad töltéshordozó rövid idő alatt megszűnik létezni.



Hasonló folyamaton megy keresztül a pozitív töltésű lyuk az n szennyezetségű rétegben. Ennek következtében az átmenet környezetében, a félvezető anyag töltéshordozókban **elszegényedik** és egy úgynevezett határréteg (**kiürített** vagy tértöltésű tartomány) alakul ki. A p oldalra tehát elektronok mennek át, az n oldalra pedig lyukak. Mindkét folyamat azt eredményezi, hogy a **p oldal negatív**, tehát az elektronok számára **magasabb** potenciálú lesz. Végeredményben a két oldalon a **Fermi-szintek kiegyenlítődnek**.

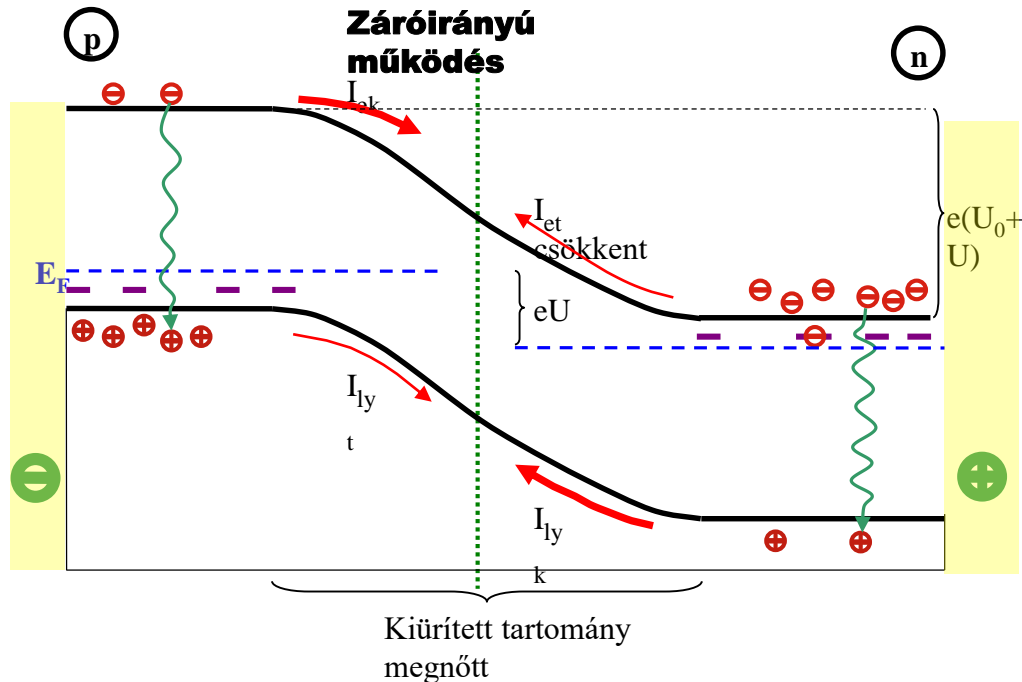
Nyitóirányú működés



A p-n átmenet egyenirányító tulajdonsága

Nyitóirányban folyamatos a töltéshordozók áramlása, így a rekombináció is

Záróirányú működés



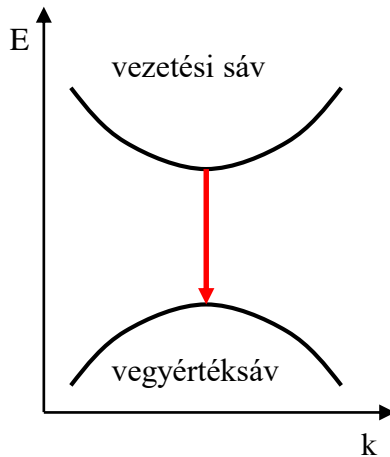
Kiürített tartomány megnőtt

A LED

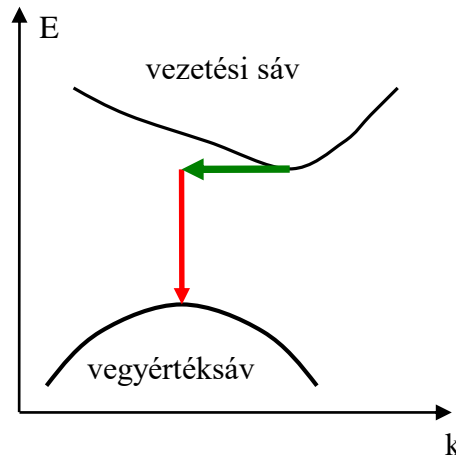
A nyitóirányba kapcsolt dióda p-n átmenetén nagyszámú töltéshordozó áramlik át és a másik oldalon rekombinálódik. Ennek során energia szabadul fel, ez fénykibocsátássá is alakulhat.

Az ún. direkt gap esetén az energiát a k hullámszám (lényegében az impulzus) függvényében ábrázolva a vegyértéksáv teteje és a vezetési sáv alja egymás felett van, indirekt gap esetén viszont távol egymástól.

Abból kell kiindulunk, hogy fotonkibocsátás folyamatában az össz-impulzusnak is meg kell maradnia, viszont a tiltott sáv szélességével egyező energiájú foton impulzusa $p=E/c$ nagyon kicsi. Direkt gap esetén az elektron impulzusa nem változik, tehát az impulzus megmaradással nincs baj.



Átmenet direkt band-gap esetén (pl. GaAs)

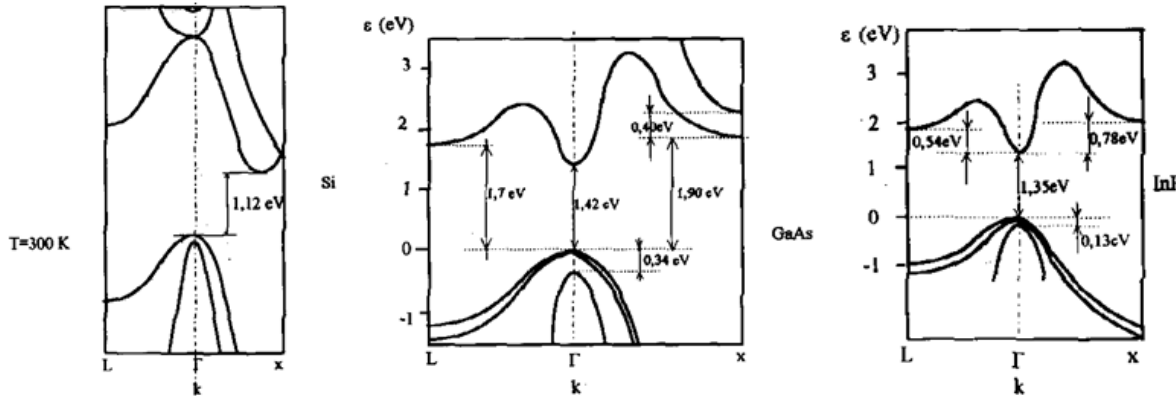


Átmenet indirekt band-gap esetén (pl. Si, Ge)

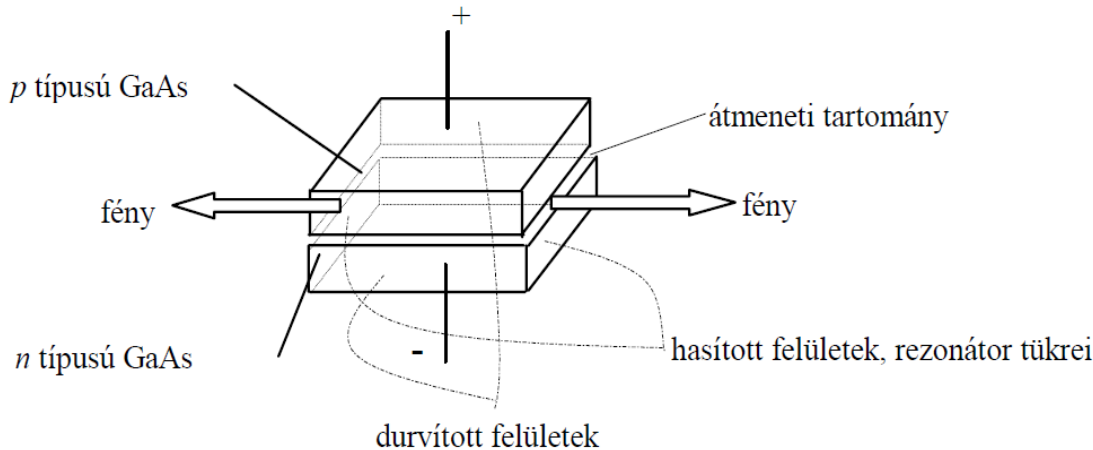
Indirekt gap esetén viszont az elektron impulzusa $p=(2mE)^{1/2}$ számottevően változik, amit csak egy rácsrezgés tud elvinni, ez pedig kb. két nagyságrenddel kisebb valószínűséggel megy végbe. A Si és a Ge indirekt gap-pel rendelkezik, a GaAs viszont direkt gap-pel, ezért alkalmas világításra.

A fény színét a tiltott sáv szélessége szabja meg.

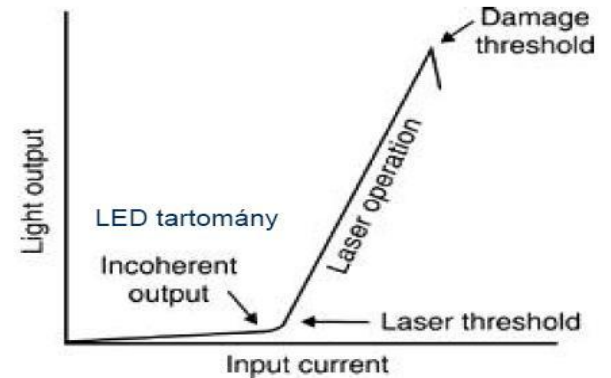
A félvezető lézer

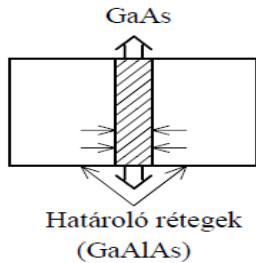


Indirekt (szilícium) és direkt (GaAs és InP) sáv szerkezetek

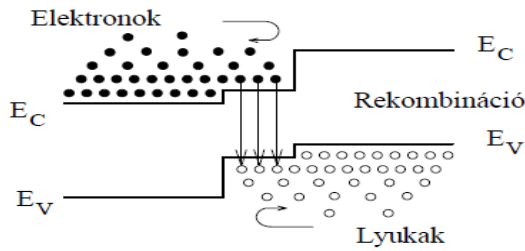


Mit kell a LED-hez hozzátenni, hogy félvezető lézert kapjunk? Kell hozzá **tükörrezonátor** (párhuzamosra polírozott felületek) és **populációinverzió** a vezetési és vegyértéksáv egy-egy rétege között az átmeneti tartományban. Ehhez kell egy kritikus áramsűrűség!

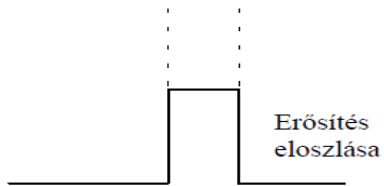




a.)



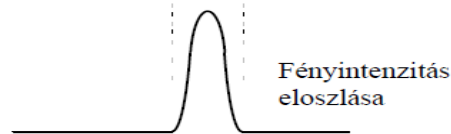
b.)



c.)



d.)



e.)

Kettős heteroszerkezetű GaAlAs-GaAs lézer

Heteroátmenetes félvezető lézer

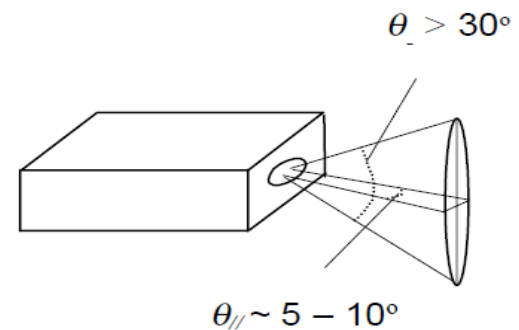
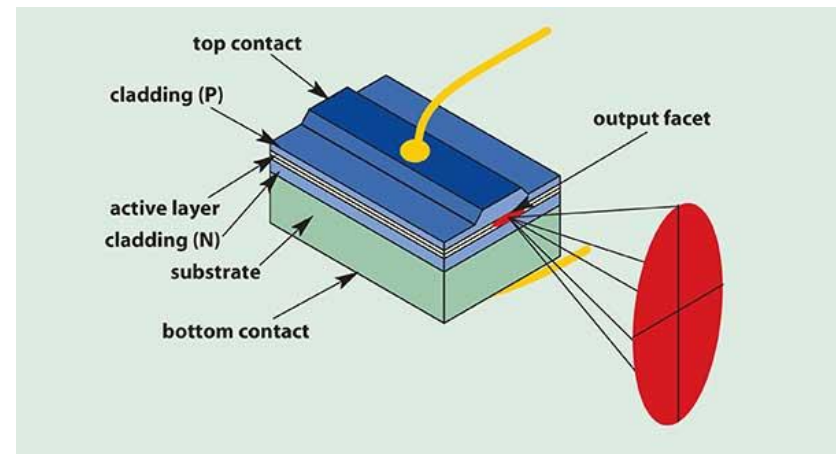
A nagyon vékony GaAs aktív réteget mindkét oldalról GaAlAs ($\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$) határoló réteg veszi körül. A két réteg típusa rendre n és p . Ha mindkét rétegre nyitó irányú feszültséget kapcsolunk, akkor mindkettőbe injektálni kezdjük a GaAs-be. Mivel mind az n -, mind a p -típusú GaAlAs-ban nagyobb a tiltott sáv szélessége, mint az aktív réteget alkotó GaAs-é, az elektronok összegyűlnek az aktív rétegben és létrejön az inverz betöltöttség (populáció inverzió). Ha az aktív réteg vastagságát kellően vékonyra választjuk, akkor már viszonylag alacsony áramsűrűség mellett is létrejön az inverz betöltöttség. A GaAlAs törésmutatója is eltér a GaAs törésmutatójától. A fenti hatások figyelembevételével alakul ki a kimenő fény intenzitás-eloszlása.

Heteroátmenetes félvezető lézer/2

A GaAlAs optikai tulajdonságai különböznek a GaAs-étől. Az elrendezés szempontjából a törésmutató különbözőségének van döntő jelentősége. A GaAs törésmutatója ugyanis 6 %-kal nagyobb, mint a GaAlAs-é. Ezáltal a keletkező fény az aktív rétegben koncentrálódik.

Így tehát a GaAlAs nagyobb sáv szerkezetével az elektronokat, kisebb törésmutatójával pedig a fényt koncentrálja az aktív rétegbe.

A hullámhosszal összemérhető emittáló felület miatt a félvezető lézerekből kilépő nyaláb erősen divergens, a divergencia szöge általában különbözik az átmenettel párhuzamos és merőleges irányban. A kilépő nyaláb általában asztigmatikus, elliptikus Gauss-nyaláb.



Heteroátmenetes félvezető lézer/3

Aktív anyag/szubsztrát	Működési hullámhossz (nm)
InGaN/GaN	360-525
SiC	470
GaP	550-590
GaAs _{0.15} P _{0.85}	589
AlGaInP/GaAs	625-700
GaAs _{0.35} P _{0.65} /GaAs	632
GaAs _{0.6} P _{0.4} /GaAs	650
GaAsP/GaAs	700
Ga _{1-x} Al _x As/GaAs	650-900
GaAs	910-1020
InGaAsP/InP	600-1600

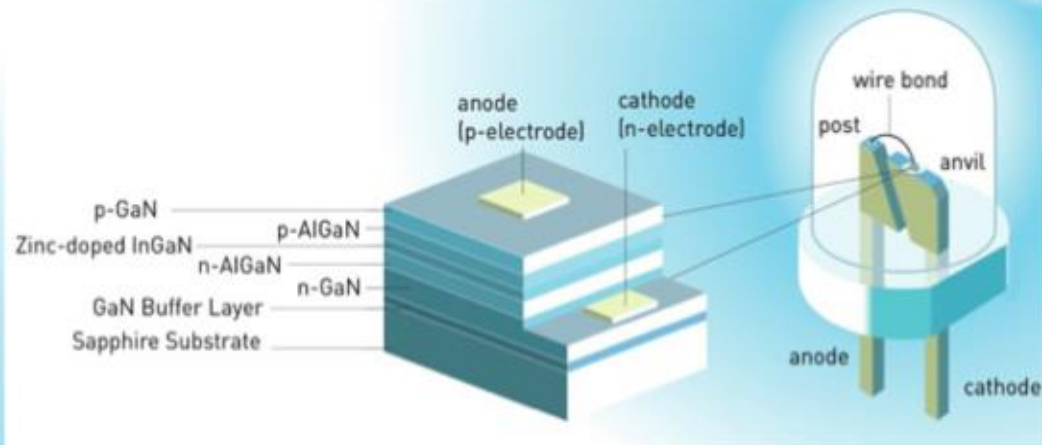
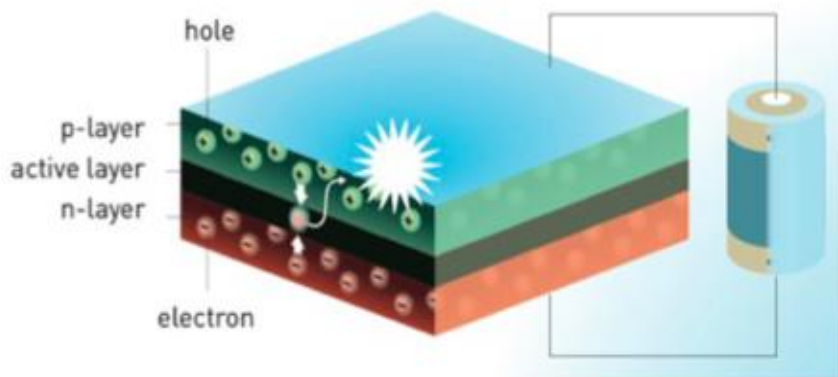
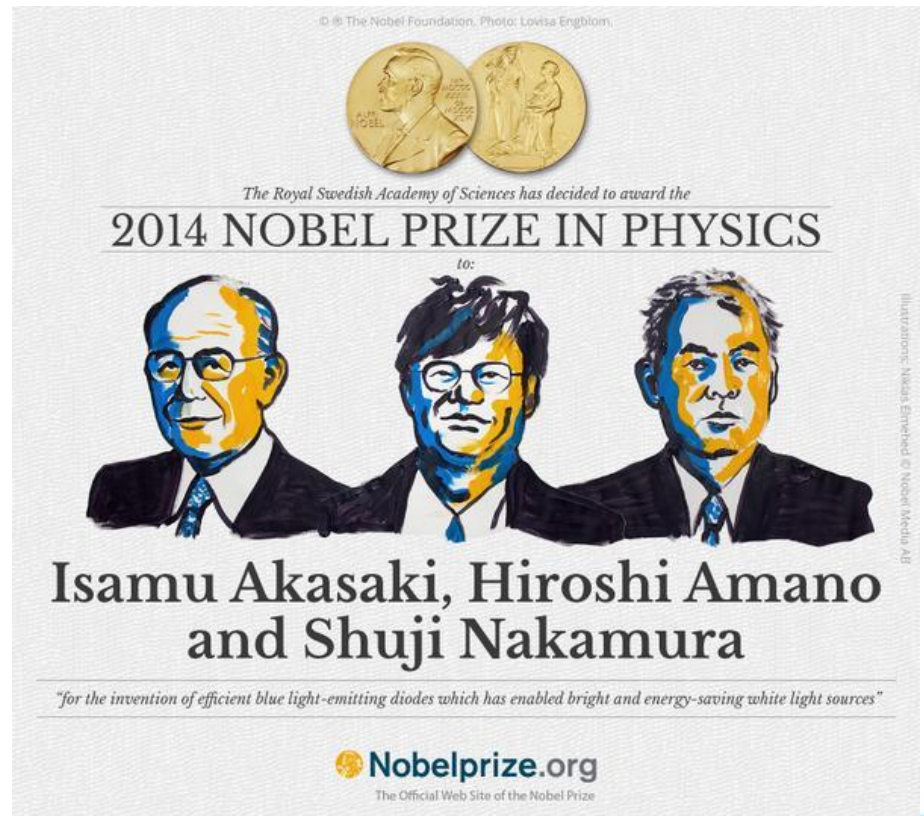


Figure 3. Illustrations of a light-emitting diode by Johan Jarnestad at The Royal Swedish Academy of Sciences