

Az Információtechnika fizikai alapjai (GEFIT003M, GEFIT006M)

2020/2021. tanév, 2. félév

4. rész: Kvantumoptika és kvantumelektronika, a lézerek.

4/2 előadás: Szilárdtest lézerek, félvezető lézerek.

Lézertechnikai módszerek: rövid impulzusok előállítása, hangolás, frekvencia
átalakítás.

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

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 fénnyel
- 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

$$R = ((n-1)/(n+1))^2$$

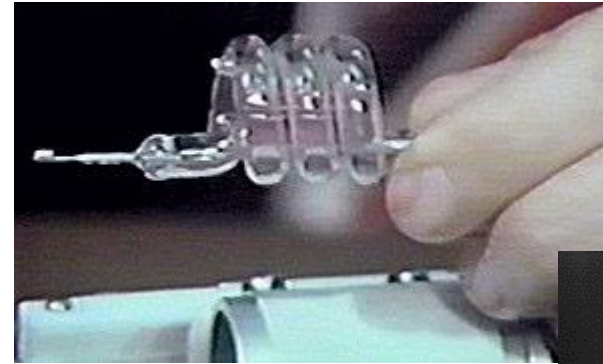
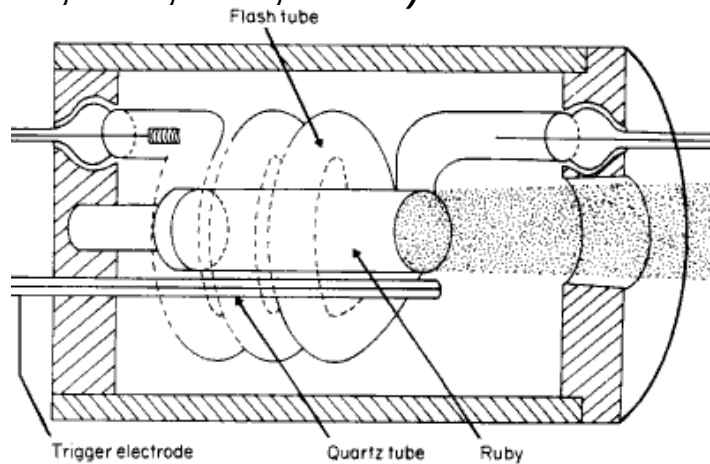
reflexiós tényezőt jelent. Ha $n=1,5$ (üveg) akkor R csak 4%. Oxid kristályokra ($n \approx 1,8$) ez kb. kétszeres reflexiót jelent. Ezek még nem feltétlenül elegendő visszacsatolások, de a GaAs esetében ($n=3,5$) érvényes 30% már elegendő lehet.

A szilárdtest lézerek: a rubinlézer az első lézer

1957 Gordon Gould (Columbia University): a lézerek működési elve („30 éves szabadalmi haború”) **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!



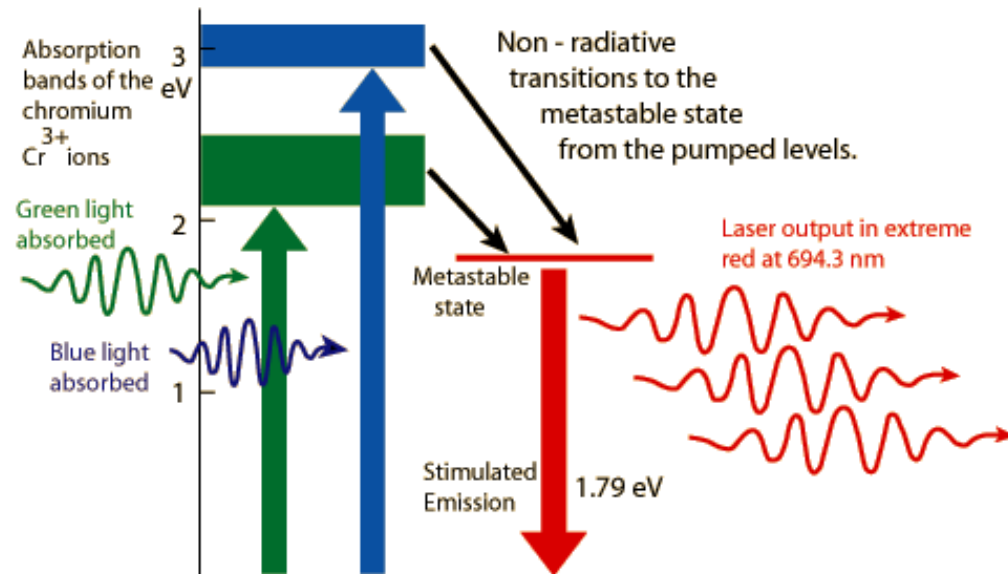
A rubinlézer



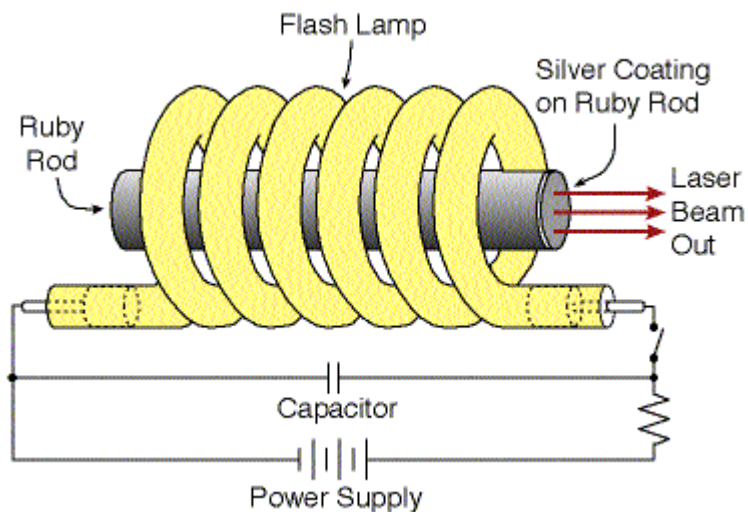
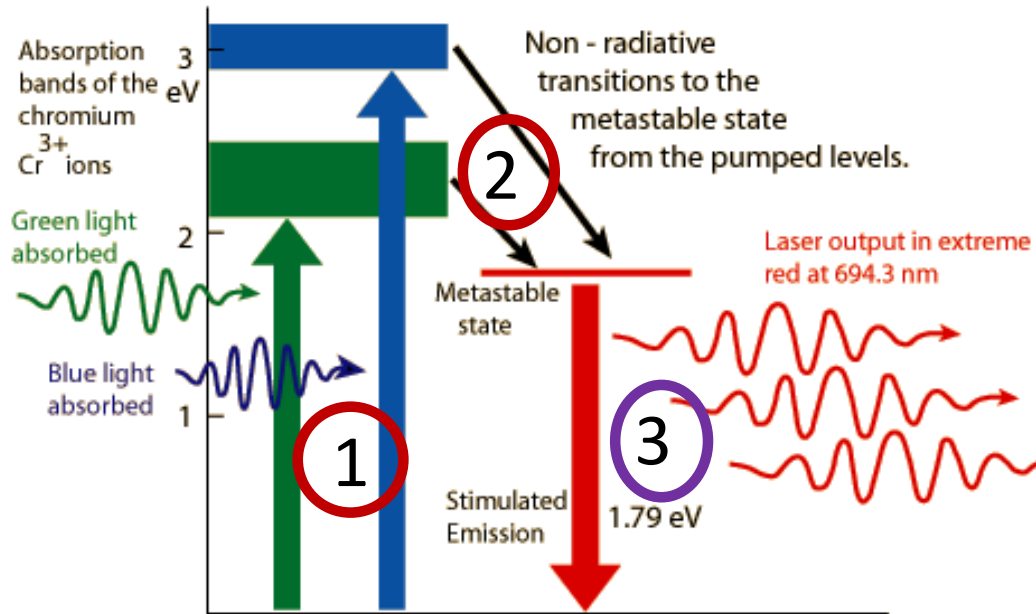
A rubin ($\text{Cr}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$) a **korund** ásványfajhoz tartozik. A vegyileg tiszta korund színtelen és áttetsző, de szennyeződések hatására elszíneződhet: vörös színű változata a **rubin**, minden más színű változatai a **zafír**. A rubin vörös színét a vas és a króm „szennyezés”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

A **rubinlézer** mesterséges egykristály rudat tartalmaz. Ez a természetes rubinhoz képest halványabb (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:

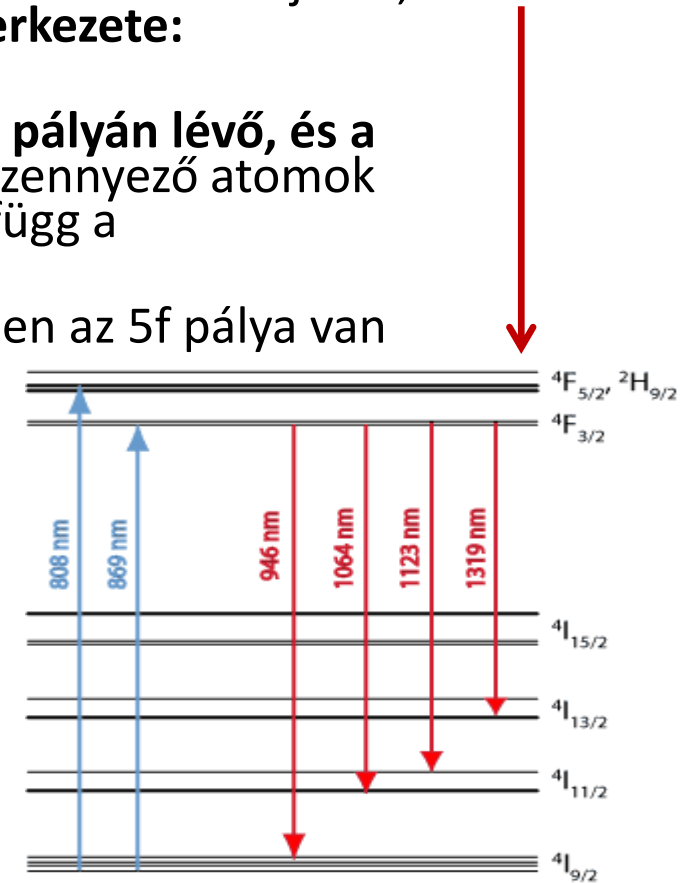
1, Gerjesztés villanó lámpával. Hatékony mért szélesek az abszorpciós sávok (és sűrű az anyag)

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 ionállapototban: **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 kiszélesedettek. 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



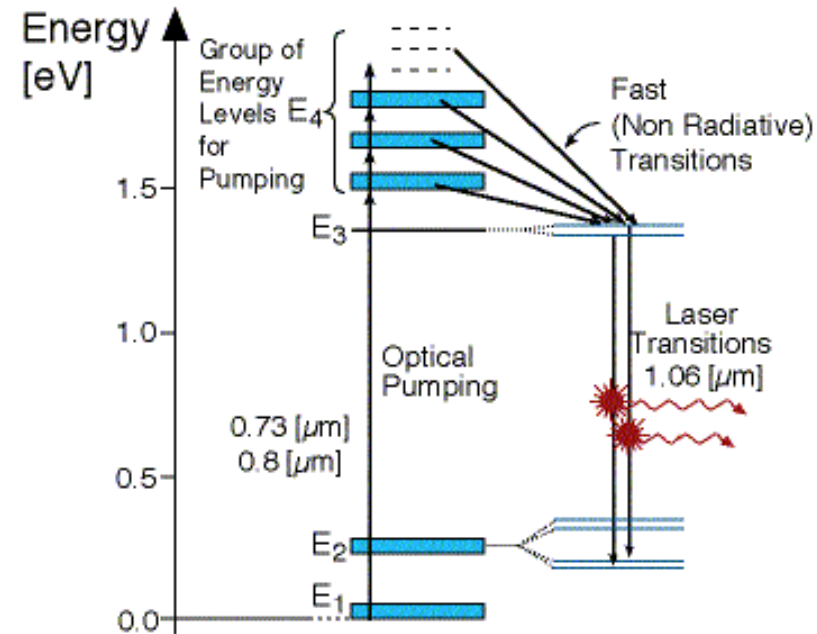
A **neodímium** és a YAG igen szerencsés párosítás, mert
A neodímiumnak van az alapállapota fölött egy rövid
életidejű szintje, ami alsó lézerszintnek kiváló (így 4
lézer építhető belőle),

A YAG yttrium alumínium gránát; ($\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$)

A mesterséges egykristály kedvező optikai
tulajdonságokkal bír, jó hővezető,

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

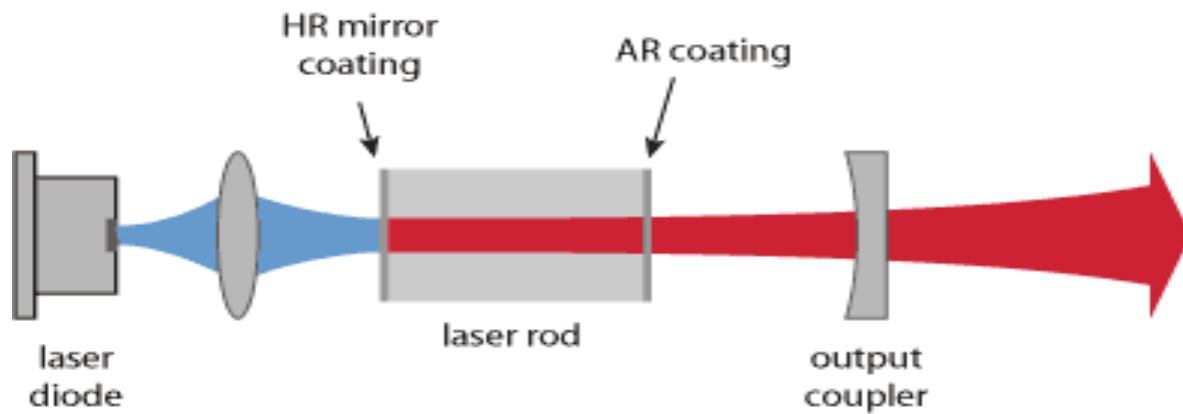
Vannak energia szintjei, amelyek egyeznek
bizonyos félvezető lézerek fotonenergiájával,
ezért nagy hatásfokkal gerjeszthető



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.

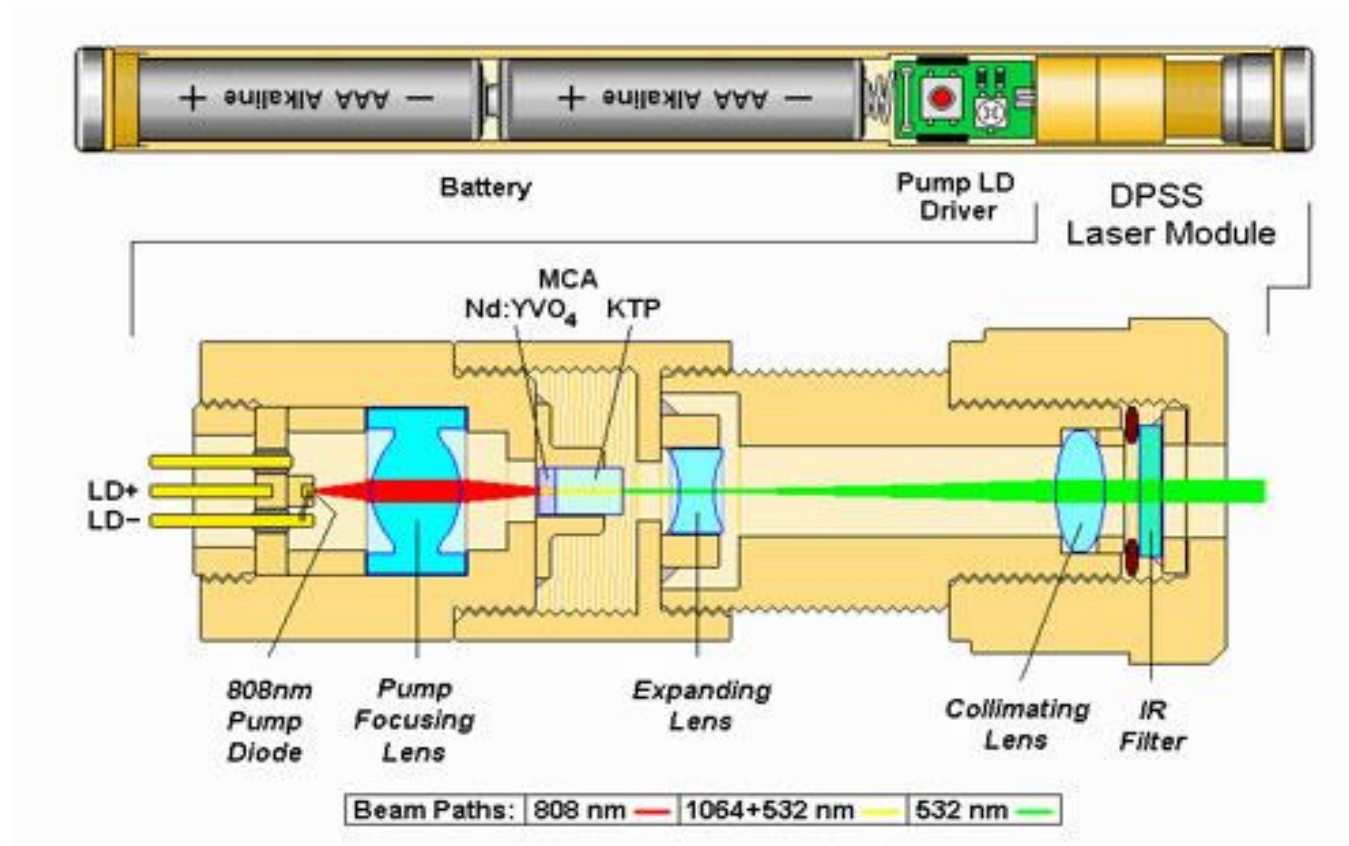


Zöld lézer pointer

DPSS: dióda pumpált szilárdtest

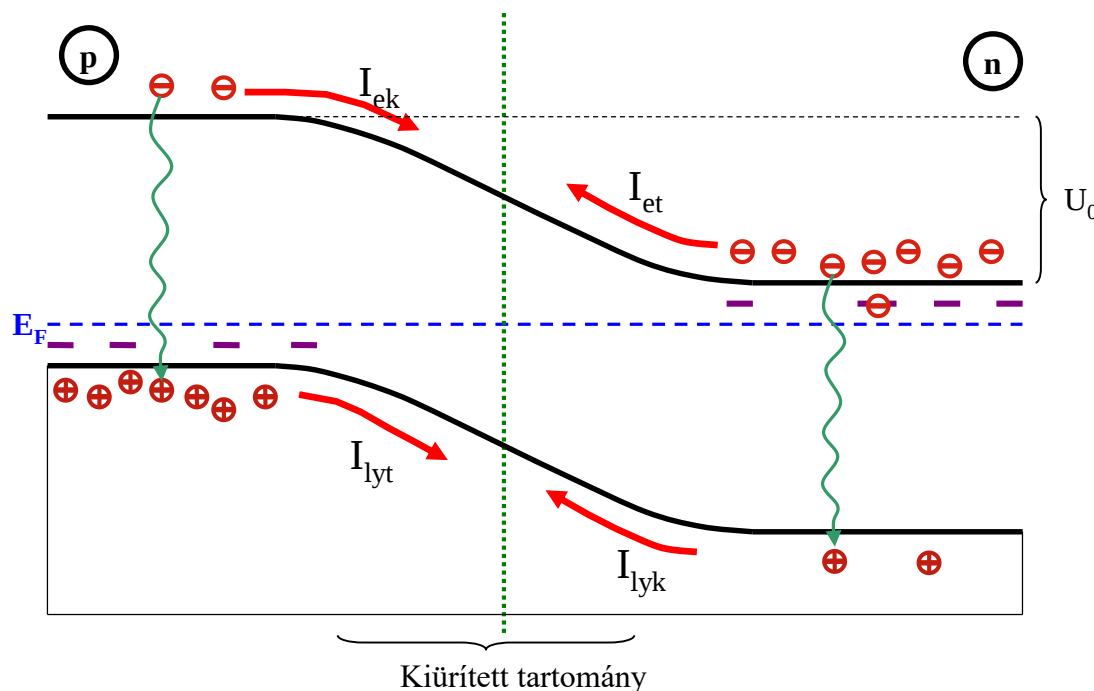
YVO: ittrium vanádium oxid (a YAG helyett)

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

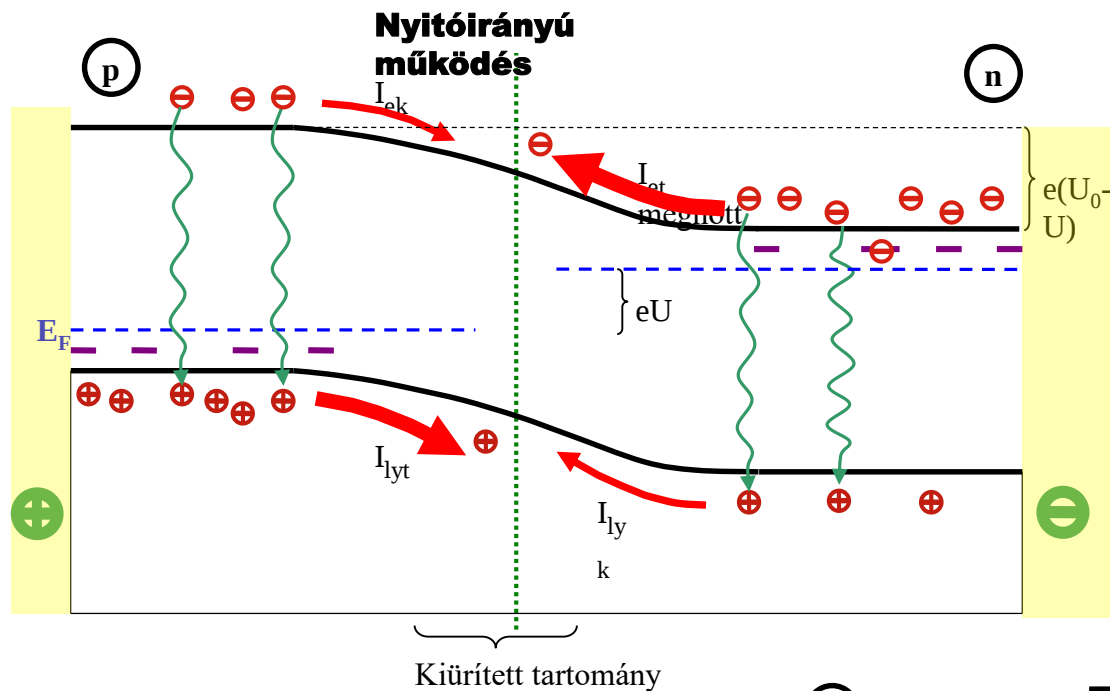


Út a félvezető lézerekhez: a p-n átmenet külső feszültség nélkül

A két réteg érintkezési felületénél a töltéshordozók koncentrációkülönbsége kismértékű diffúziót indít meg: a n-rétegből elektronok diffundálnak át a p-szennyezettségű rétegbe, a pozitív töltésű lyukak pedig a p-szennyezettségű 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.

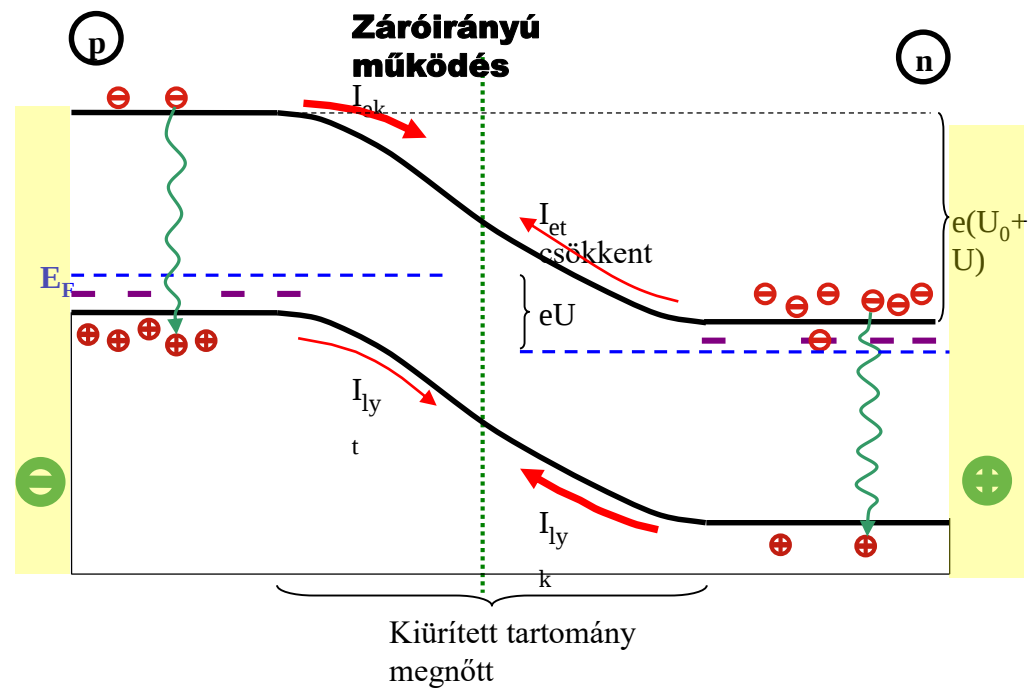


Hasonló folyamaton megy keresztül a pozitív töltésű lyuk az n szennyezettségű rétegben. Ennek következtében az átmenet környezetében, a félvezető anyag töltéshordozókban **elszegényedik** és egy úgynevezett határréteg (**kiürített** vagy tértöltésű tartomány) alakul ki. A p oldalra tehát elektronok mennek 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**.



A p-n átmenet
egyenirányító
tulajdonsága

Nyitóirányban folyamatos
a töltéshordozók
áramlása, így a
rekombináció is

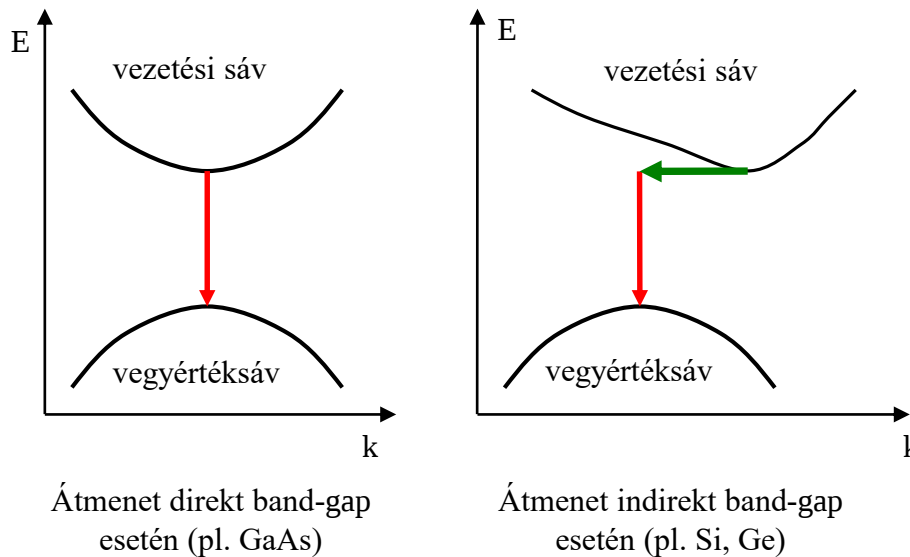


Út a félvezető lézerekhez: a LED

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

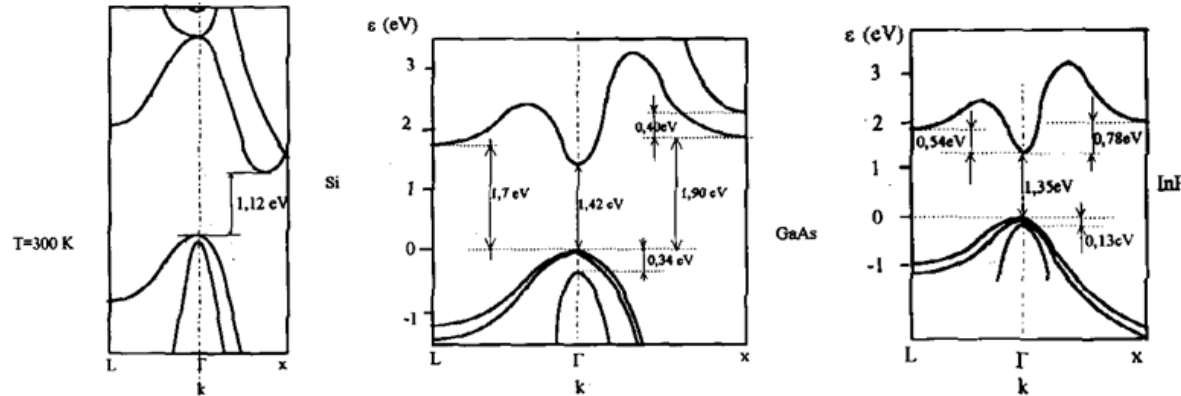
Abból kell kiindulunk, hogy fotonkibocsájtás folyamatában az össz-impulzusnak is meg kell maradnia, viszont a tiltott sáv szélességével egyező energiájú foton impulzusa $p=E/c$ nagyon kicsi. Direkt gap esetén az elektron impulzusa nem változik, tehát az impulzusmegmaradással nincs baj.



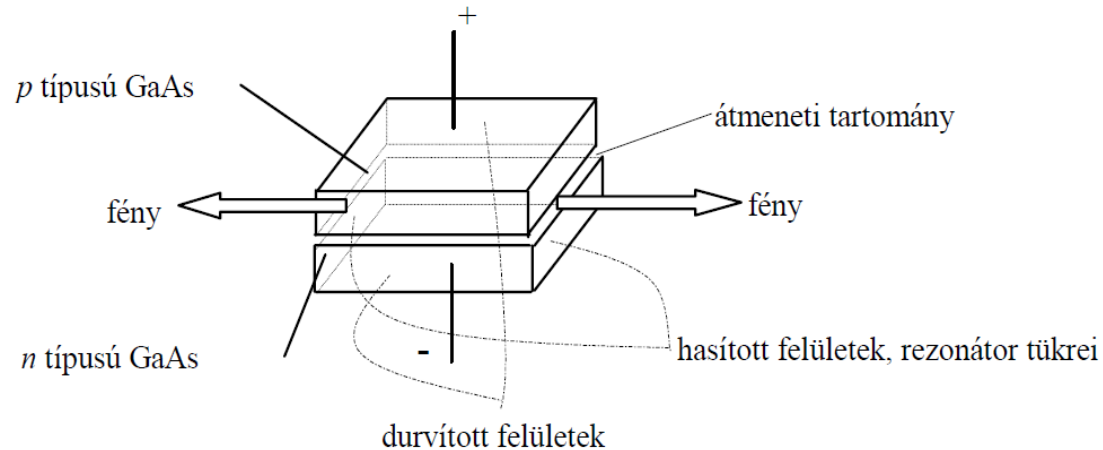
Indirekt gap esetén viszont az elektron impulzusa $p=(2mE)^{1/2}$ számottevően változik, amit csak egy rácsrezgés tud elvinni, ez pedig kb. két nagyságrenddel kisebb valószínűséggel megy végbe. A Si és a Ge indirekt gap-pel rendelkezik, a GaAs viszont direkt gap-pel, ezért alkalmas világításra.

A fény színét a tiltott sáv szélessége szabja meg.

A félvezető lézer



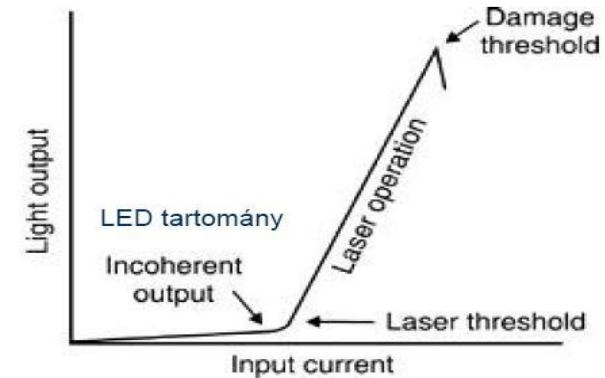
Indirekt (szilícium) és direkt (GaAs és InP) sávszerkezetek

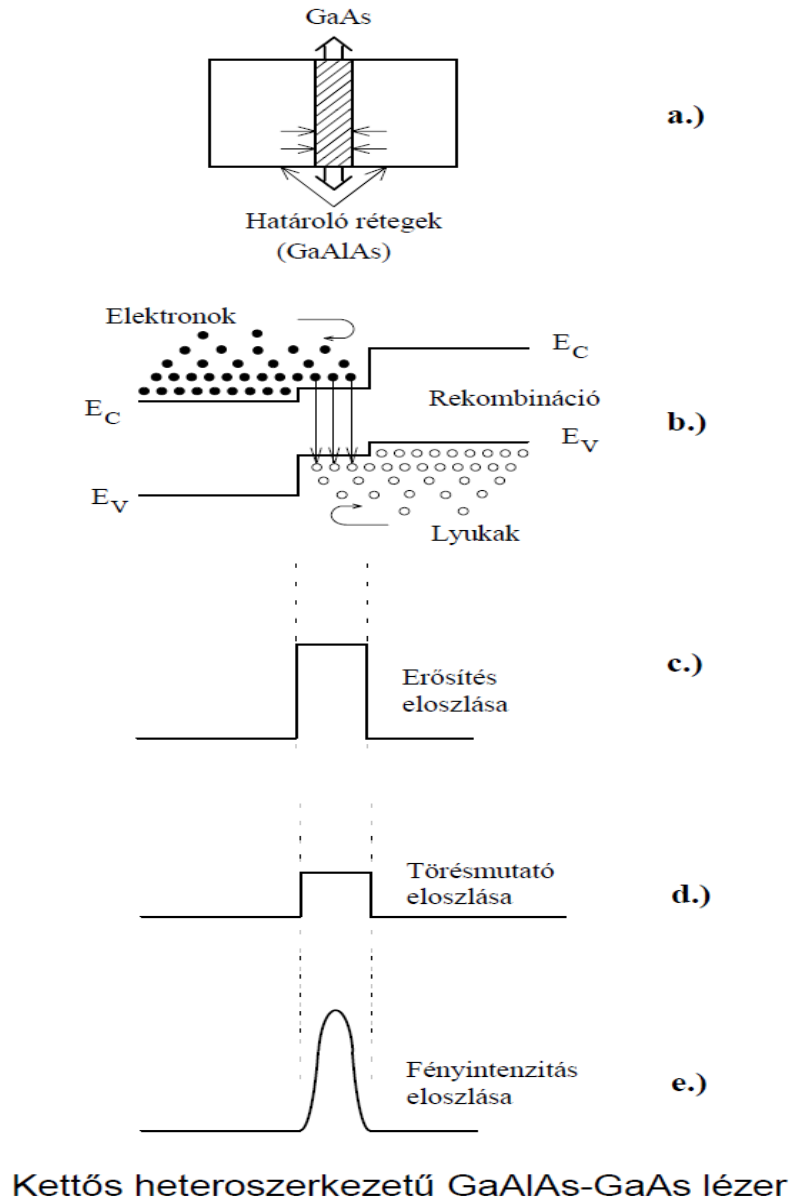


Mit kell a LED-hez hozzátenni, hogy félvezető lézert kapjunk?

Kell hozzá **tükörrezonátor** (párhuzamosra polírozott felületek) és

populációinverzió a vezetési és vegyértéksáv egy-egy rétege között az átmeneti tartományban. Ehhez kell egy kritikus áramsűrűség!





Heteroátmenetes félvezető lézer

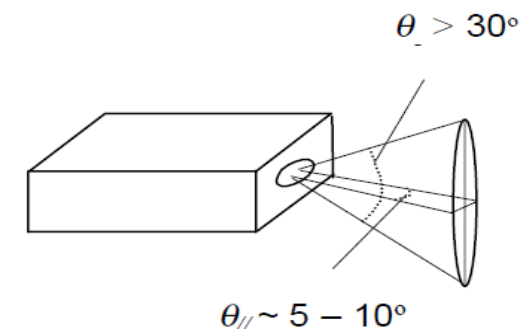
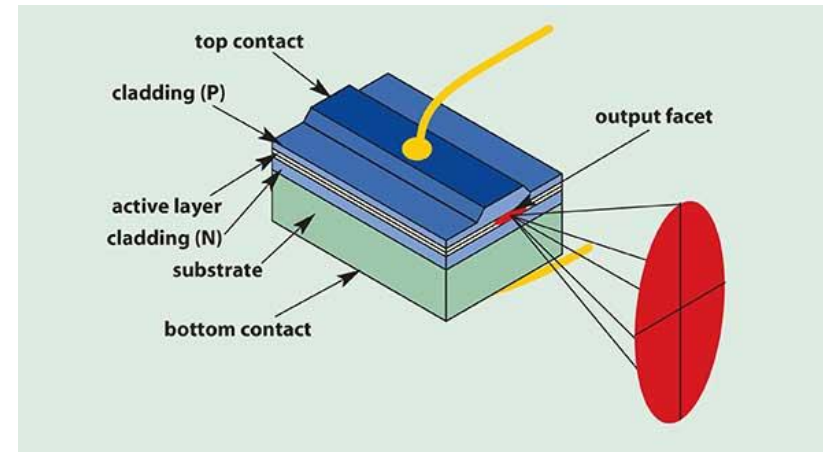
A nagyon vékony GaAs aktív réteget mindkét oldalról GaAlAs ($\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$) határoló réteg veszi körül. A két réteg típusa rendre n és p . Ha mindkét rétegre nyitó irányú feszültséget kapcsolunk, akkor mindkettőbe injektálni kezd a GaAs-be. Mivel mind az n -, mind a p -típusú GaAlAs-ben 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-étól. 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 sávszerkezetével 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

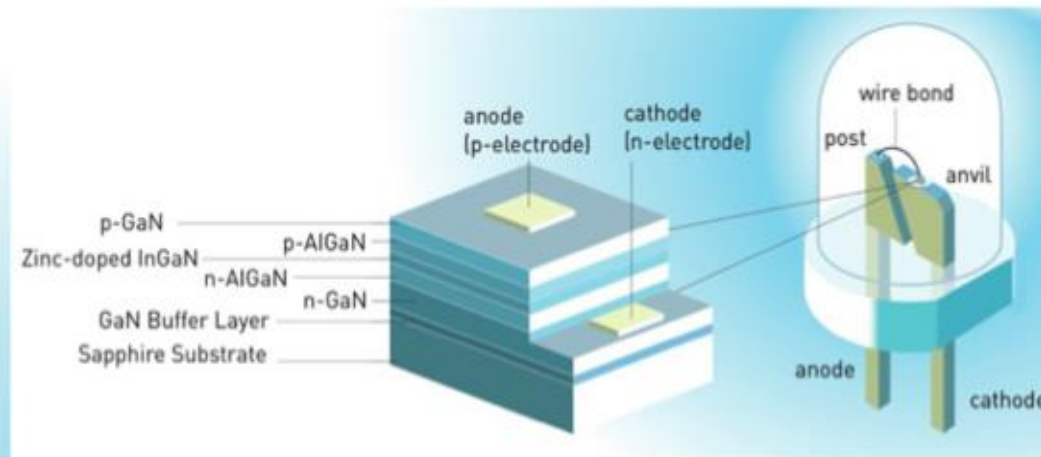
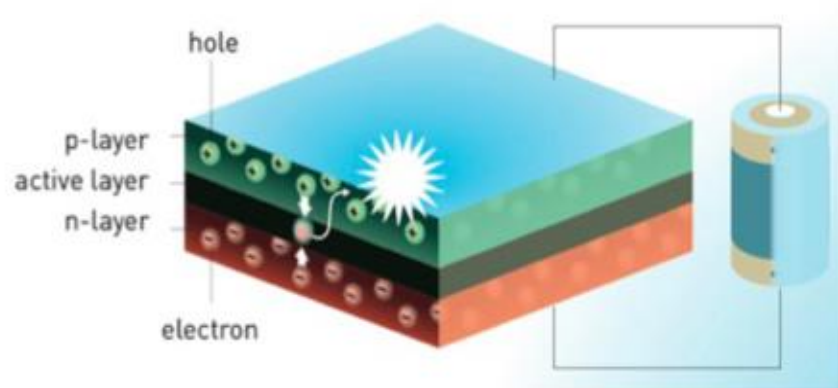
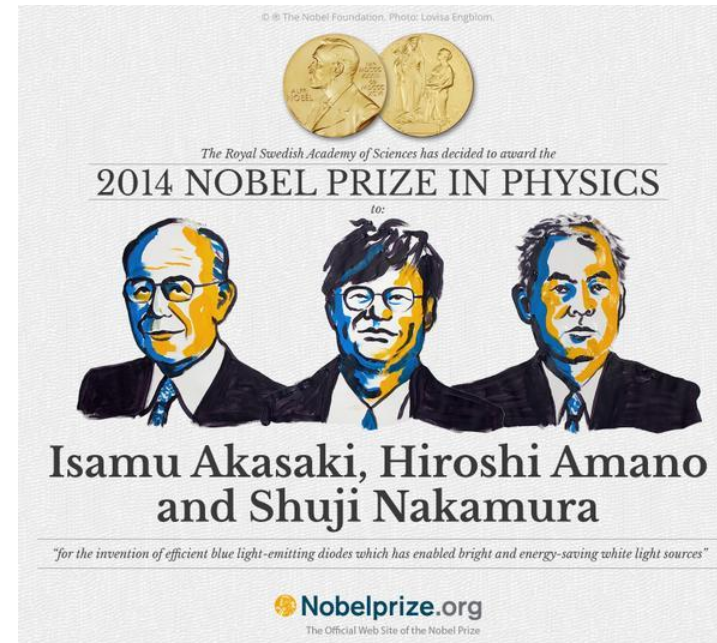


Figure 3. Illustrations of a light-emitting diode by Johan Jarnestad at The Royal Swedish Academy of Sciences

Ismétlő kérdések

Melyik állítás jellemző a Nd: YAG lézerre? (Három választ kell megjelölni!)

- a) az egyik legnagyobb teljesítményű lézertípus
- b) három energiaszintű lézer
- c) gerjesztése félvezető lézerrel is történhet
- d) az első Magyarországon működő lézer ilyen volt
- e) működése közben a neodímium molekulák két energiaszintje között populáció inverzió áll fenn
- f) a gerjesztési energia átadása a két gáz között másodfajú ütközéssel történik

Párosítsuk össze a lézereket és a hullámhosszukat!

- | | |
|--------------------------|------------------------|
| a) félvezető lézer | 1) 633nm |
| b) He-Ne lézer | 2) 10,6 μ m |
| c) Nd:YAG lézer | 3) 650nm, 808nm, stb.. |
| d) CO ₂ lézer | 4) 695nm |
| e) rubinlézer | 5) 1064nm |

Megoldás: a3, b1, c5, d2, e4

Ismétlő kérdések/2

A félvezető lézerek működésével kapcsolatos állítások közül válasszuk ki a hamis állítást!

- a) Az átmeneti tartományban elektronok injektálódnak az n típusú rétegből a vezetési rétegbe
- b) Az indirekt sávátmenetű félvezetőkben a rekombinációhoz általában egy fonon közreműködése is szükséges
- c) A kibocsájtott foton impulzusa kb. egyezik a vezetési elektron impulzusával
- d) A vezetési sávból a vegyértéksávba fénykibocsátással csak olyan elektronátmenet lehetséges, amikor az elektron impulzusa gyakorlatilag változatlan marad

Tekintsük a heteroátmenetes GaAs félvezető lézert, amelyben a nagyon vékony GaAs aktív réteget mindkét oldalról GaAlAs ($\text{Ga}_{1-x}\text{Al}_x\text{As}$) határoló réteg veszi körül.

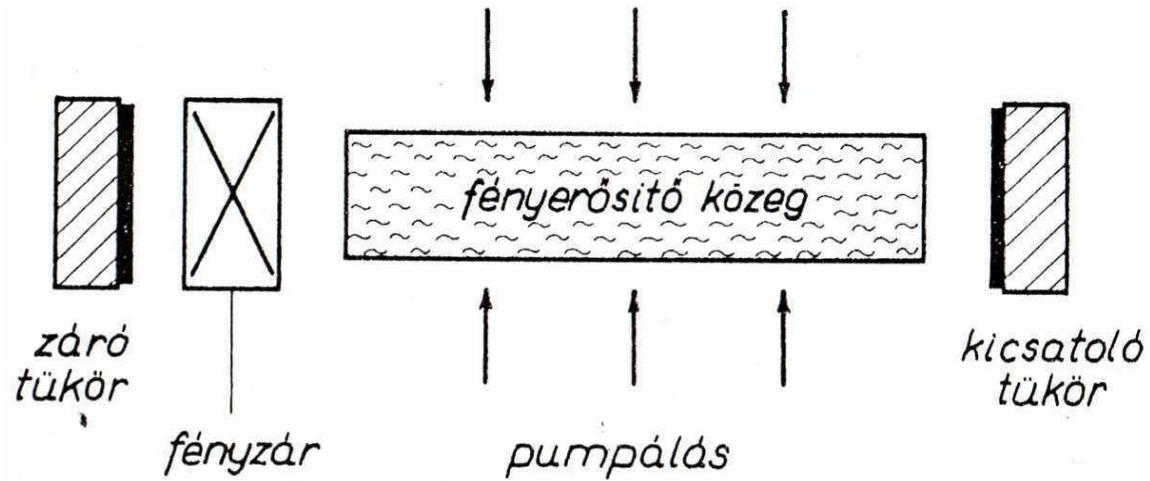
Válasszuk ki azt az állítást, ami nem jellemző erre a lézerre!

- a) kisebb áramsűrűség mellett jön létre az inverz betöltöttség, mint a "sima" GaAs lézerben
- b) a GaAlAs nagyobb tiltott sáv szélességével az elektronokat az aktív rétegbe koncentrálja
- c) a GaAlAs nagyobb törésmutatójával a fényt az aktív rétegbe koncentrálja
- d) populáció inverzió csak a vékony GaAs rétegben lesz

A lézerek két üzemmódjáról

- Az első szilárdtest lézerek csak impulzus üzemben tudtak működni. Sem a gerjesztés, sem a melegeedés nem tette lehetővé a folytonos üzemet.
- Számos alkalmazás igényelte azonban a folytonos üzemet (CW), amit komoly fejlesztésekkel el is lehetett érni. A CW módban azonban a populációinverzió csak kismértékben lépi túl a lézerműködéshez szükséges küszöbértéket, mivel az indukált emisszió beindulása csökkenteni kezdi azt.
- Még később aztán kiderült, hogy a nagyobb lézerteljesítmény kedvezőbb lenne sok alkalmazásban. Ez azonban CW módban nem megvalósítható. És szükségtelen is, mivel impulzus üzemben sokkal nagyobb pillanatnyi teljesítmény érhető el.
- Ha a rezonátorban elhelyezünk egy kapcsolót, ami a lézerműködést megakadályozza, akkor a pumpálás hatására a populációinverzió a küszöbértéket jóval nagyobb mértékben meghaladhatja. Ha hirtelen kinyitjuk a kapcsolót, akkor az erősítés jóval nagyobb a veszteségnél, és a beinduló lézerműködés hatására a rezonátorban tárolt nagy mennyiségű energia egy rövid időtartamú, nagy intenzitású impulzus formájában lép ki a rezonátorból.
- Mivel ez a technika a rezonátor Q jósági tényezőjének egy alacsony értékről magas értékre történő kapcsolására épül, ezért ezt a technikát röviden Q-kapcsolásnak nevezzük.

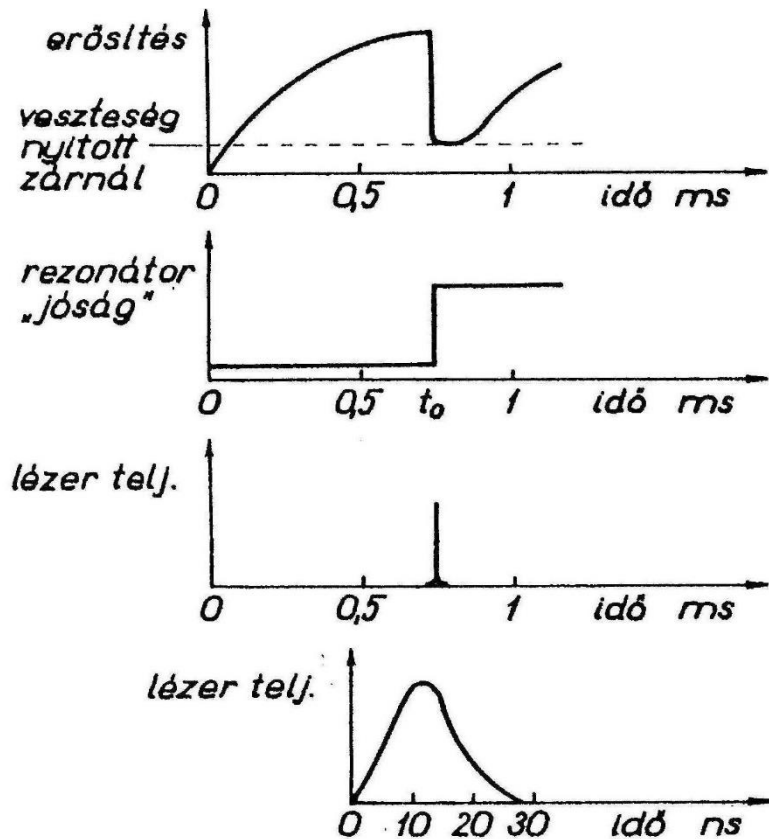
A Q-kapcsolás



Q: quality = minőség
A tükrörezonátor
jósági tényezője

A Q-kapcsolás elve: A pumpálás már folyik, a populáció inverzió már kiépült, de a fényzár csukva van. Ilyenkor a rezonátor visszacsatolása nem elegendő a lézer beindulásához. A zárat hirtelen kinyitva a visszacsatolás megnő, a felépülő lézersugárzásban egyszerre sok gerjesztett atom energiája sugárzódik ki.

A Q-kapcsolás/2



Óriásimpulzus kialakulása szilárdtest impulzuslézerekben

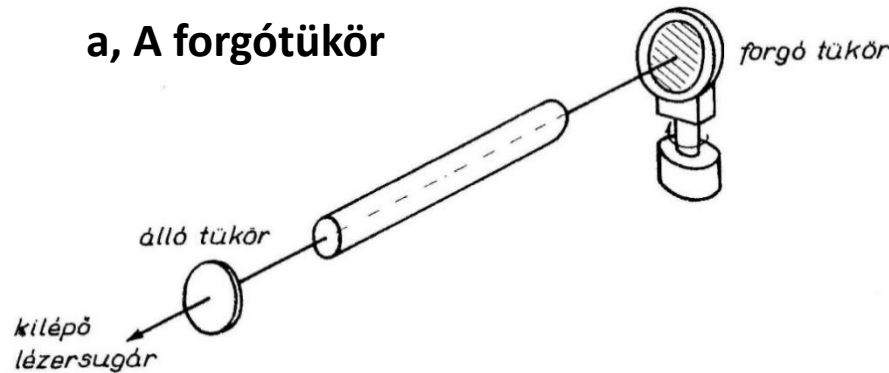
- a) Az inverzió, ill. erősítőképesség időfüggése
- b) A zár nyitása
- c) A lézerimpulzus megjelenése
- d) A lézerteljesítmény időbeli változása
a c)-hez képest húszezerszeresen széthúzott időskálán

c)
A Q kapcsolás energetikai veszteséget okoz.

d)
Q kapcsoló nélkül 1ms impulzus 1W teljesítmény = 1mJ impulzus
Q kapcsolóval 1ns impulzus 10^5 W teljesítmény = $10^{-9} \cdot 10^5 = 10^{-4}$ J = 0,1mJ

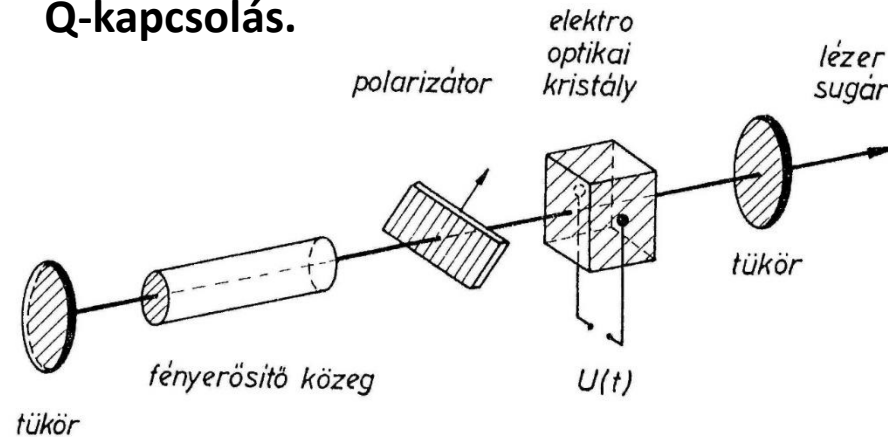
Aktív Q kapcsoló

a, A forgótükör



a) Folytonos lézert meg lehet szaggatni ezzel az eszközzel $Q \neq 0$, ha a tükör merőleges a rezonátor tengelyre 20-40 ezer fordulat/perc a tipikus fordulatszám (μs)

b, Elektrooptikai Q-kapcsolás.

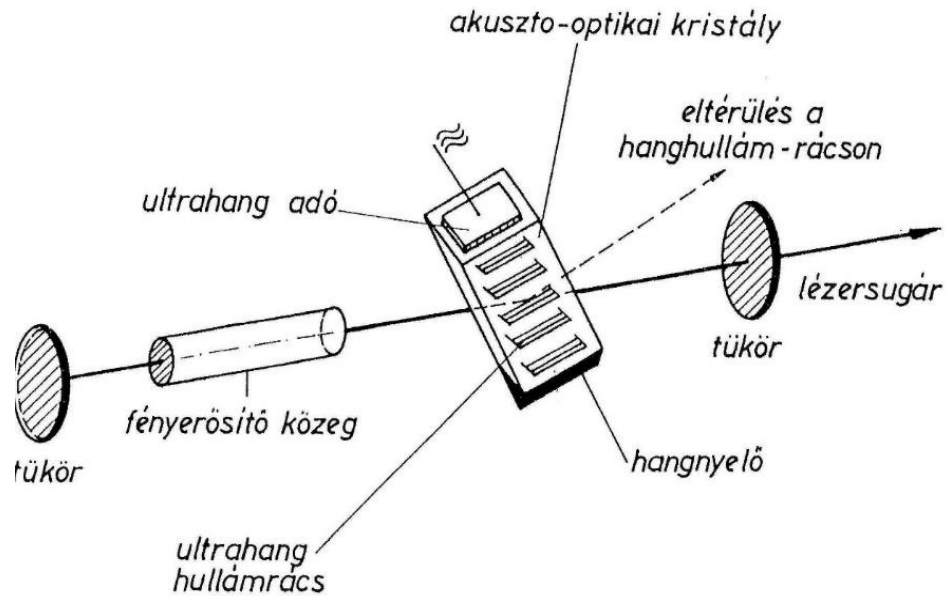


b, A KDP kristályon olyan feszültség van, hogy a rajta oda – vissza áthaladó, lineárisan polarizált fény polarizációs síkját éppen 90° -kal forgatja el (2 db $\lambda/4$ lemez),

- ezt a polarizátor nem ereszt tovább; ebben az állapotban a rendszer zár.
- Amikor a KDP-ről a feszültséget hirtelen lekapcsolják, a polarizációs sík elforgatása megszűnik, a zár kinyit.
- Pockels-cellának is nevezik
- Gyorsabb, mint a, de csak kis teljesítményt tud kapcsolni (ns)

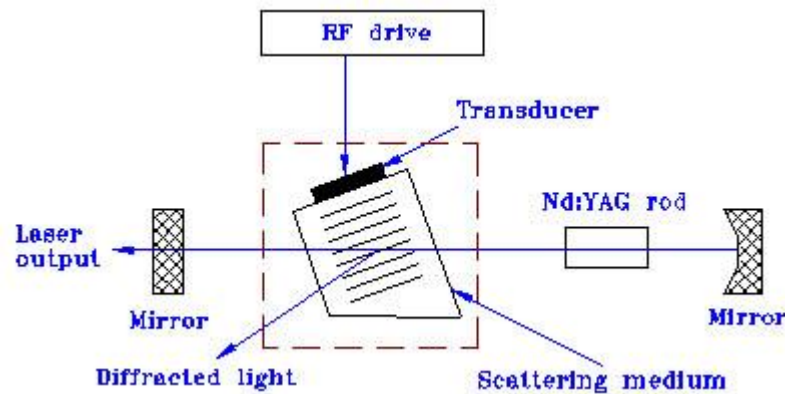
Aktív Q kapcsoló/2

c, Akusztooptikai Q-kapcsoló



c, Az akusztooptikai kristályban ultrahanghullámot (UH) keltenek, ez törésmutató rácsot hoz létre a kristályban, melyen a fény elhajlást szenved; ilyenkor a rezonátor vesztesége nagy.

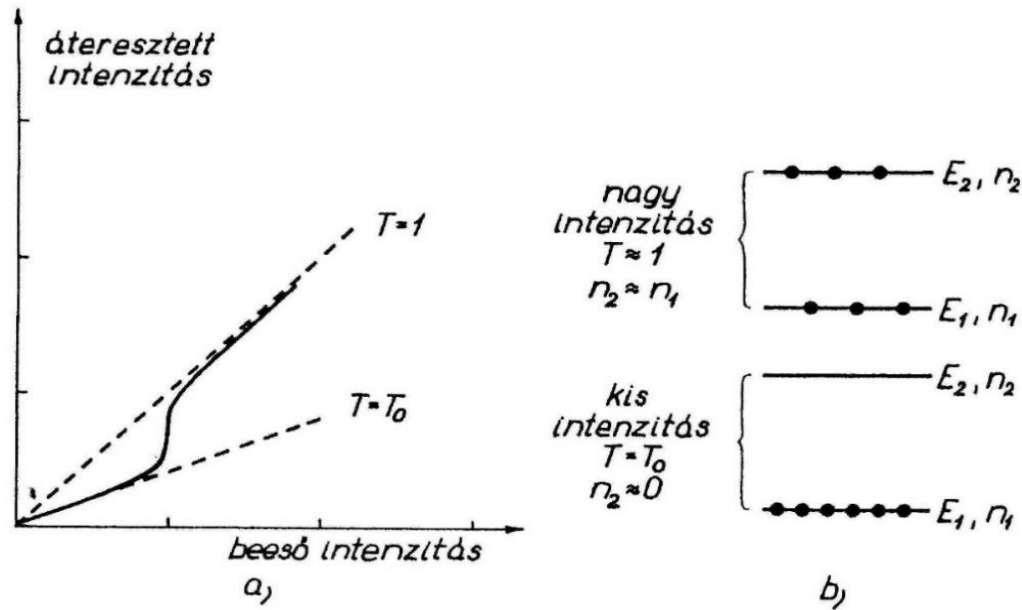
Amikor a UH-t hirtelen lekapcsolják, az eltérítés megszűnik, a zár kinyit.



Az AO Q-kapcsolót nevezik Bragg-cellának is, bár az inkább AO modulátor (tehát egy picit a frekvenciát is változtatja)

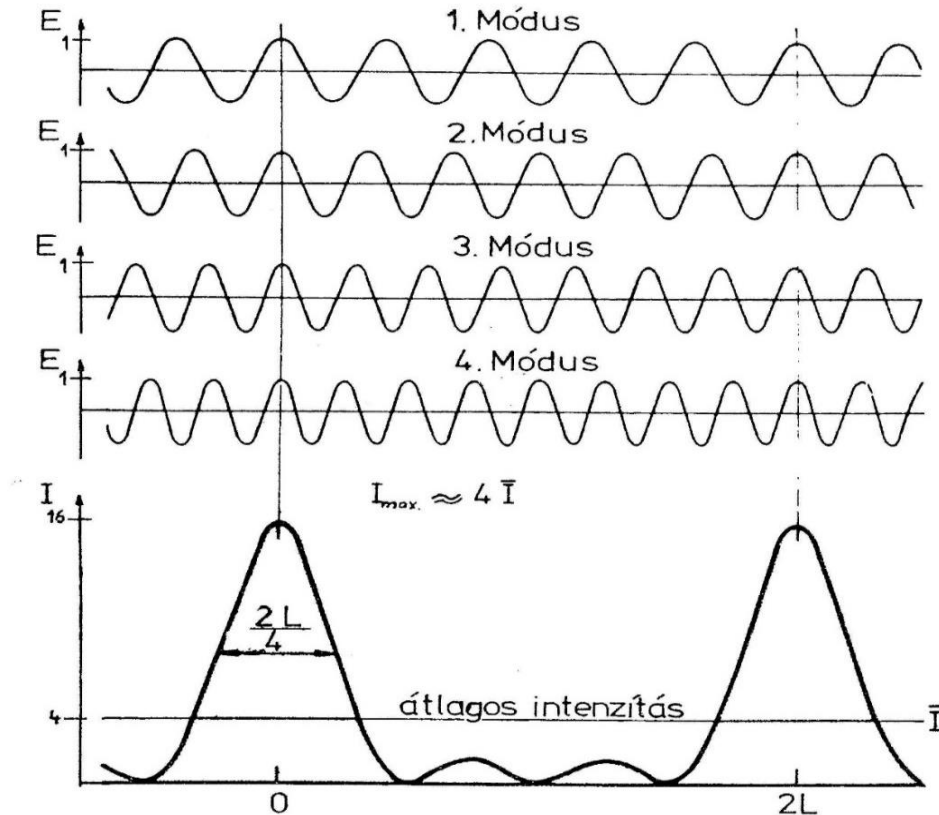
A Bragg-celláról később még lesz szó!

Passzív Q kapcsoló



- **Passzív Q – kapcsoló: telítődő abszorbens (festékoldat kivilágosodása nagy intenzitásnál)**
- Kis intenzitásnál a festékoldat fényáteresztése állandó értékű (T_0). Bizonyos intenzitásszint felett az oldat transzmissziója rohamosan nőni kezd és megközelíti a $T=1$ -et.
- A kivilágosodás oka: kis intenzitásnál a gerjesztett állapotú molekulák száma (n_2) elenyésző az alapállapotúakhoz (n_1) képest, tehát dominál az abszorpció. Nagy intenzitásnál viszont $n_2 \approx n_1$, tehát az indukált emisszió egyensúlyba kerül az abszorpcióval.

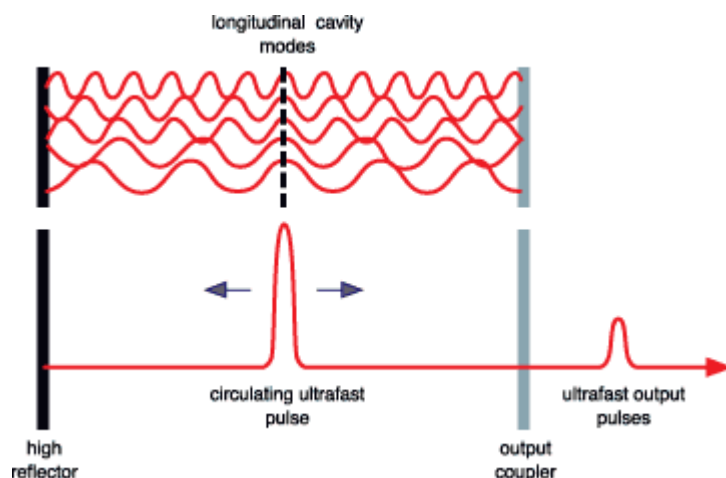
Módusszinkronizáció: A longitudinális módusok szinkronizálása



$n \cdot (\lambda/2) = L$ (rezonátor hossz)
Szomszédos longitudinális
módusok, ha $n' = n+1$

Négy szinkronizált lézermódus
eredő intenzitása egy adott
pillanatban, a tér különböző
pontjaiban (egy egyenes mentén).
A kezdőpontban minden
módusnál éppen hullámhegy van.
Ez az állapot $2 \cdot L$ távolságban
megismétlődik. A csúcsintenzitás
a négy módus átlagintenzitásának
négyeszerese, az intenzitás-
maximum térbeli szélessége
 $2 \cdot L/4$.

Módusszinkronizáció/2



Általában a módusok fázisai össze – vissza vannak. Sok módus esetén a maximumok nem esnek mind egybe. Hogy egybe essenek szinkronizálni kell őket.

Az n szinkronizált módust összeadva az intenzitás maximum szélessége $2 \cdot L/n$.

Pl.: $L=20 \text{ cm}$ $n=100$

$$\Delta x = 2 \cdot 20 / 100 = 4 \text{ mm} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\Delta t = \Delta x / c = 4 \cdot 10^{-3} / 3 \cdot 10^8 = 4/3 \cdot 10^{-11} \text{ s} = 13 \text{ ps}$$

Minél több a módus, annál rövidebb az impulzus. Tehát széles erősítési görbe (titán-zafír lézer) és/vagy hosszú rezonátor (szállézer) kell!!!

Hogy lehet a módusokat szinkronizálni?

A lézert tápláló teljesítményt (vagy a Q-t) moduláljuk $2L/c$ periódus idővel (pontosan kell!). Ez aktív! Lényegében egyetlen impulzus „pattog” oda-vissza a lézerben.

Passzív módusszinkronizáció kivilágosodó festékekkel.

Ezt a kettőt együtt alkalmazzák!

A (szegedi) szuperlézer

- Az Extreme Light Infrastructure (ELI) egy tervezett európai uniós „kutatási nagyberendezés”, ami nagy energiájú lézerekkel foglalkozna. A létesítmény **exawatt-osztályú (10^{18} wattos) lézerével a relativisztikus hatások figyelembe vételével 10^{23} W/cm² intenzitás** is elérhető majd, ami a 2010-ben létező legnagyobb lézernél három nagyságrenddel nagyobb teljesítménysűrűséget jelent.
- Az Irányító Testület 2009. október 1-jén, Prágában úgy döntött, hogy Csehország, Magyarország és Románia közösen valósíthatja meg az ELI elosztott infrastruktúráját. Ez az első alkalom, hogy egy nagy, közös kutatóintézet új EU-tagországokban épülhet meg.
- A három tagországnak 2015 végére kell létrehozni a tudományos projekt három pillérét: az **attoszekundumos impulzusokkal** Magyarországon (**Szegeden**) foglalkoznak, a nagy teljesítményű másodlagos forrásból történő, másodpercenként akár tízszer „tüzelő” beamline Csehországban, **Prágában** épül majd, Romániában, **Bukarestben** pedig fotonukleáris kutatóközpont épülne, a nagy teljesítményű lézerek magfizikai alkalmazásainak vizsgálatára.

Fizika

A csúcsteljesítmény **10^{18} W** lesz.

Magyarország elektromos energia termelése max. kb. $5 \cdot 10^9$ W, a viláé is csak 10^{12} W nagyságrendű.

Hogy is van ez???

Ez a teljesítmény csak kb. 100 as-ig (10^{-16} s) fog fennállni, és mondjuk másodpercenként 100 impulzus lesz, az átlagteljesítmény mindössze 10 kW lesz.

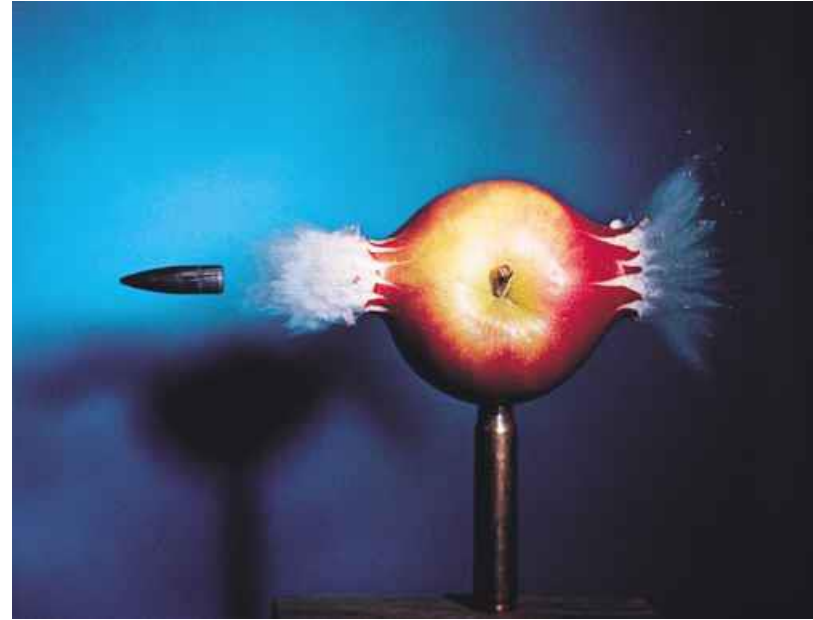
A vizsgált jelenségek szempontjából csak a csúcsteljesítmény számít!

Ha a csúcsteljesítmény (10^{18} W) egy másodpercig fennállna, az valóban elegendő lenne egész Szeged megolvasztására.

Fizika

Nehéz 100 as (10^{-16} s)
elképzelése is!!!

A híres alma átlövéses kísérlet
expozíciós ideje 10^{-6} s lehet



Ennél **10 milliárdszor rövidebb** időről van szó. Ez alatt a fény csak néhány atomnyi távolságra jut el (a hajszál vastagságának ezredrészére).

Másképpen: a 100 as úgy viszonyul az 1 μ s-hoz, mint az 1 s az emberi élet hosszához.

Ilyen expozíciós idő kell az atomi elektron „mozgásának” (pl. egy kémiai kötés kialakulási folyamatának) a „lefényképezésére”.

Nehezebb megmérni, mint létrehozni (Krausz Ferenc).

A szegedi szuperlézer épületei

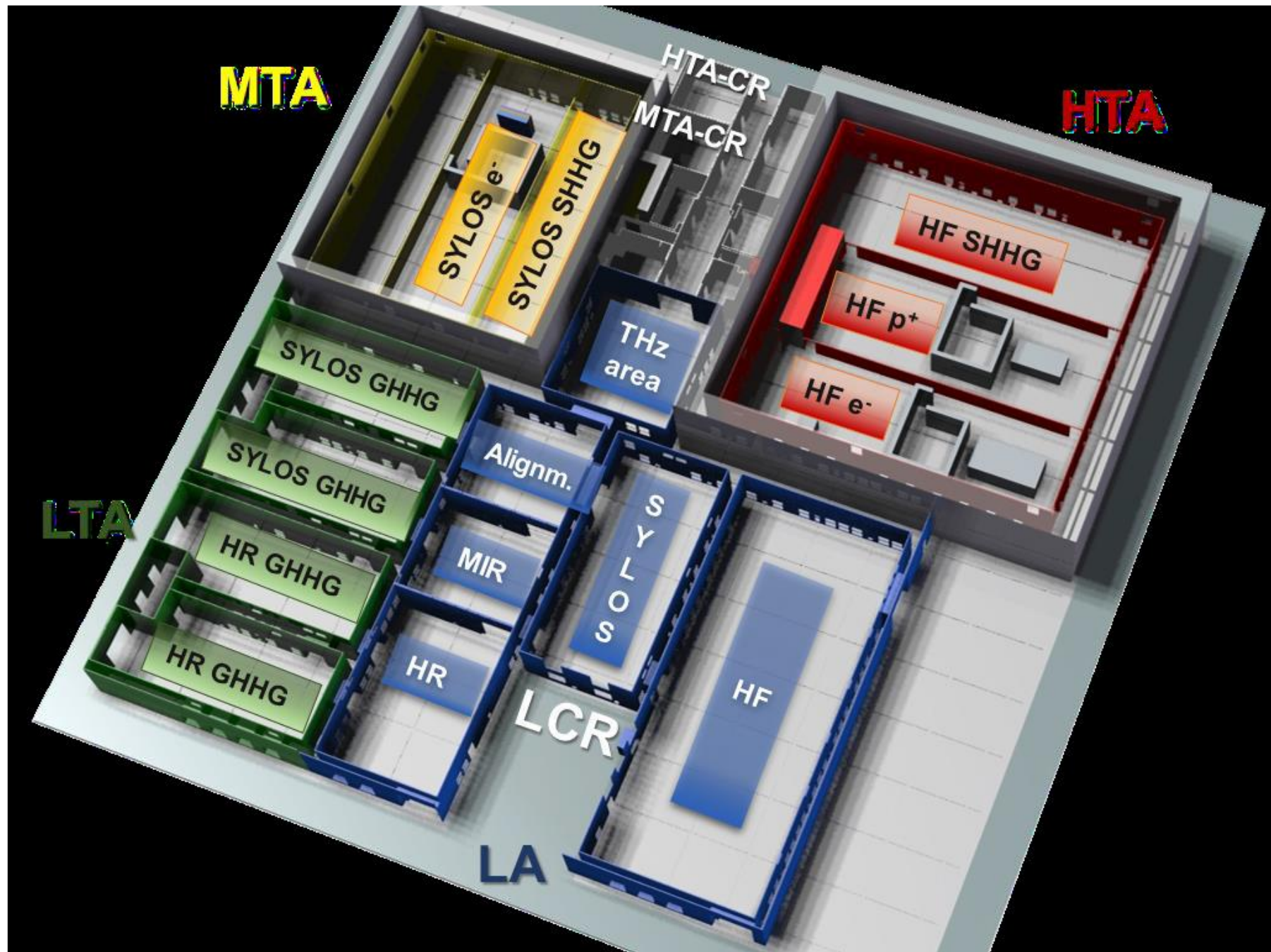
ELI ALPS

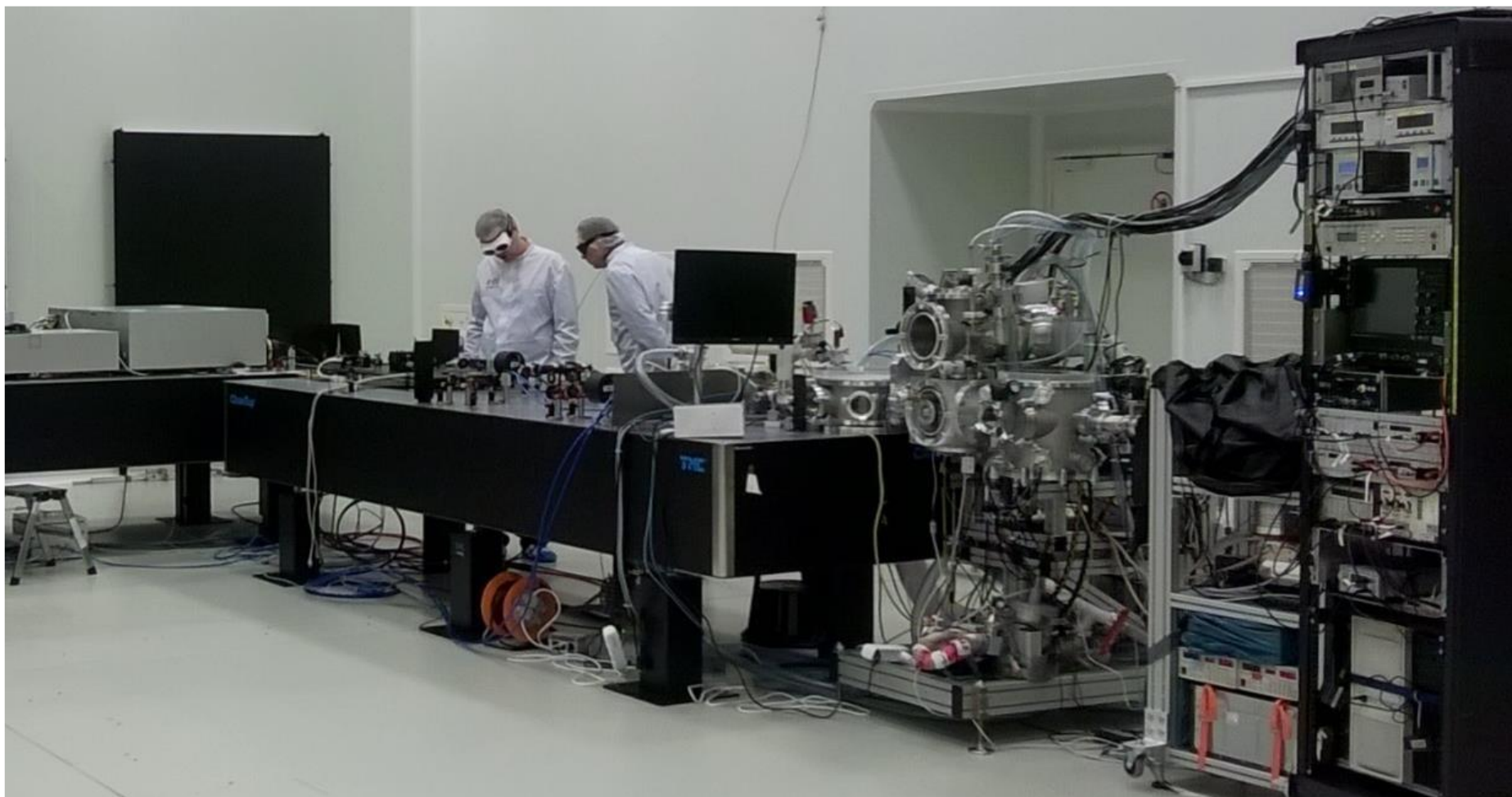
Attoseconds Light Pulse Source



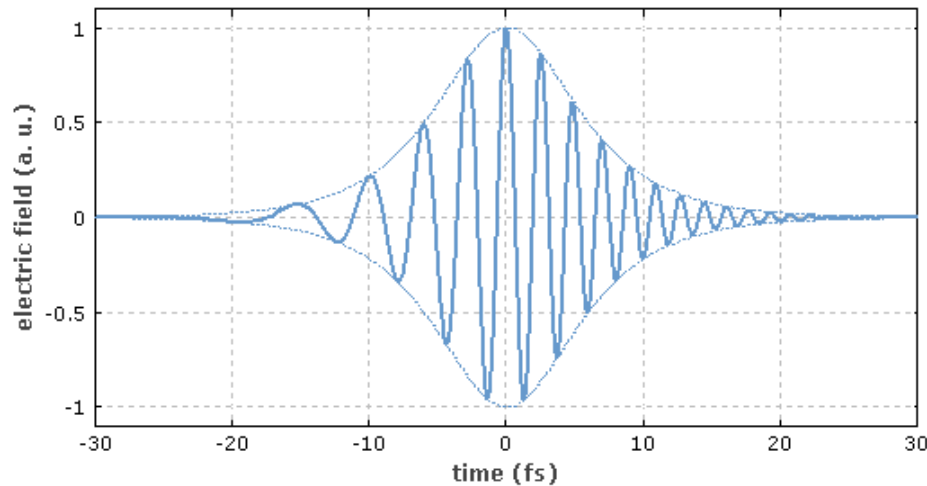
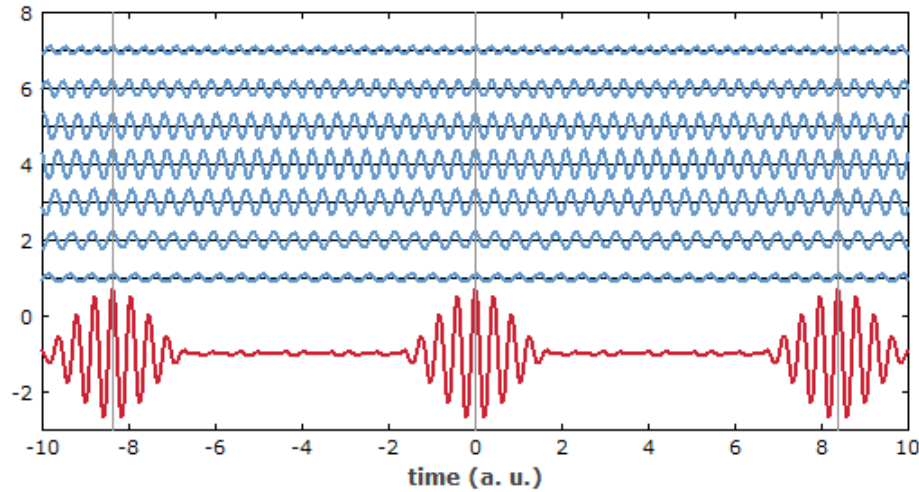






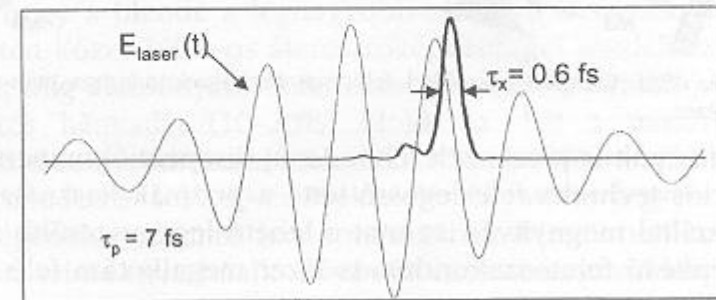
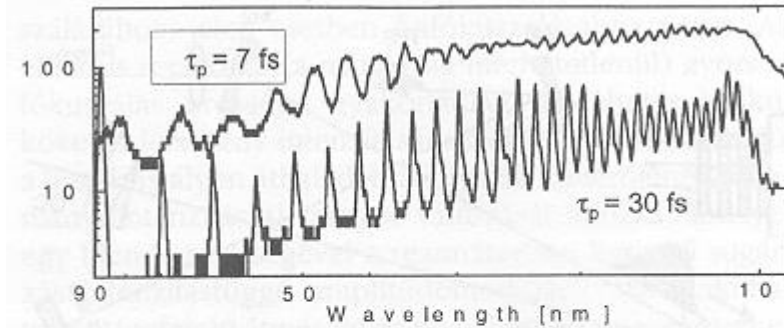


A szegedi szuperlézer

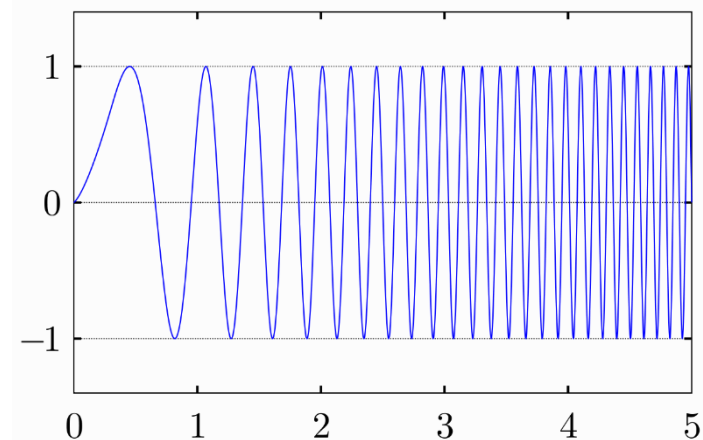
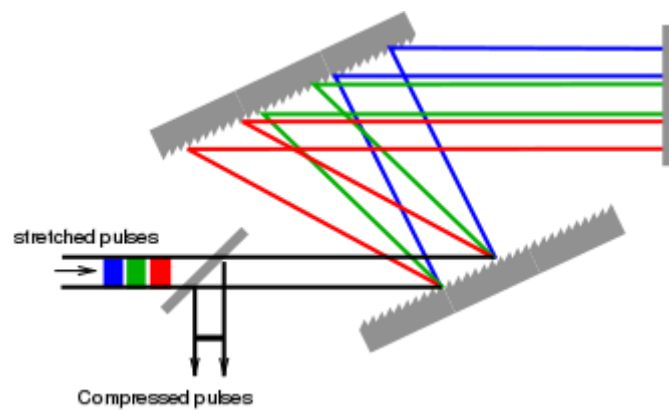
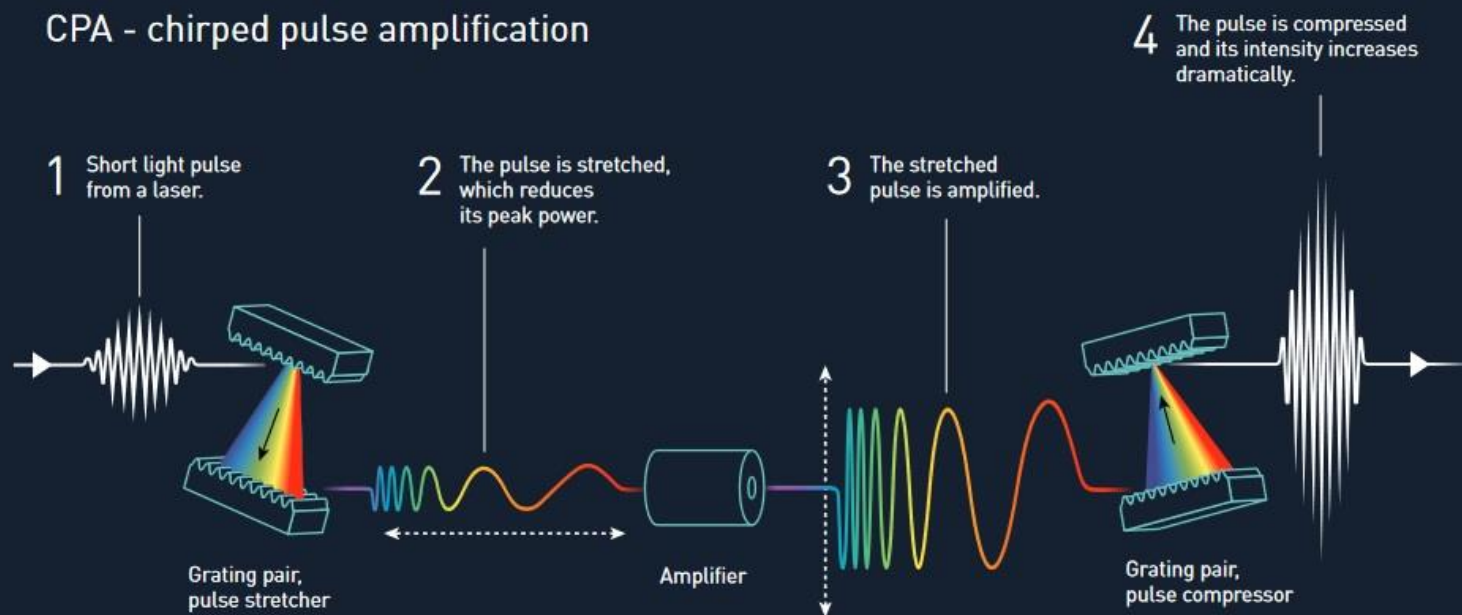


Kulcsszavak a működési elvhez:

- Módus szinkronizáció
- Csörpölés
- Magas felharmonikus keltés



CPA - chirped pulse amplification

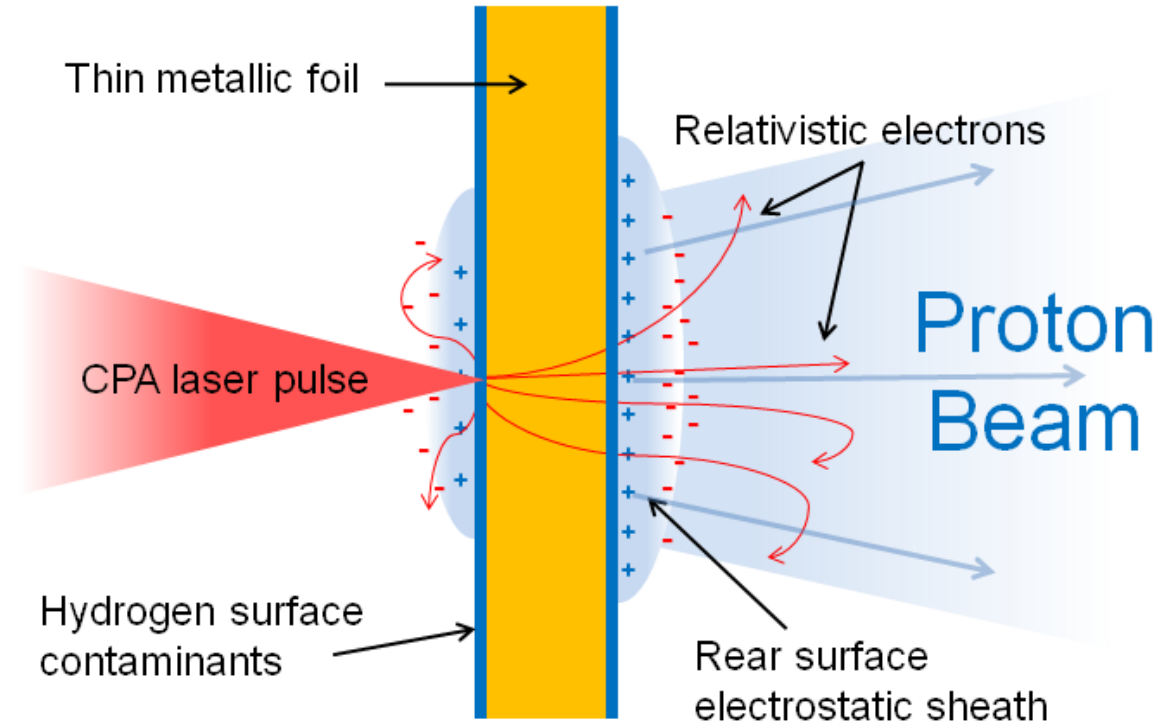




A Svéd Királyi Tudományos Akadémia bizottságának indoklása szerint Ashkin az optikai csipeszek megalkotásáért és az eszközök biológiai rendszerekben való alkalmazásáért, Mourou és Strickland pedig a nagy intenzitású, ultrarövid lézerimpulzusok létrehozásának kidolgozásáért részesül a legrangosabb tudományos elismerésben.

Donna Strickland a 3. nő, aki Nobel-díjat kapott fizikából.



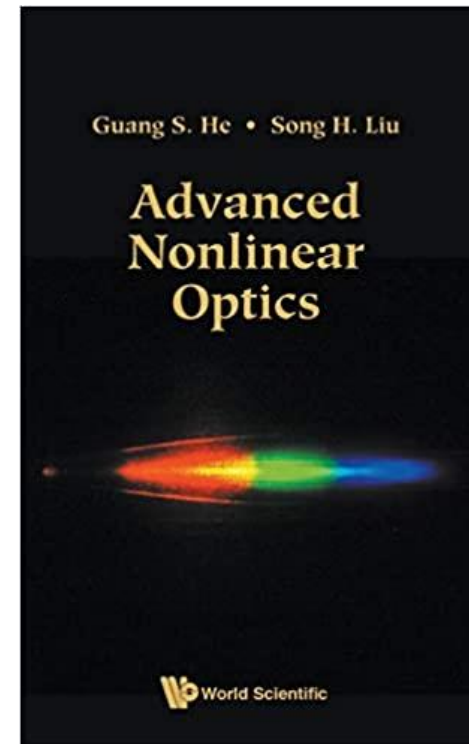
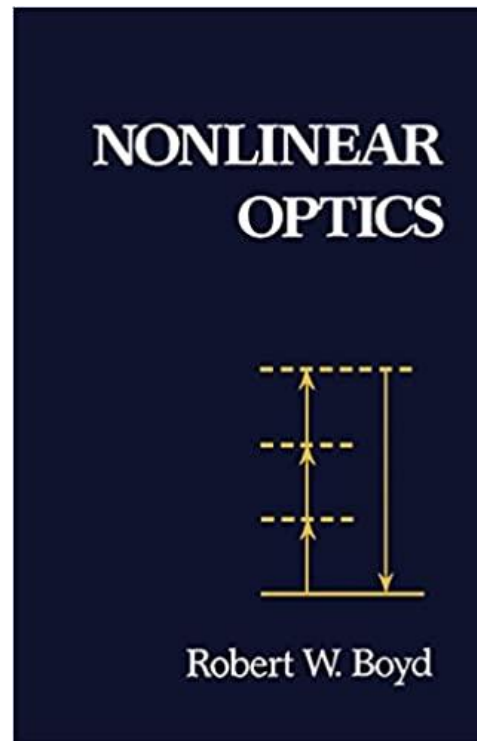


Osvay Károly

Lézeres neutronforrás – egy lehetséges út a hatékony nukleáris transzmutátor felé

A nemlineáris optika alapjai, a frekvencia kettőzés

A nemlineáris optika (NLO) az optika azon területe, ami a fény viselkedését írja le nemlineáris közegben, tehát olyan közegben, amiben a polarizáció nemlineárisan függ a fény elektromos mezőjétől. Ez a nemlineáriság általában nagy fényintenzitás esetén figyelhető meg, tipikusan lézer-impulzusoknál. Az előző részben tárgyalt passzív Q kapcsoló is egy nemlineáris optikai effektuson alapul, hisz a festék transzmissziója intenzitás-függő.



A nemlineáris optikai jelenségek bevezetése

1, A közeg tulajdonságai alapján

Az anyagok elektromos és mágneses tulajdonságait az $\vec{E}-\vec{D}$ és $\vec{B}-\vec{H}$ vektorok közötti kapcsolatok írják le. Ezen kapcsolatok rendkívül változatos módon függenek az anyagi minőségtől. A legtöbb anyag csak akkor mutat elektromos és mágneses tulajdonságokat, ha azt külső mezőbe helyezzük.

Kivételt képeznek ez alól a ferroelektromos és ferromágneses anyagok.

Az anyagok nagy részénél a dipólusmomentum sűrűség nulla, mivel a $\vec{p}_n$ atomi dipólusmomentumok minden irányban egyforma súllyal mutatnak, így

$$\sum_n \vec{p}_n = \vec{0}$$

Ha viszont az anyagot külső mezőbe helyezzük, a közeg dipólusait saját irányába igyekszik befordítani. Az így keletkező polarizáció az anyag belsejében izotróp esetben arányos az adott helyen fellépő elektromos térerősséggel:

$$\vec{P} = \epsilon_0 \chi \vec{E}$$

ahol ϵ_0 a vákuum permittivitása, χ neve pedig elektromos szuszceptibilitás, itt mindkettő skalár mennyiség. Ezt az összefüggést, mint közelítőleg érvényes anyagi egyenletet, az elektrodinamikai tanulmányok során már megismertük. Ebben **az eddig használt** közelítésben tehát az anyag polarizációja az azt létrehozó térerősségnek lineáris függvénye, az erre épülő (és eddig tanult) optika a **lineáris optika**.

1, A közeg tulajdonságai alapján (folyt.)

Ez azonban az anyagi egyenletnek csak egy közelítése. Ha ennél nagyobb pontosságra van szükség, akkor az anyagi egyenletnek egy általánosabb formáját kell választani. Ha csak a nagyságokat tekintjük (az irányt nem):

$$P = \alpha_1 E + \alpha_2 E^2 + \alpha_3 E^3 + \dots$$

Az anyagok döntő többségére, nem szélsőségesen nagy térerősségekre igaz, hogy:

$$\alpha_1 E \gg \alpha_2 E^2 \gg \alpha_3 E^3 \gg \dots$$

Tehát a lineáris közelítés ebben az esetben kielégítő ($P = \alpha_1 E (= \epsilon_0 \chi E)$).

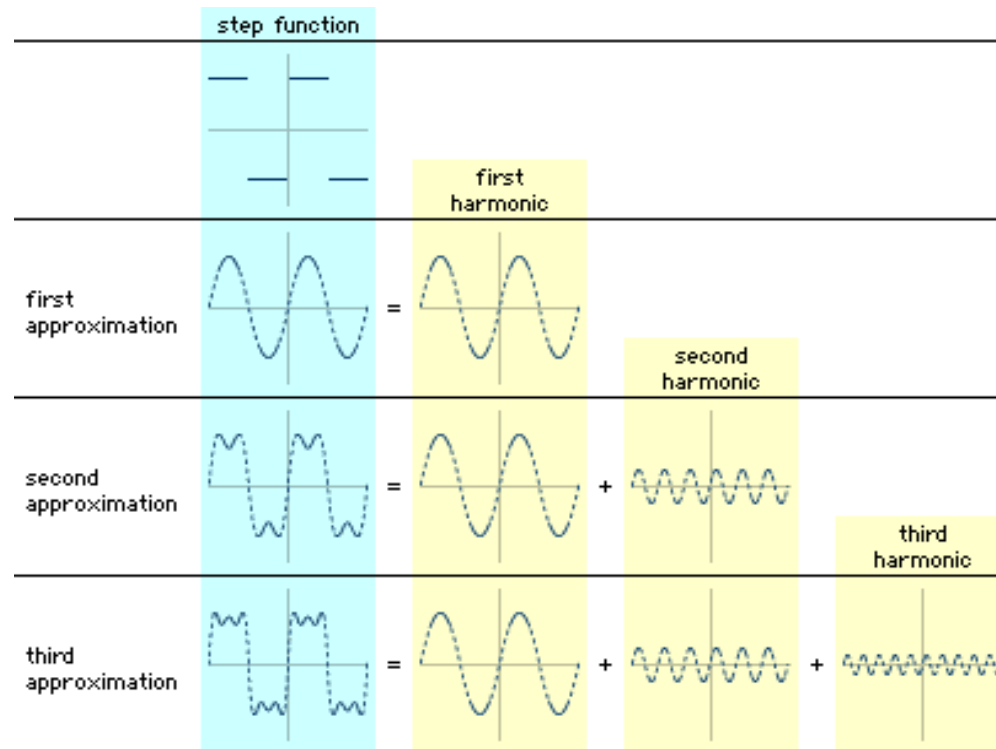
Különleges anyagokra, különösen nagy térerősségek esetén azonban **a magasabb fokszámú tagok sem hanyagolhatók el**, ez az eset a **nemlineáris optika**.

A lineáris optika határait éppen csak átlépve az $\alpha_1 E$ mellett először az $\alpha_2 E^2$ lesz nem elhanyagolható nagyságú. Tekintve, hogy a hullámban $E = E_0 \cos \omega t$ és $\cos^2 \omega t = 1/2 (\cos 2\omega t + 1)$, a nemlineáris optikában szükségképpen megjelennek a hullám felharmonikusai (jelen esetben a kétszeres frekvenciájú).

2, A rezgések amplitúdója alapján

A kis amplitúdójú rezgések mindig harmonikusak ($y=A \cos \omega t$), mert az egyensúlyi helyzet közvetlen környezetében történnek, ahol az erőtvény lineárisan közelíthető.

Nagy amplitúdójú rezgések esetén kilépünk ebből a tartományból és megszűnik a rezgések tisztán harmonikus jellege. Ez pedig azt jelenti, hogy a rezgést leíró periodikus függvény sorfejtésében megjelennek a felharmonikusok, először a kétszeres frekvenciájú ($y=A \cos 2\omega t$).



3, A kvantumelmélet fotonképe alapján

A kvantumelmélet szerint egy $E1 \rightarrow E2$ gerjesztés egyetlen fotonnal történik, amelyre fönáll a $E2 - E1 = hf$ összefüggés.

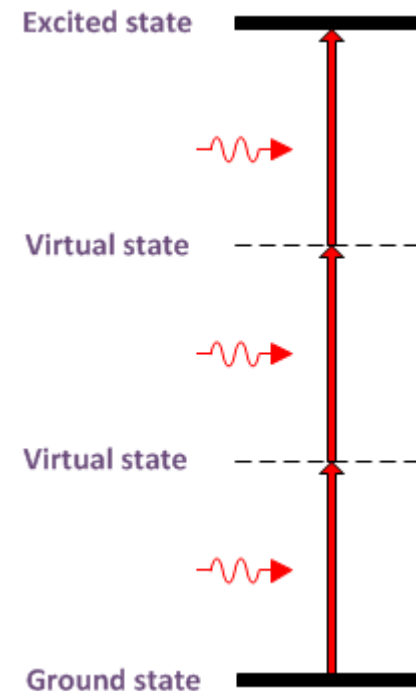
Magasabb rendű közelítésekben ezt két fele ekkora energiájú foton is képes megtenni. Ennek a valószínűsége „hétköznapi” intenzitások mellett azonban elhanyagolható.

Lényegessé válhatnak viszont igen nagy intenzitásokon, tekintve hogy a kétfotonos folyamatok valószínűsége az intenzitás négyzetével arányos.

Még nagyobb intenzitásokon a sokfotonos folyamatok is lényegesek lehetnek.

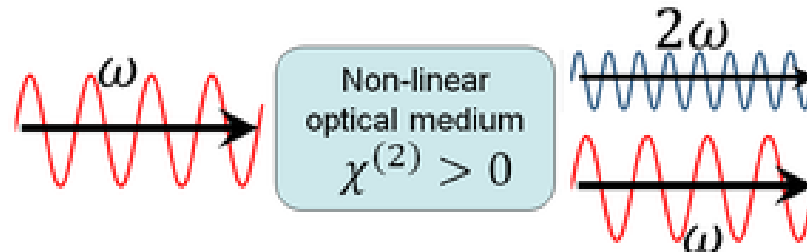
A lehetséges nemlineáris optikai jelenségek:

- a, 1 db lézer fényének frekvencia kettőzése
- b, 2 db lézer fényének frekvencia összeadása
kivonása
- c, 1 db lézer fényének frekvencia kettéosztása,
frekvencia felezése



Frekvencia kettőzés és kettőstörés

- Probléma: keletkezik ugyan 2ω körfrekvenciájú hullám, de igen kicsi (ezrelék nagyságrendű) az intenzitása
- Miért? Mert a diszperzió miatt (amely szerint a hullám terjedési sebessége frekvencia-függő) a 2ω körfrekvenciájú hullám lemarad (vagy siet) az ω körfrekvenciájú hullámtól, azaz a 2ω körfrekvenciájú hullám pótlása nem jó fázisban érkezik
- Megoldási javaslat: el kell érni, hogy a diszperzió ellenére a nemlineáris optikai anyagban tartósan haladjon együtt az ω és a 2ω körfrekvenciájú hullám
- Hogyan? A kettőstörés segítségével. A kettősen törő kristályokban, megfelelő kristálytani irányokban a kétféle polarizációs irányú fény (ordinális és extraordinális sugarak) más sebességgel terjed. Indukált kettőstörés esetén ez szabályozható is.
- A diszperzió miatti fénysebesség eltérést az indukált kettőstöréssel ki lehet kompenzálni, ezáltal a keltett 2ω körfrekvenciájú hullám az eredeti ω körfrekvenciájúval tartósan együtt tud haladni (a keltett 2ω körfrekvenciájú hullám mindig jó fázisban kapja az utánpótlást). Például $n_o(2\omega) = n_{eo}(\omega)$, azaz a 2ω frekvenciájú ordinális és az ω frekvenciájú extraordinális hullámra a törésmutató éppen megegyezik.

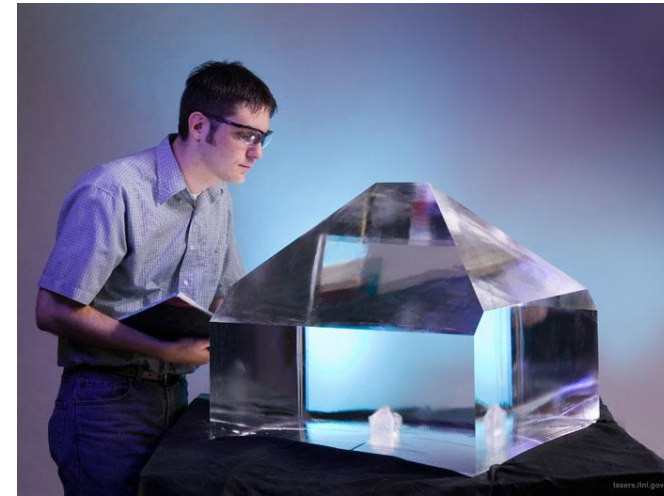
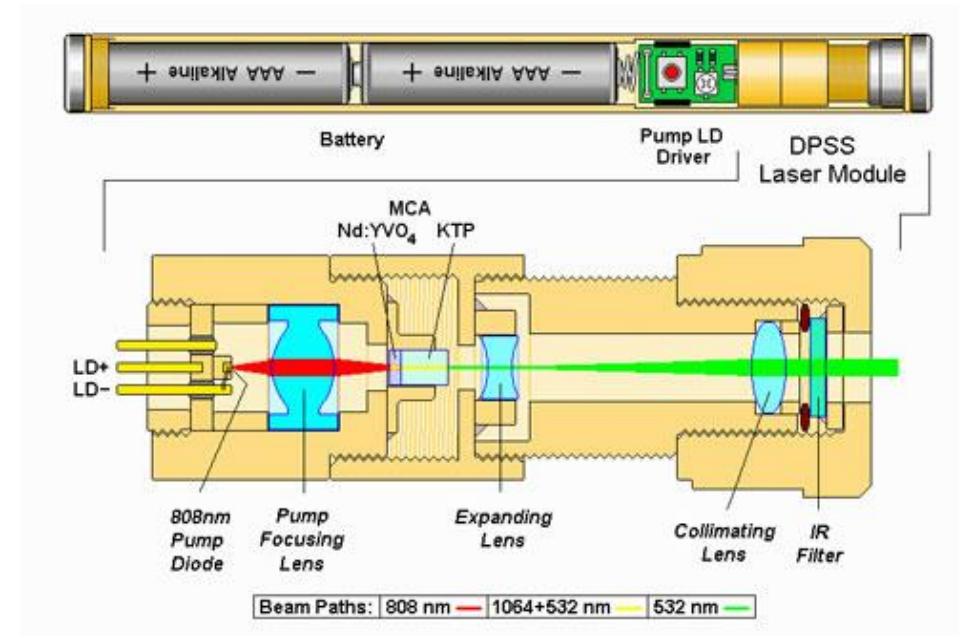


Néhány nemlineáris optikai anyag

KTP: kálium titanil foszfát
kristályokkal teszik át a lézerfényt az
infravörösből a láthatóba(2ω) a
lézerpointerben ($\lambda=532\text{nm}$) (fent)

KDP (kálium dihidrogén foszfát)
kristályokkal teszik át a lézerfényt az
infravörösből az ultraibolyába (3ω) a
NIF berendezésében ($\lambda=354\text{nm}$) (lent)

Lithium niobate (LiNbO_3) lítium-niobát
Piezoelektromos szenzorok, optikai
modulátorok



Ellenőrző kérdések

Tételezzük fel, hogy egy $L=1,5\text{m}$ -es lézer 100 db szomszédos, egyenként 1mW állandó intenzitású longitudinális módusát összeszinkronizáljuk! Milyen lesz az így előálló lézerfény?

- a) 10 ns-onként $0,1\text{ ns}$ -os lézerimpulzusok 10W csúcsintenzitással
- b) egy 100 mW állandó intenzitású lézerfény
- c) 10 ns -os lézerimpulzusok 100mW csúcsintenzitással
- d) 10 ns -onként $0,1\text{ ns}$ -os lézerimpulzusok 100mW csúcsintenzitással

Párosítsuk össze a rövid lézerimpulzusok keltésével kapcsolatos állításokat, eszközöket, módszereket!

- | | |
|-------------------------------|---|
| 1) Módusszinkronizáció | a) fény hatására telítődő abszorbens |
| 2) Bragg-cella | b) széles erősítési görbájú lézerek (pl. a titán-zafír lézer) |
| 3) Passzív Q-kapcsoló | c) akusztó-optikai Q-kapcsoló |
| 4) Magas felharmonikus keltés | d) igen rövid (attoszekundumos) impulzusok keltése |

Megoldás: 1b, 2c, 3a, 4d