

# A lézer és főbb tulajdonságai

2009. szeptember 16.

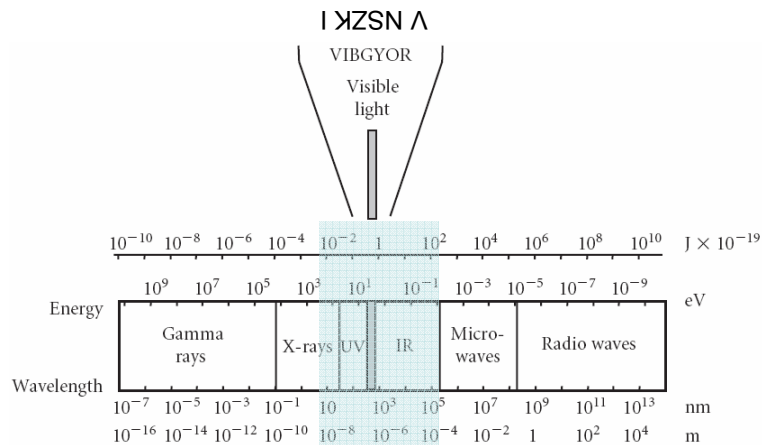
## LASER

**L**ight  
**A**mplification by  
**S**timulated  
**E**mission of  
**R**adiation

Hundreds of materials are able to lase (including exotic ones, like whisky, Chinese tea, or a gas cloud near Eta Carinae) utilizing more than 15000 transitions.

However, commercial lasers are practically limited to about 40 active media.

# Generation of laser light



The electromagnetic spectrum (UV: ultraviolet, IR: infrared)

atom: electronic transitions ( $\sim 1\text{eV}$ , narrow)

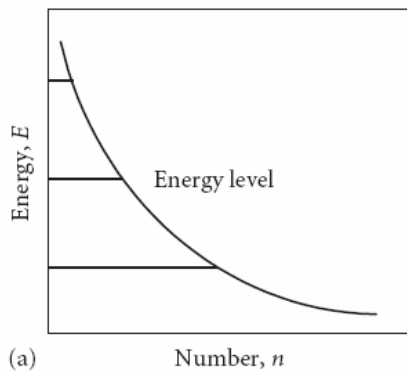
molecule: + vibrational ( $\sim 0.1\text{eV}$ ) and rotational levels ( $\sim 0.01\text{eV}$ )

condensed phases (liquids, solids): interaction  $\rightarrow$  levels broaden to bands

## Population

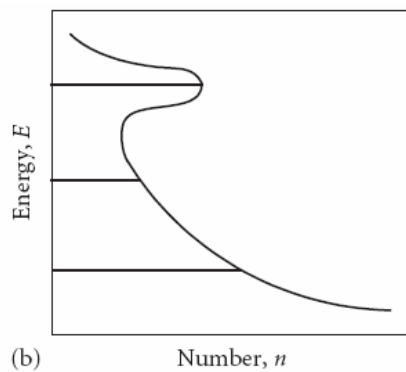
Population = distribution of species among the possible energy levels

NORMAL



Maxwell-Boltzmann  
occurs naturally  
thermodynamic equilibrium

POPULATION INVERSION



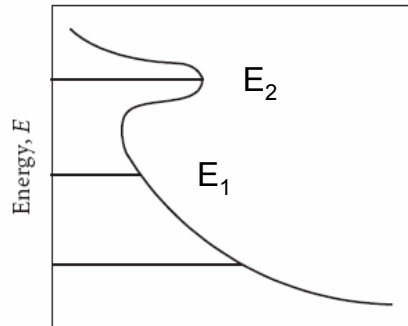
artificial  
driving force for energy release

1<sup>st</sup> prerequisite for laser light generation  
 $\pi(E_2) > \pi(E_1)$

# Excitation

The way how population inversion is achieved.

electrical (best suited for gases), optical (mainly used for solids),  
chemical



(b) Number,  $n$

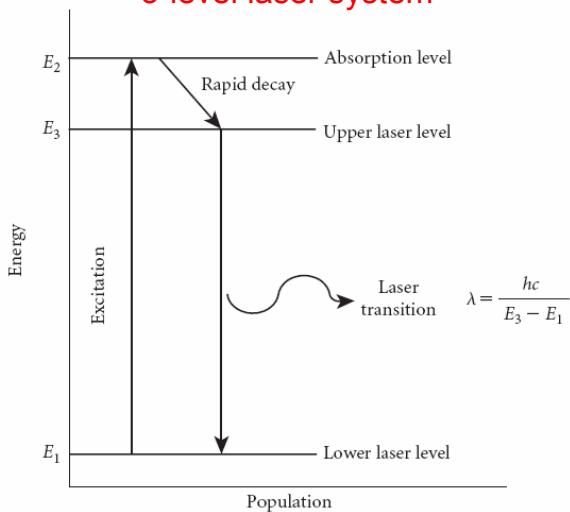
prerequisite for laser light generation

$$\pi(E_2) > \pi(E_1)$$

## Energy level systems

In principle, a 2-level system is enough for lasing (and diode lasers are actually based on this scheme), but 3- and 4-level systems are more practical.

### 3-level laser system

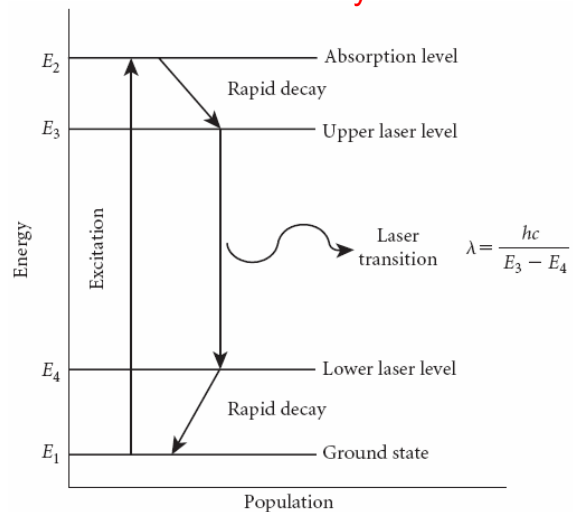


Conditions to fulfill:

large excitation threshold  
high probability of  $E_3 \rightarrow E_1$   
 $\tau(E_3) > \tau(E_1)$

pulsed

### 4-level laser system



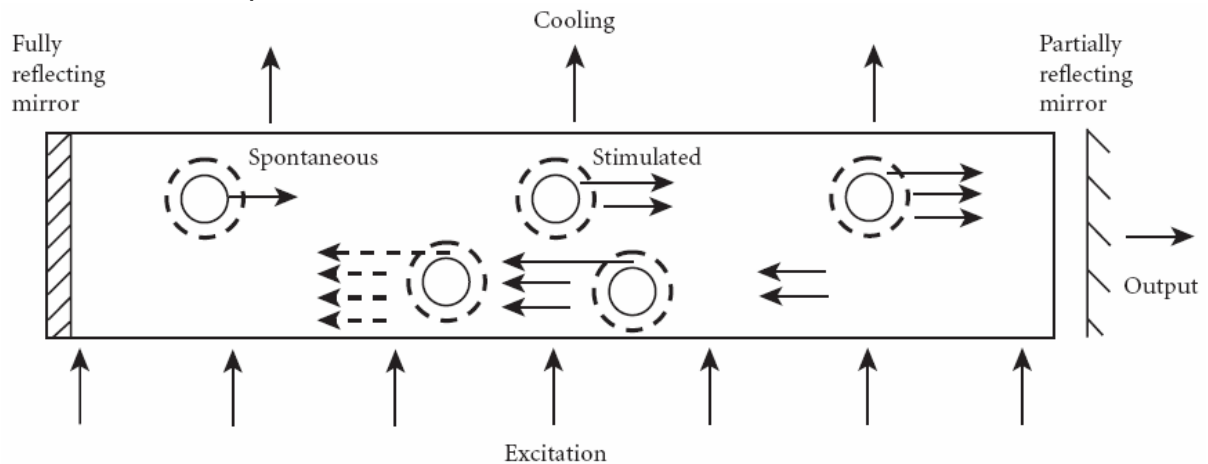
Conditions to fulfill:

smaller threshold  
high probability of  $E_3 \rightarrow E_4$   
 $\tau(E_3) > \tau(E_4)$

also cw

# Light amplification

Requires a third type of interaction between light and matter:  
absorption, emission + STIMULATED EMISSION



Amplification takes place in an optical cavity

gain, threshold gain, unsaturated gain, saturated gain, losses  
it is the circulating (and hence the output) power that affects the gain  
(the gain is independent of the excitation power)

positive gain is the 2<sup>nd</sup> prerequisite for laser light generation

# The laser output

stimulated emission -> **directional** and **phase matched** release of another photon

The laser light is therefore  
coherent  
monochromatic  
has low divergence  
has high brightness

According to their output lasers can be categorized as

cw, pulsed or train of pulses  
pulse duration: 0.1s – fs  
Pulse Repetition Rate (PRR): 1-100 kHz  
average power:  $\mu\text{W}$ -kW (peak power: TW)  
wavelength: may be tunable

# Basic components of a laser

- **Active medium:**  
in which light can be amplified by stimulated emission
- **Excitation or pumping:**  
to maintain population inversion
- **Optical cavity:**  
to provide optical feedback
- **Output device:**  
to allow usable amount of light to leave the cavity

+ several practical units: power supply, control system, cooling unit ...

## Active media

**Gases:** homogeneous, can be excited electrically, allow flexibility in the design of resonators

noble gas, ions, molecules ( $N_2$ ,  $CO_2$ , CO), metal vapour (metal ion (HeCd), neutral atom (Cu-vapour)), excimer (EXCIted diMER)

**Liquids:** higher density of species than gases, broad emission bandwidth (-> wavelength tuning)

dyes (approx. 50 different)

**Solids:** allow the construction of small lasers, no need for gas handling, but the power and quality of the beam is limited

1) host/matrix material doped with ions of transition or rare earth elements (YAG, sapphire,  $CaF_2$ , silicate and phosphate glasses)

2) semiconductors (homojunction (p- and n-type III-V) and heterojunction (multilayers))

# A lézerek főbb tulajdonságai folyt.

2009. szeptember 23.

## Excitation

- **Electrical pumping**
  - DC (simple, cheap, contamination via electrode corrosion/degradation)
  - AC (upto MHz, compact resonators, benefits like RF)
  - RF (electrodes are outside the cavity, less contamination, more homogeneous discharge, but more expensive than DC, screening is necessary, low efficiency)
- **Optical pumping**
  - flash lamps (Xe, Kr, high intensity but large losses)
  - arc lamps (favoured for cw)
  - semiconductor lasers (higher pumping efficiency, novel pumping arrangements)
- **Chemical pumping**
  - reaction is often initiated by a plasma or flashlamp (photodissociation)

# Optical cavity

Optical cavity = a container bounded by 2 mirrors

it has 5 principal parameters: separation, radii of curvature and reflectivities of the mirrors

(resonator = optical cavity + excitation device + other units controlling polarization, mode, pulsing)

Mirrors reflect photons back and forth through the active medium, i.e.:  
increase the probability of stimulated emission (via residence time)  
provide feedback

Photons that are not parallel to the axis are quickly lost.  
→ low divergence

Out of phase reflections are lost through destructive interference.  
→ maintains coherence

Losses:

transmission through the output coupler  
scattering by optical inhomogeneities in the active medium  
absorption and scattering by the mirrors  
diffraction at the edge of the mirrors  
absorption in the active medium by other levels

## A stable/unstable cavity

The beam converges in a stable cavity, whereas it diverges in an unstable one.

The main advantage of a stable cavity is that it allows the generation of the fundamental (spatial) *mode*, which has standard measurable characteristics. This mode remains constant as the beam propagates. BUT it uses a limited (small) portion of the active volume → limits the power.

Advantages of and unstable cavity: The radiation is not confined to a narrow beam, i.e. filling the entire cross section of at least one of the mirrors. → larger powers; partially reflecting elements are not necessary; BUT the intensity distribution is compromised as compared to a stable cavity.

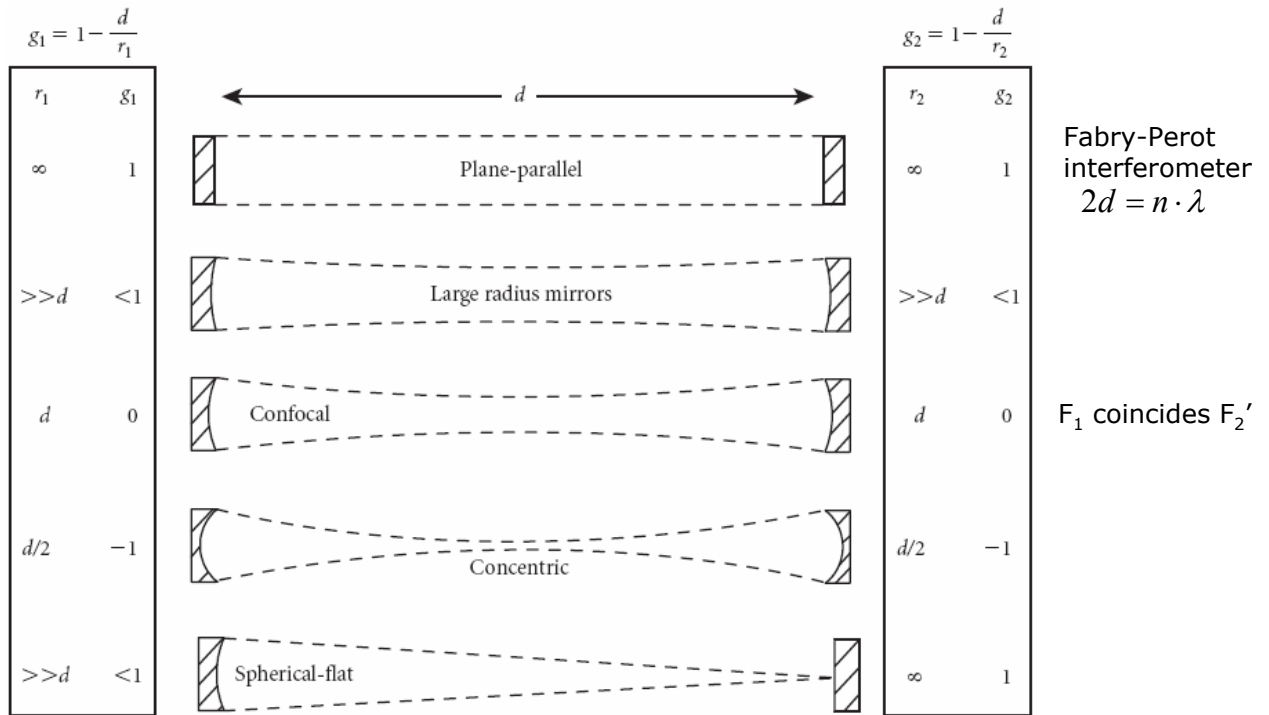
Mathematically a cavity is stable, if the centre of curvature of one mirror, or the mirror itself, but not both, falls between the other mirror and its centre of curvature.

$$0 \leq \left[ 1 - \frac{d}{r_1} \right] \left[ 1 - \frac{d}{r_2} \right] \leq 1$$

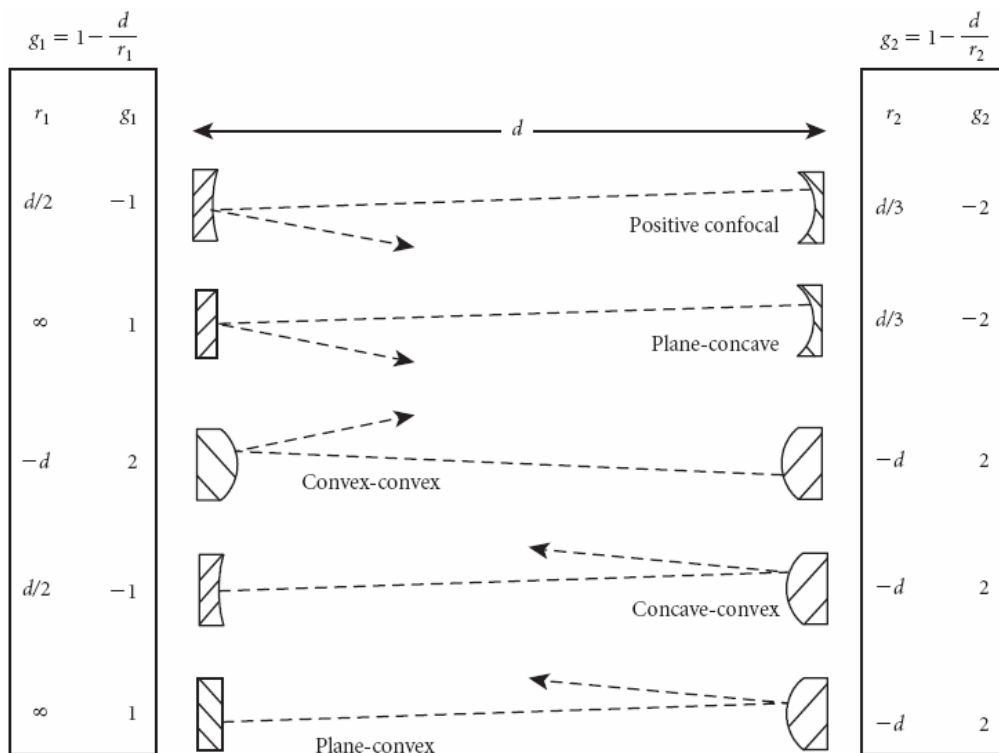
$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1$$

g: geometrical factor

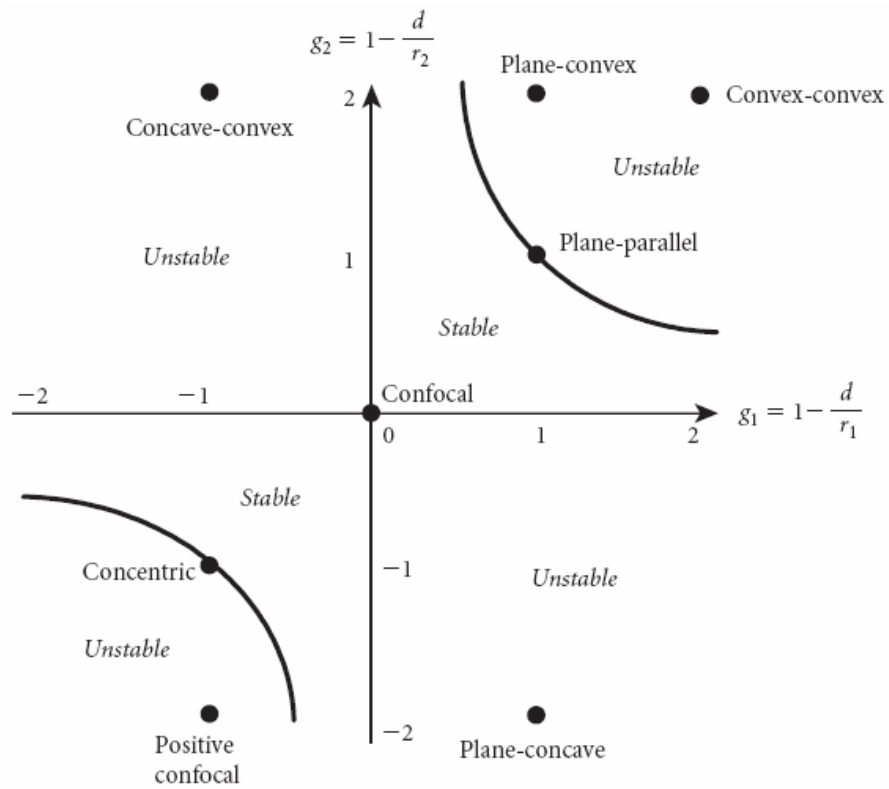
# Stable cavities



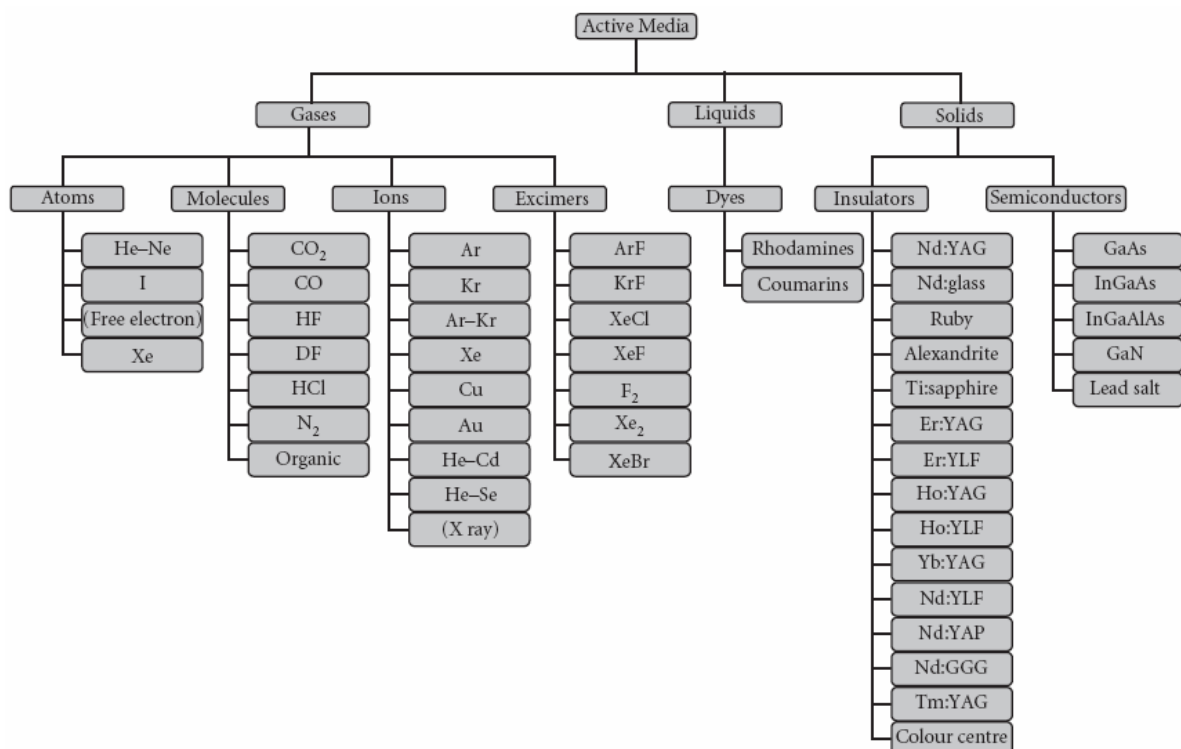
# Unstable cavities



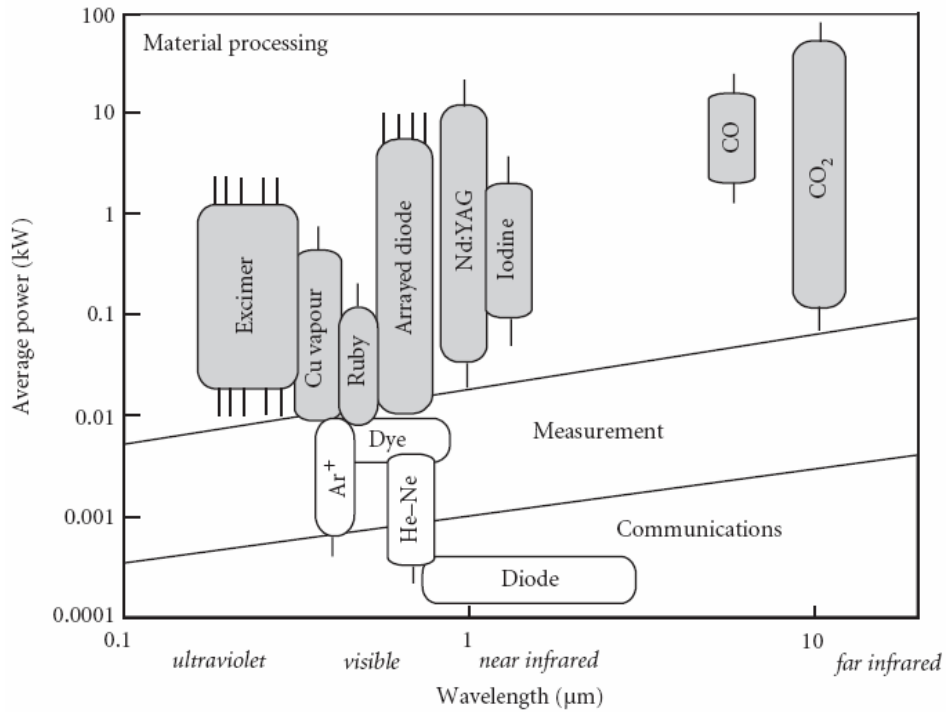




# Ipari lézerek 1/2



# Ipari lézerek 2/2



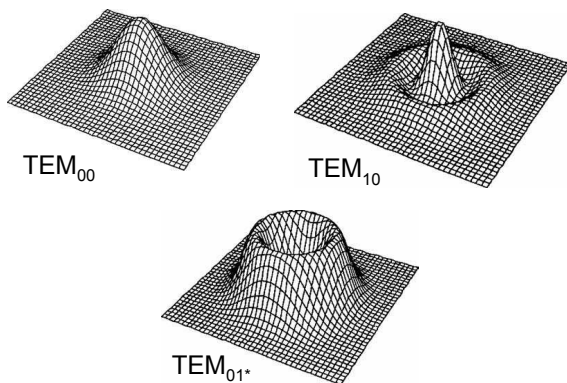
## The output

The laser light is coherent, monochromatic, has low divergence and high brightness.

### Spatial modes

longitudinal: standing wave  $\rightarrow q\lambda=2d$

transverse, TEM



		Number of radial intensity nodes, $p$		
		0	1	2
Number of circumferential intensity nodes, $l$	0			
	1			
	2			

# Temporal mode

Determined by

number of energy levels

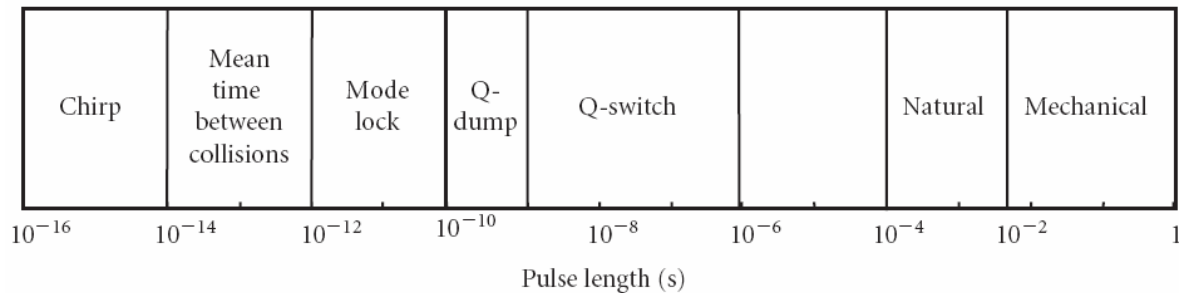
3-level pulsed

4-level continuous wave

their lifetime and

the source of excitation

Vary from fs to cw



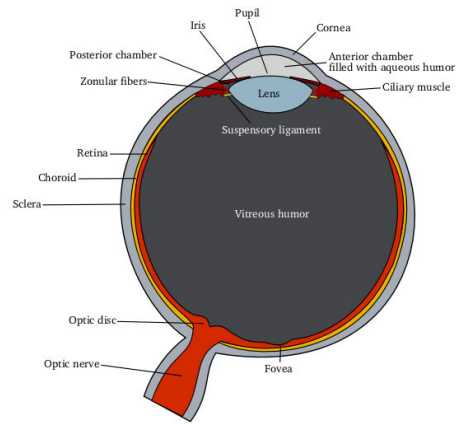
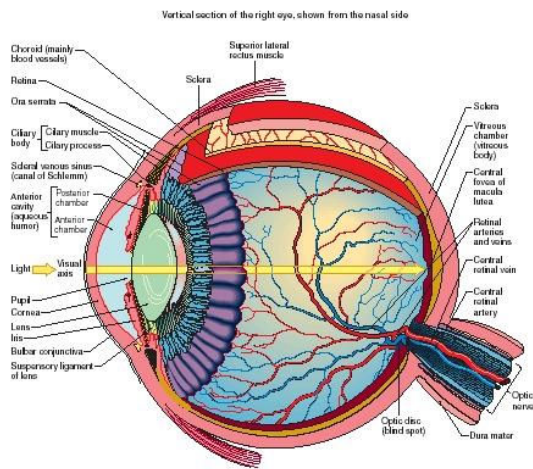
# Safety issues

Major hazards are damage to the

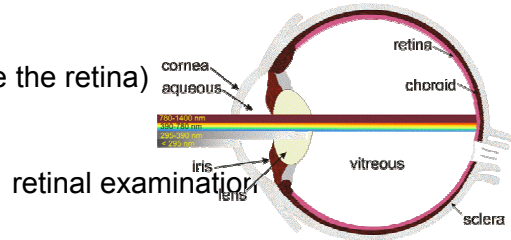
- **Eye:**
  - see next slide
- **Skin:**
  - Burns (high power IR lasers)
  - skin cancer, aging, dry skin, photosensitive reactions (all wavelengths)
- **Respiratory system:**
  - small particles ( $0.02-0.2\mu\text{m}$  -> blood)
  - poisonous vapours (esp. plastics)
  - ozone (plasma processes)
- **Electrical safety:**
  - power supplies
  - X-rays ( $U > 15\text{kV}$ )
- **Chemical:**
  - gases, fumes, dye (fire hazard)
  - compressed gases! cryogenics

# Safety, cont.

The human eye:



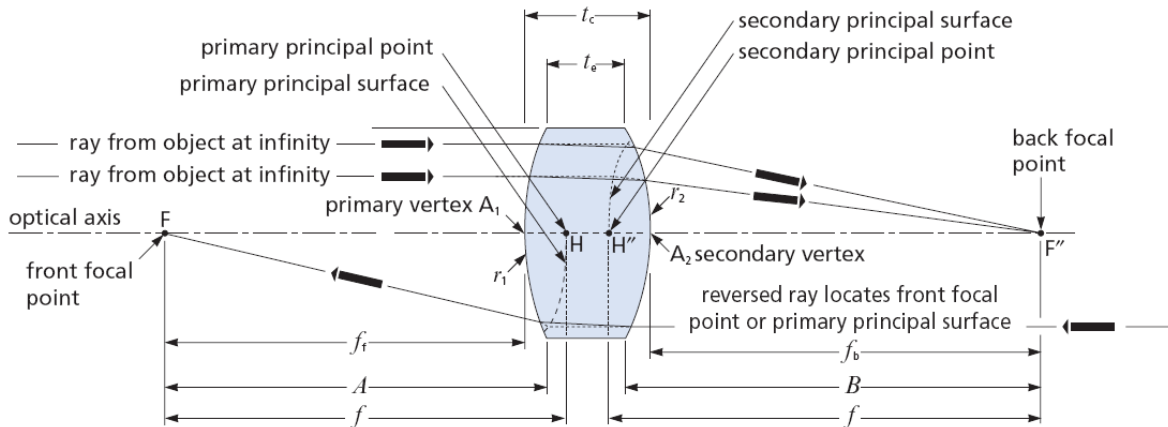
Ocular focus region: 400nm-1400nm (can damage the retina)  
Cornea: absorbs far IR and mid-UV (180-315nm)  
Lens: absorbs near-UV (315-390nm)



## Optikai elemek

# Optics

transmissive, reflective, diffractive optics  
 focal length, effective focal length, working  
 distance, etc.



[http://www.mellesgriot.com/pdf/CatalogX/X\\_01\\_29-31.pdf](http://www.mellesgriot.com/pdf/CatalogX/X_01_29-31.pdf)

# Optics

<b>larger focal length=</b>
larger depth of field
higher tolerance for surface inhomogeneity
more room, reduced chance of damage
larger spot size, lower power density

depth of field (object space) and  
 depth of focus (image space)

[http://www.mellesgriot.com/pdf/CatalogX/X\\_01\\_29-31.pdf](http://www.mellesgriot.com/pdf/CatalogX/X_01_29-31.pdf)

# Focal number

**f-number, f/#, focal ratio, relative aperture, speed**  
characterizes the focusing ability of the optics

$$f \text{ /\#} = \frac{EFL}{CA}$$

*F*: effective focal length of optic  
*d*: diameter of clear aperture

## Transmissive optics

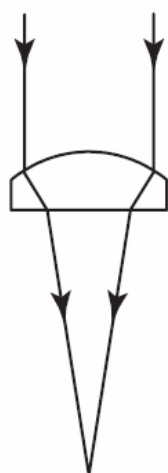
upto about 5kW (thermal lensing)  
lenses can only be cooled around its edge

far-IR	near-IR + visible	UV
ZnSe, GaAs	BK7	quartz
Ge, KCl	Pyrex, fused silica	fused silica
		MgF <sub>2</sub> , CaF <sub>2</sub>

AntiReflection coatings ( $\lambda/4$  thick single layer, refractive index is  $\sqrt{n_{\text{substrate}}}$  OR  
multilayer coatings (higher transmittance))

# Simple lenses

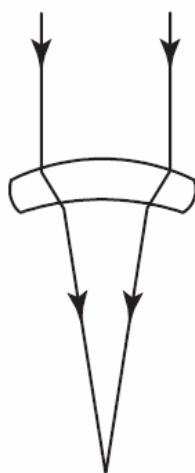
spherical aberration



(a)

plano-convex

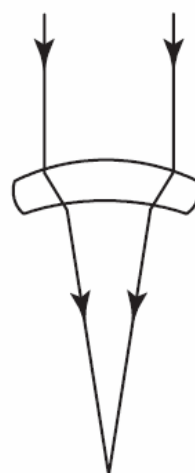
for  $f > 20\text{cm}$



(b)

positive meniscus

$25\text{cm} < f < 250\text{cm}$



(c)

aspheric

$f < 12\text{cm}$

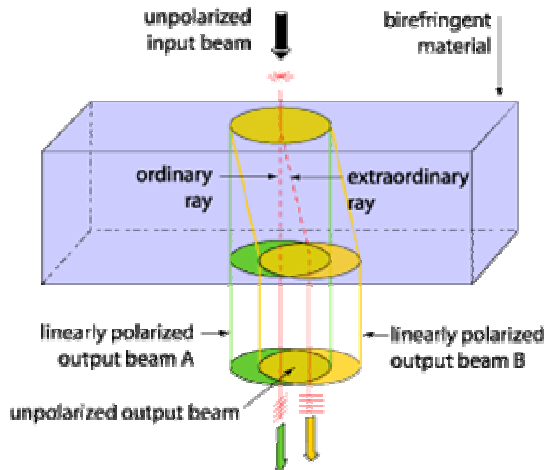
## Optikai elemek folyt.

2009. szeptember 30.

# Polarizáció 1.

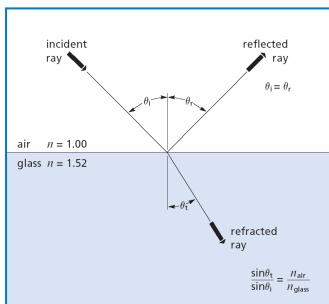
A fény polarizációs viselkedését a relatív fázisviszonyok határozzák meg.

Kettőtörő anyagokban a törésmutató eltérő az ordinárius és extraordiárius sugarakra. -> az ordinárius és extraordiárius sugarak eltérő sebességgel terjednek a közegben.



# Polarizáció 2.

Visszaverődésnél a visszavert fény mennyisége függ a közegek relatív törésmutatójától, a beesési szögtől és a beeső fény polarizációs állapotától is.



p-polarizált: az elektromos térerősség vektor a beesési síkba esik  
s-polarizált: az elektromos térerősség vektor a beesési síkra merőleges

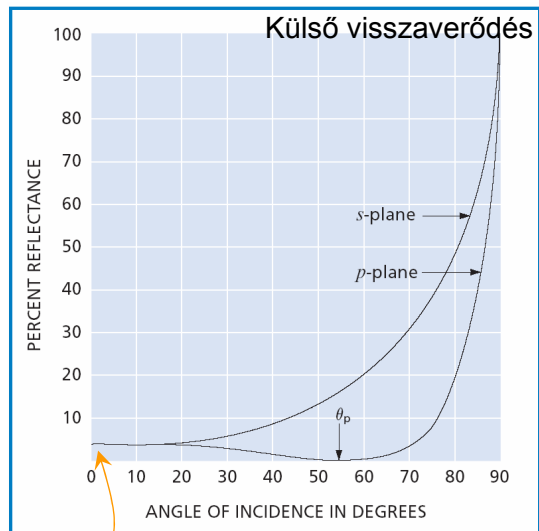
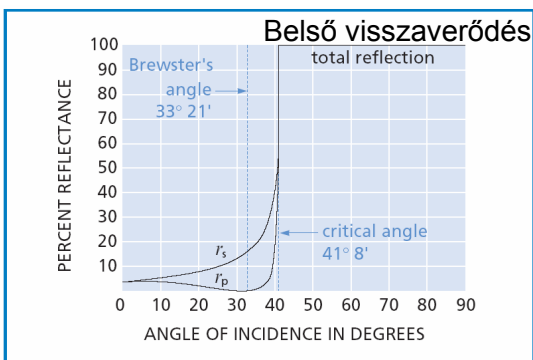
Fresnel-formulák:

$$r_s = \left( \frac{\sin(\theta_1 - \theta_2)}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} \right)^2$$

$$r_p = \left( \frac{\tan(\theta_1 - \theta_2)}{\tan(\theta_1 + \theta_2)} \right)^2$$

merőleges beesés,  
levegőben:

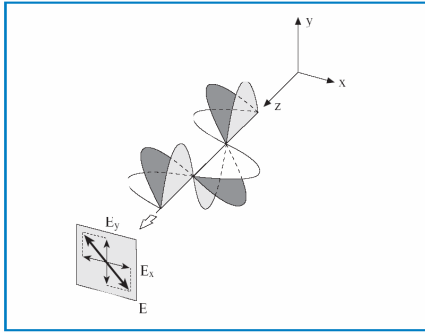
$$r = \left( \frac{n-1}{n+1} \right)^2$$



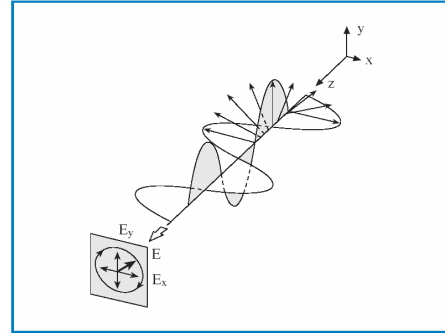


# Polarizáció 3.

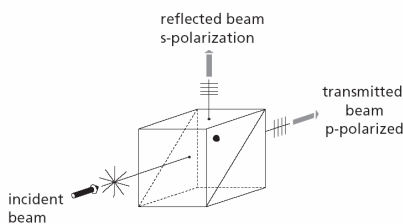
Lineárisan poláros fény:



Cirkulárisan (körben) poláros fény:



Polarizációs kocka:



$\lambda/4$  lemez (quarter-wave plate):

Ha egy kettőtörő anyag vastagságát úgy választjuk meg, hogy a o és e sugarak között negyed periódusnyi fáziskülönbség jöjjön létre, akkor egy ilyen eszköz segítségével a lineárisan poláros fényből cirkulárisan poláros fényt tudunk létrehozni.

A polarizáció befolyásolja az elnyelt fényintenzitást, s ezáltal a lézeres megmunkálás hatékonyságát és minőségét.

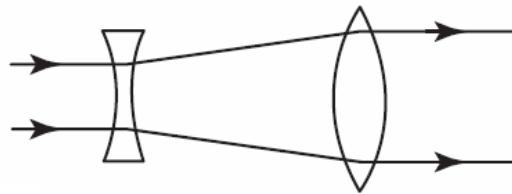
## Kollimátorok

$D > 1.5 \times$  nyalábméret ( $1/e^2$  TEM<sub>00</sub>-s Gauss nyaláb)

cél: 1) divergencia csökkentése 2) az optika (apertúra) kitöltése -> nagyobb munkatávolság

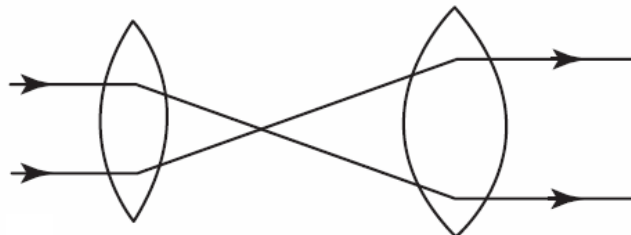
**Galilei elrendezés**

kisebber térigény ☺  
nagy teljesítmények ☺  
(nincs köztes fókusz)



**Kepler elrendezés**

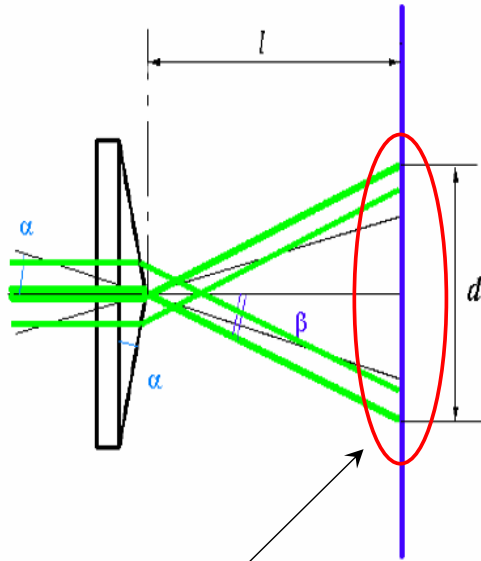
köztes fókusz ☹  
térshűrés ☺



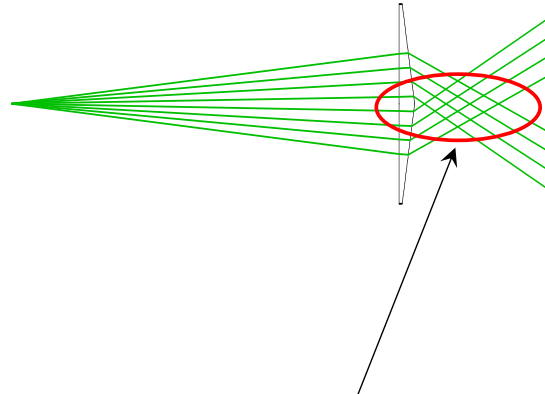
# Axicon lencse

párhuzamos nyaláb -> gyűrű

pontforrás -> vonalfókusz (optikai tengely mentén!)



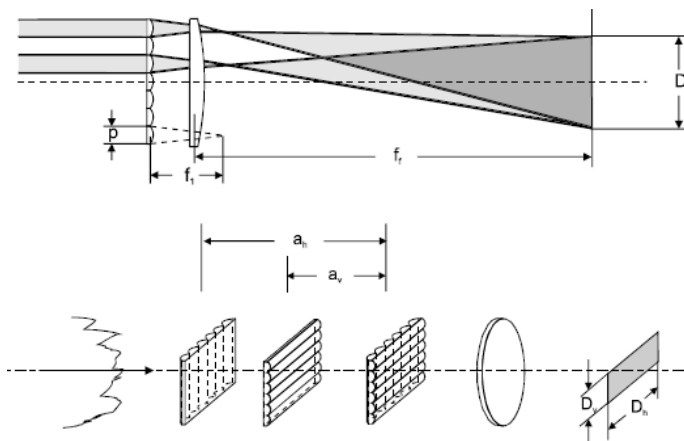
alk.: kornea abláció



alk.: lyukfúrás  
kör alakú nyílások belső felületének kezelése

# Nyaláb integrátor

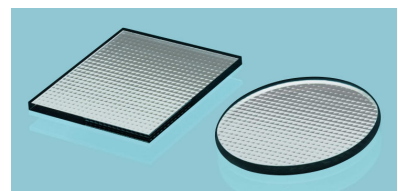
Cél: a nyaláb intenzitáseloszlásának homogenizálása



$$D = p \frac{f_f}{f_1}$$

négyzet

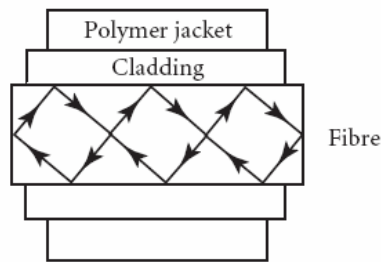
téglalap



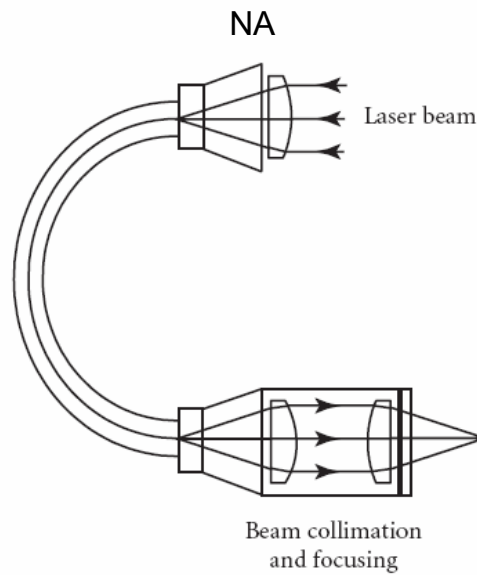
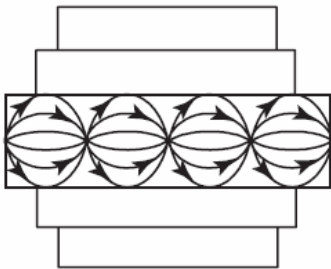
# Száloptikák

flexibilitás, szinte kizárólag Nd:YAG lézereknél alkalmazzák

Step-index



Graded-index



módust megőrzi (single mode fibre) → jobban fókuszálható nyaláb

# Reflektív optika

kevesebb aberráció és tömbi kialakítás esetén jól hűthető → nagy teljesítmény

Cu (OFHC),  $\lambda/20$ , 98,6% @ 10.6 $\mu\text{m}$ ; Mo, Si  
védőbevonatok (Ag (99%+, levegőn nem stabil), Au (98.9%))

## Nyalábterelő tükrök

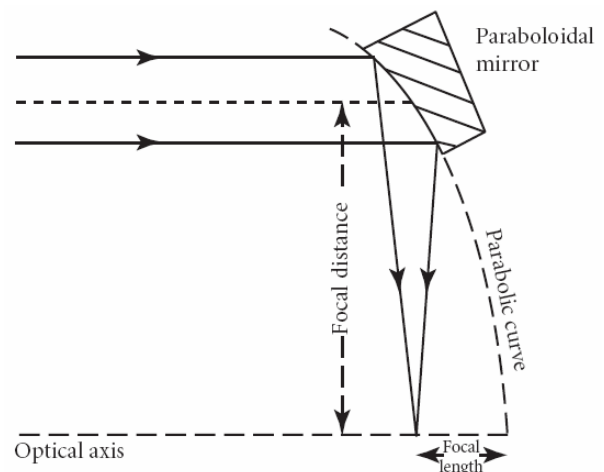
kb. 1% veszteség/tükör

## Gömbi tükrök

paraxiális sugarakra jók ( $<10^\circ$ )

## Parabolikus tükrök

aberrációmentes fókuszálás,  
de körülményes beállítás



# Reflektív kollimátorok

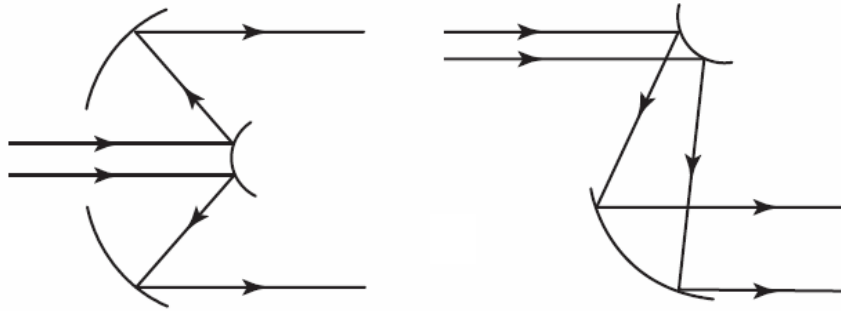
$D > 1.5 \times$  nyalábméret

cél: 1) divergencia csökkentése 2) az optika (apertúra) kitöltése -> nagyobb munkatávolság

**Kepler elrendezés**

köztes fókusz ☹

térszűrés ☹



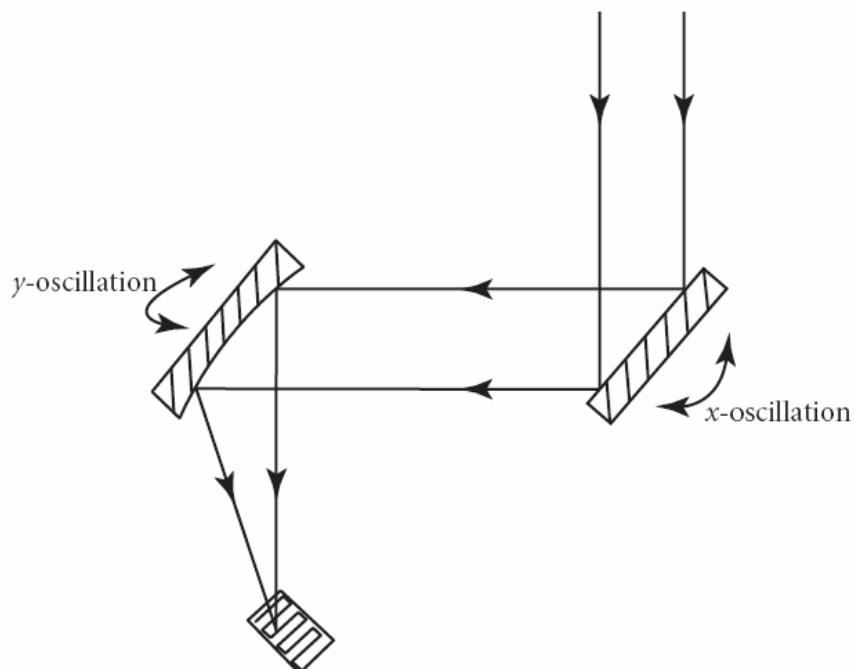
**Galilei elrendezés**

kisebber térigény ☺

nincs köztes fókusz ☺

# Nyaláb raszterezés

Általában két – egymásra merőleges tengely mentén – oszcilláló tükörből álló optikai elrendezés.



# Anyagi tulajdonságok

## Anyagcsaládok

Fémek

Kerámiák, üvegek

Műanyagok

Kompozitok

**A családok közti különbségek tárgyalhatóak:**

atomi szinten ( $10^{-9}\text{m}$ )

mikroszkópikus szinten ( $10^{-6}\text{m}$ )

makroszkópikus szinten ( $10^{-3}\text{m}$ )

# Kötés típusok

- **Elsőrendű**, vagy kémiai kötések
  - Ionos (600-1500 kJ/mol)
  - Kovalens (300-730 kJ/mol)
  - Fémes (68-850 kJ/mol)
- **Másodrendű**, vagy van der Waals kötések
  - Hidrogénhídkötés (30-51 kJ/mol)
  - Dipól kölcsönhatás (5-30 kJ/mol)

## Ionos kötés

Elektron mozgás

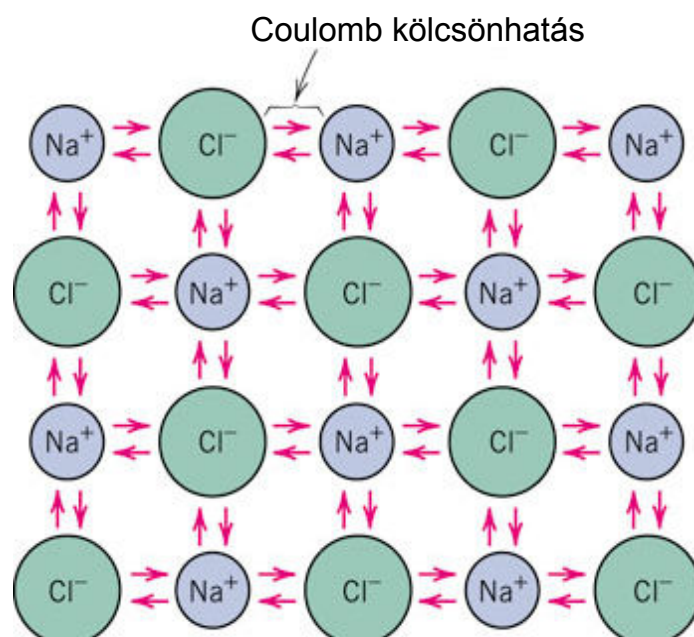
Nemesgáz szerkezetre törekvés

Periódusos rendszer jobb és bal szélein levő elemek között. (kerámiák)

Nem irányított

**Tulajdonságok:**

- Magas op.
- Kemény, törékeny
- Jó elektromos és hőszigetelők



# Kovalens kötés

Elektron megosztás

Nemesgáz szerkezetre törekvés

Periódusos rendszer jobb oldalán levő elemek (kerámiák, műanyagok, félvezetők)

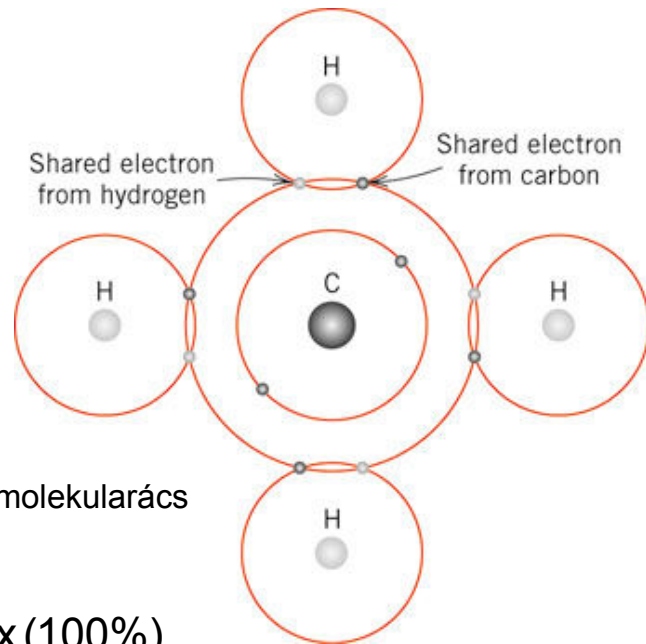
Irányított

**Tulajdonságok:**

attól függ, hogy atomrács vagy molekularács

$$\text{Ionos karakter} = \left( 1 - e^{-\frac{(X_A - X_B)^2}{4}} \right) \times (100\%)$$

ahol  $X_A, X_B$  a Pauling-féle elektronegativitás



# Fémes kötés

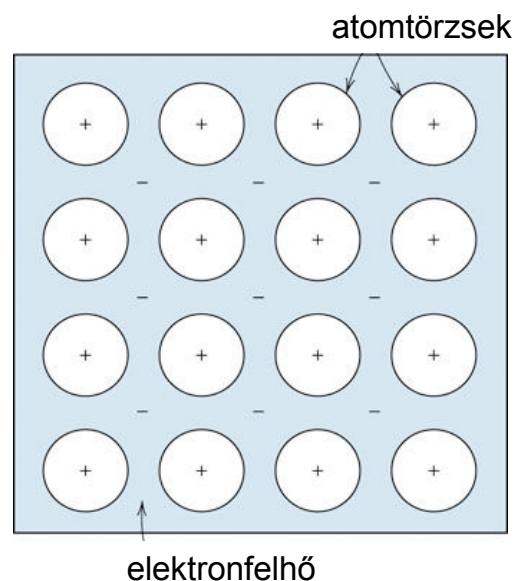
Elektron megosztás (elektron felhő, max.  $3e^-$ /atom)

Periódusos rendszer leggyakoribb kötése (fémek és ötvözeteik)

Nem irányított

**Tulajdonságok:**

- Kemény, de jól alakítható
- Jó elektromos és hővezetők



# Mikroszkópikus szinten

Fázisdiagramok

Mindíg termodinamikai **egyensúly**ra vonatkozik.

## A legegyszerűbb két komponensű rendszer

Az „oldat-rendszer”-ek (pl. Ni-Cu rendszer)

	<b>Kristály rács</b>	<b>elektrone- gativitás</b>	<b><i>r</i> (nm)</b>
<b>Ni</b>	<b>FCC</b>	<b>1.9</b>	<b>0.1246</b>
<b>Cu</b>	<b>FCC</b>	<b>1.8</b>	<b>0.1278</b>

- Az azonos kristályrács, valamint a közel azonos elektronegativitás és atomsugár kölcsönös oldékonyságot sejtet (← **Hume – Rothery szabály**).
- A Ni és a Cu egymásban korlátlanul oldódik.

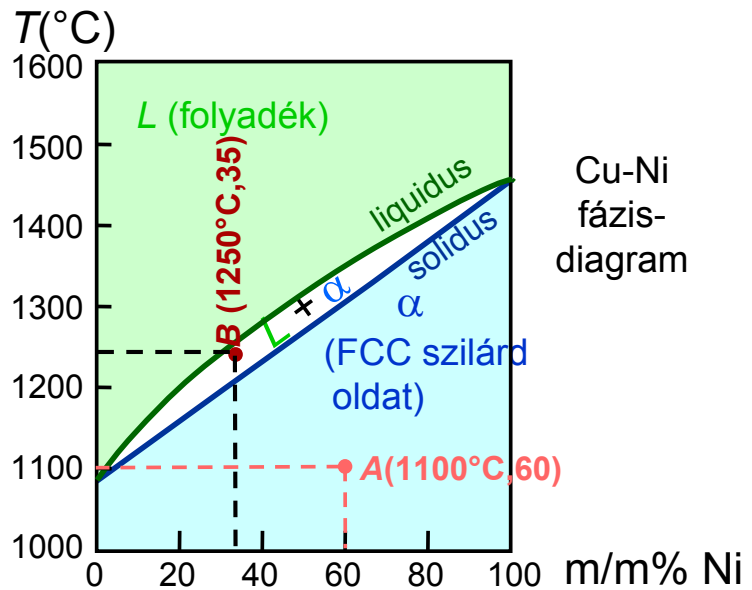


# 1) A fázisok száma és típusa

- Példák:

$A(1100^{\circ}\text{C}, 60)$ :  
1 fázis:  $\alpha$

$B(1250^{\circ}\text{C}, 35)$ :  
2 fázis:  $L + \alpha$



# 2) A fázisok összetétele

- Példák:

$C_0 = 35 \text{ m/m\% Ni}$

$T_A = 1320^{\circ}\text{C}$ :

Csak folyadék ( $L$ )

$C_L = C_0 (= 35 \text{ m/m\% Ni})$

$T_D = 1190^{\circ}\text{C}$ :

Csak szilárd ( $\alpha$ )

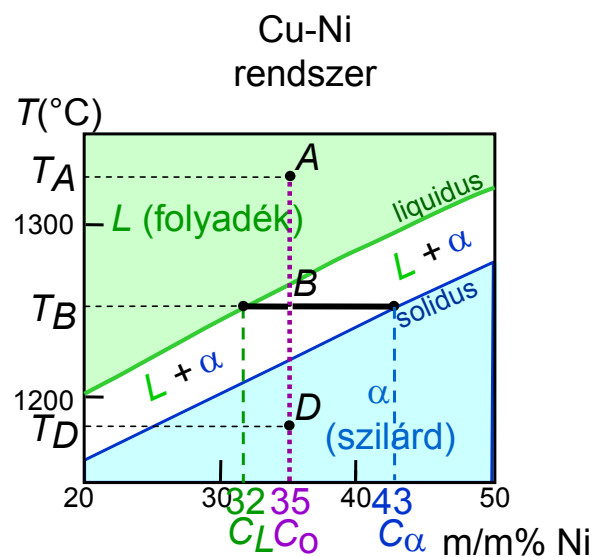
$C_{\alpha} = C_0 (= 35 \text{ m/m\% Ni})$

$T_B = 1250^{\circ}\text{C}$ :

Mind  $\alpha$  mind  $L$

$C_L = C_{\text{liquidus}} (= 32 \text{ m/m\% Ni})$

$C_{\alpha} = C_{\text{solidus}} (= 43 \text{ m/m\% Ni})$



### 3) A fázisok mennyisége

- Példák:

$C_0 = 35 \text{ wt\% Ni}$

$T_A$ : Csak folyadék (L)

$$W_L = 100 \text{ m/m\%}, W_\alpha = 0$$

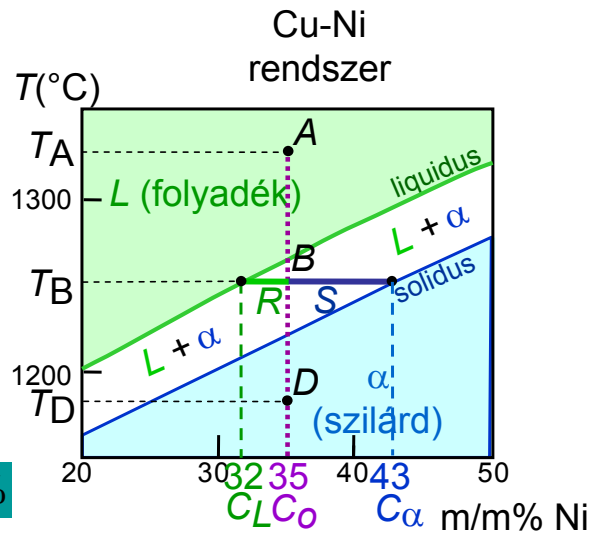
$T_D$ : Csak szilárd ( $\alpha$ )

$$W_L = 0, W_\alpha = 100 \text{ m/m\%}$$

$T_B$ : Mind  $\alpha$ , mind L

$$W_L = \frac{S}{R+S} = \frac{43-35}{43-32} = 73 \text{ m/m\%}$$

$$W_\alpha = \frac{R}{R+S} = 27 \text{ m/m\%}$$

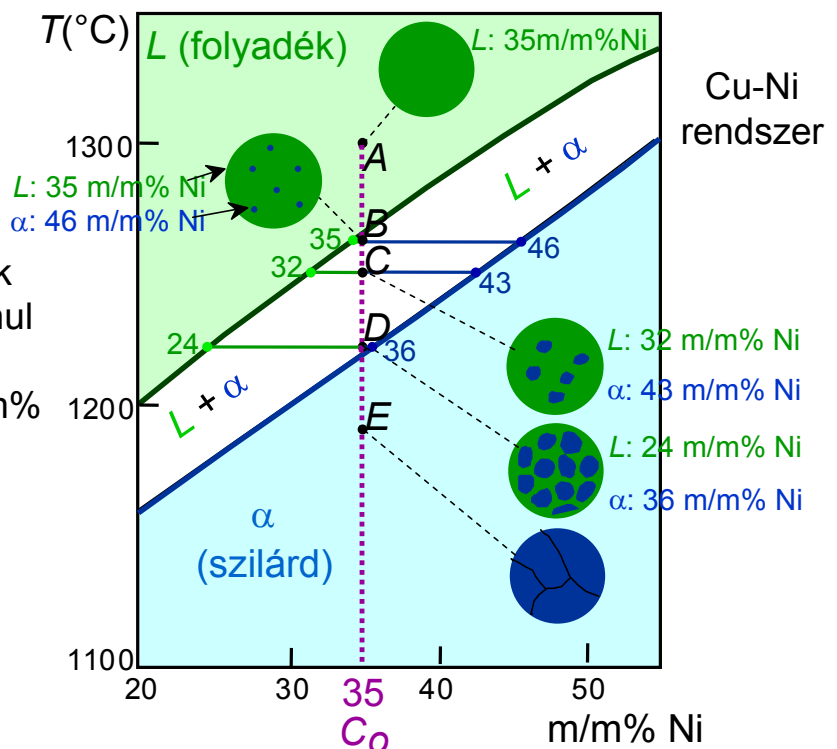


Emelőszabály!

### A Cu-Ni bináris rendszer egyensúlyi hűtése

- A rendszer:
  - két komponensű  
Cu és Ni
  - izomorf  
azaz a komponensek egymásban korlátlanul oldódnak; avagy az  $\alpha$  fázis 0-tól 100 m/m% Ni-ig terjed.

- Tekintsük most a  $C_0 = 35 \text{ m/m\%Ni}$  esetet!



# Egyensúlyi vs. nemegyensúlyi hűtés

termodinamika vs. kinetika

egyensúly  $\equiv$  a fázisegyensúlyt minden időpillanatban fenntartjuk; ehhez diffúzió szükséges (folyadékban még OK, de szilárd fázisban igen lassú! különösen alacsonyabb hőmérsékleteken)  $\rightarrow$  igen lassú hűtést feltételez

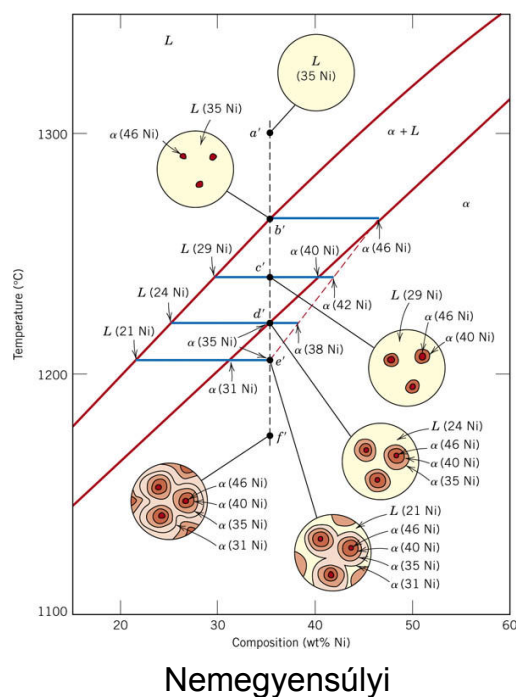
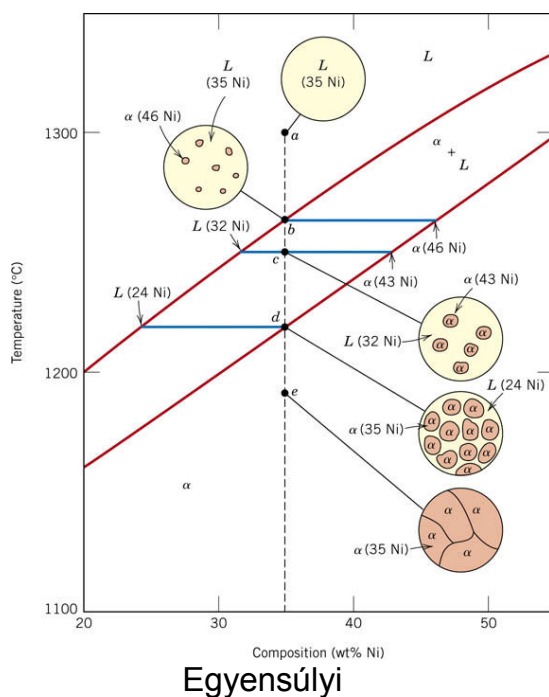
egyensúlyi állapot  $\equiv$  stabil; nemegyensúlyi állapot  $\equiv$  metastabil

A metastabil fázisokat tartalmazó rendszerek sokszor sokkal fontosabbak és érdekesebbek, mint a stabil, egyensúlyi rendszerek.

Az eltérés mértéke a hűtési sebességtől és a szilárd fázisra jellemző diffúziós sebességtől függ.

## Szegregáció

$C_\alpha$  változik a megszilárdulás közben. A szemcsékben az elemek eloszlása nem homogén; a mag a magasabb op.-ú fémekben gazdagabb.

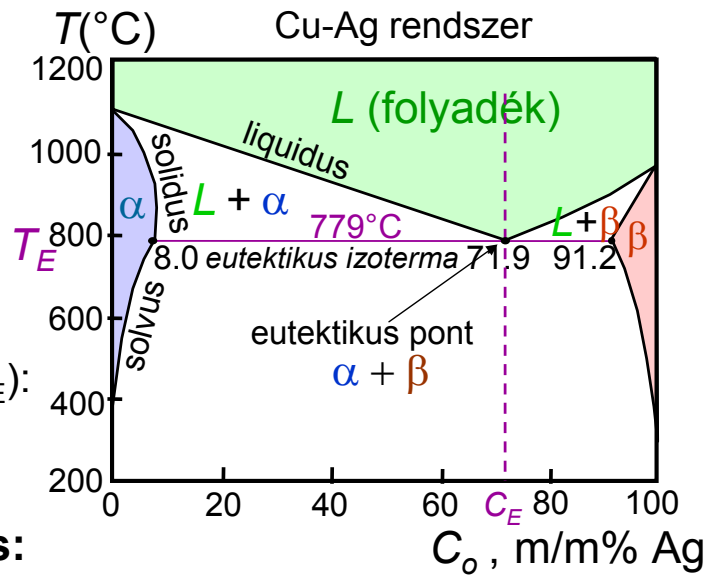
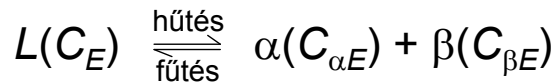


# Két komponensű eutektikus rendszerek

Eutektikum  $\equiv$  (*eutektos*(g)=könnyen olvadó) az a két komponensű keverék, mely jól meghatározott minimális olvadásponttal rendelkezik.

Példa:

- 3 db 1-fázisú régió ( $L, \alpha, \beta$ )
- 3 db 2-fázisú régió ( $L+\alpha, L+\beta, \alpha+\beta$ )
- $T_E$ : legalacsonyabb  $T$ , ahol folyadék *lehet*
- Korlátolt oldhatóság ( $T < T_E$ ):  
 $\alpha$ : kevés Ag a Cu-ben  
 $\beta$ : kevés Cu az Ag-ben
- **Eutektikus átalakulás:**



## Anyagi tulajdonságok

2009. október 7.

# A lézeres anyagmegmunkálás szempontjából fontos anyagi tulajdonságok

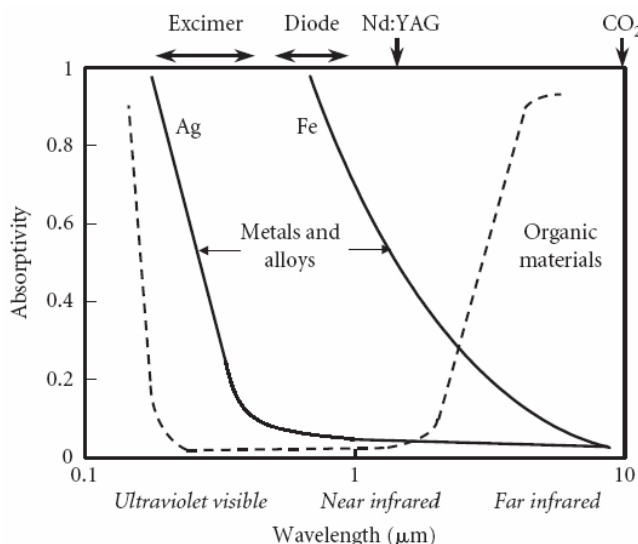
- Optikai tulajdonságok
- Mechanikai tulajdonságok
- Termikus tulajdonságok

**O1**

## Abszorptivitás, $A$

$$A = \frac{E_{absz}}{E_0} \quad 1 = A + R + T$$

A nyaláb teljes energiájának, teljesítményének ezen része “hasznosul”, hisz ez fordítódik a minta megmunkálására.



polarizációfüggő!  
(ld. Fresnel formulák)  
hőmérsékletfüggő,  
legtöbb szilárd fémre, ötvö-  
zetre az IR-ban  $dA/dT > 0$   
függ a felületi simaságtól  
durva felszín  $A$ -ja nagyobb

# Abszorpciós tényező, $\beta$

Beer-Lambert törvény:

$$E(z) = E_0 e^{-\beta \cdot z}$$

$E_0$ : mintára eső energia ( $z=0$ )  
 $E$ : energia a minta  $z$  mélységében  
 $\beta$ : abszorpciós tényező

abszorpciós hossz:

ahol 
$$E(z_{absz}) = \frac{E_0}{e}$$

$$z_{absz} = \frac{1}{\beta}$$

# Sűrűség, $\rho$

Az atomok szorosabb illeszkedése nagyobb sűrűséget (és egyszersmind magasabb olvadáspontot is) eredményez.

**Fémek:** általában nagy

**Műanyagok:** alacsony

# Fajhő, c

T1

Az anyag fajlagos hőkapacitása:

annak az energiának a mértéke, mely ahhoz szükséges, hogy az anyag egységnyi mennyiségének hőmérsékletét 1 kelvinnel növeljük állandó nyomáson

vonatkozhat tömegegységre, térfogategységre, vagy egységnyi anyagmennyiségre,

mértékegysége, ennek megfelelően:

$$J kg^{-1} K^{-1}, J m^{-3} K^{-1}, J mol^{-1} K^{-1}$$

A legtöbb anyag térfogati fajhője szobahőmérsékleten:  $3 \times 10^6 J m^{-3} K^{-1}$

A fajhő hőmérsékletfüggése:

**fémek és ötvözetek:** a hőmérséklet növelésével nő, max.  $25 J mol^{-1} K^{-1}$

**kerámiák és üvegek:** a hőmérséklet növelésével nő, míg kb.  $1000^\circ C$ -nál állandóvá válik

**műanyagok:** az üvegesedési hőmérséklet eléréséig nő

# Hővezetőképesség, $\lambda$

thermal conductivity

T2

Az anyag azon tulajdonságát jellemzi, hogy **egyensúlyi körülmények között** milyen mértékben képes a hő vezetésére.

$$\lambda = \frac{\text{heat flux}}{\text{temperature gradient}} \quad [\lambda] = W m^{-1} K^{-1}$$

$$\frac{\Delta Q}{\Delta t} = \lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

**Fémek:** elektronok  $\rightarrow$  nagy hővezetőképesség, T növelésével csökken,

Wiedemann-Franz törvény  $\frac{\lambda}{\sigma} = LT, L = 2.44 \times 10^{-8} W \Omega K^{-2}$

**Kerámiák:** fononok  $\rightarrow$  nagyobb kötési erősség jobb hővezetőképesség (pl. gyémánt), réteges szerkezetekben anizotróp (pl. grafit), T növelésével csökken

**Üvegek:** amorfak  $\rightarrow$  rossz hővezetés és nincs jelentősebb hőmérsékletfüggés

**Műanyagok:** kovalens kötés + nagy molekulák + kevésbé kristályos  $\rightarrow$  alacsony hővezetés

# Hődiffúziós együttható, $a$

thermal diffusivity

T3

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c} = \frac{\text{hővezetéssel terjedő energia}}{\text{térfogategységben tárolt energia}}$$

**Tranziens (nemegyensúlyi) folyamatok során jelentős!**

pl. impulzus lézeres kezelés, vagy mozgó minta/nyaláb

Termikus behatolási mélység:

$$z_{term} = \sqrt{4at} \quad t: \text{a hőkezelés ideje}$$

Ötvözetek hődiffúziós együtthatója kisebb, mint a tiszta fémeké!

# Hőtágulási együttható, $\alpha$

T4

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta T}$$

Szoros illeszkedésű kristályrácsoknál (pl. fémek, ötvözetek, ionos kerámiák) a hőtágulási együttható nagy.

Kovalens kötésű anyagokban van elegendő „szabad hely” a tágabb rezgési amplitúdók számára is → kisebb hőtágulási együttható

Anizotróp anyagokban irányfüggő.



# Átalakulási hőmérsékletek

A különféle fázisátmenetek jellemző hőmérsékleteken játszódnak le.  
olvadáspont, forráspont ...

melyekhez karakterisztikus energiák is tartoznak

$$T_{fp} \approx 2 \cdot T_{op}$$

fémek, ötvözetek

Szoros illeszkedés és erős kötés magas olvadáspontot eredményez.

Üvegesedési hőmérséklet,  $T_g$ :  
amorf anyagokra jellemző  
szilárdszerű -> folyadékszerű  
viselkedés

Polimer

[Polietilén \(LDPE\)](#)

[Polipropilén \(atactic\)](#)

[Polivinilacetát \(PVAc\)](#)

[Polietilén tereftalát \(PET\)](#)

[Polivinilalkohol \(PVA\)](#)

[Polivinil-klorid \(PVC\)](#)

[Polisztiirén](#)

[Polipropilén \(isotactic\)](#)

[Polimetilmetakrilát \(atactic\)](#)

Gumi

[Szilícium oxid](#)

$T_g$  (°C)

-125 or -30

-20

28

79

85

81

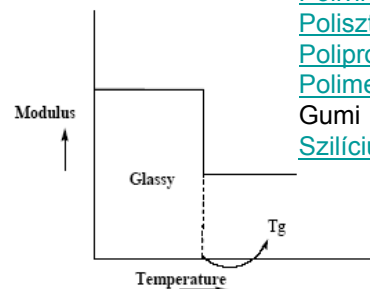
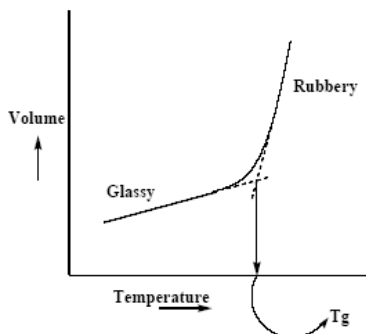
95

0

105

160

1175



$$T_{op} \approx 1.5 \cdot T_g$$

# Olvadáshő, párolgáshő

A fázisátalakulást kísérő szabadenergia változás.

$$\Delta H = T \cdot \Delta S$$

Olvadásra: 
$$\frac{\Delta H_{olv}}{T_{op}} = \Delta S \approx R = 8.314 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Párolgásra: 
$$\frac{\Delta H_{forrás}}{T_{fp}} = \Delta S \approx 10.5R = 88 \text{ Jmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$$

Trouton-szabály

**FIGYELEM:** a fenti összefüggések nem érvényesek asszociálódó anyagokra (pl. másodrendű kötések)

# Anyagi állandók FÉMEK ÉS ÖTVÖZETEK

**Table D.1** Mechanical and thermal properties of some engineering metals and alloys:  $\rho$  is density;  $E$  is Young's modulus;  $\sigma_y$  is yield stress;  $\sigma_{TS}$  is ultimate tensile stress;  $\epsilon_f$  is elongation at failure;  $\lambda$  is thermal conductivity;  $c_p$  is specific heat capacity at constant pressure;  $a$  is thermal diffusivity;  $T_m$  is melting temperature;  $T_v$  is vaporization temperature;  $L_m$  is latent heat of melting;  $L_v$  is latent heat of vaporization;  $\alpha$  is coefficient of linear expansivity (the quantities  $\lambda$ ,  $c_p$  and  $a$  refer to values at 60% of the melting temperature)

Material	Grade	Mechanical properties					Thermal properties							
		$\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )	$E$ (GN m <sup>-2</sup> )	$\sigma_y$ (MN m <sup>-2</sup> )	$\sigma_{TS}$ (MN m <sup>-2</sup> )	$\epsilon_f$ (%)	$\lambda$ (J s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$c_p$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$a$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> )	$T_m$ (K)	$T_v$ (K)	$L_m$ (kJ kg <sup>-1</sup> )	$L_v$ (MJ kg <sup>-1</sup> )	$\alpha$ (K <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> )
Aluminium	CP	2704	71	50	200	43	238	1000	88	932	2740	388	10.79	23
Copper	CP	8930	117	75	400	45	375	471	112	1356	2868	205	4.79	17
Copper	Brass	8500	115	450	550	8	110	370	35	1300	1180	150	3.75	18
Copper	Bronze	8800	110	140	260	10	180	360	57	1300	2540	105	3.50	17
Gold	CP	19300	71	40	220	40	296	132	116	1340	3239	65	1.28	14
Iron	CP	7790	206	165	300	45	32.5	560	7.5	1810	3300	272	6.10	12
Iron	C-Mn	7764	210	300	460	35	30	420	9.2	1800	3100	270	6.05	15
Iron	AISI 304	7870	195	230	600	60	25.5	450	7.2	1773	3300	280	6.20	16
Iron	Grey	7142	110	180	275	0.5	75	500	21	1500	2900	100	5.80	11
Iron	Nodular	7891	197	275	415	18	25	480	6.6	1810	2900	100	5.80	12
Iron	Malleable	7700	180	190	230	0	75	440	22	1420	2900	140	5.80	11
Lead	CP	11538	16.1	12	168	50	33	130	22	600	2017	24	0.863	27
Magnesium	CP	1740	44	95	190	5	100	821	70	924	1380	358	5.51	25
Nickel	CP	8900	207	60	300	30	72	560	14	1726	3005	302	6.38	13
Nickel	Monel	8800	150	240	520	40	360	420	97	1600	2800	250	5.20	14
Silver	CP	10500	70	150	180	45	419	235	160	1230	2485	106	2.33	19
Tin	CP	7300	40	26	30	0.5	68	264	39	505	2540	60	2.50	23
Titanium	CP	4500	116	480	620	20	23	523	9.8	1950	3530	392	10.67	9
Zinc	CP	7140	110	260	150	50	111	420	40	693	1180	110	1.76	31

# ÜVEGEK ÉS KERÁMIÁK

**Table D.2** Mechanical and thermal properties of some engineering glasses:  $\rho$  is density;  $E$  is Young's modulus;  $\sigma_{TS}$  is ultimate tensile stress;  $\lambda$  is thermal conductivity;  $c_p$  is specific heat capacity at constant pressure;  $a$  is thermal diffusivity;  $T_g$  is glass transition temperature;  $T_m$  is melting temperature;  $\alpha$  is coefficient of linear expansivity

Material	Grade	Mechanical properties				Thermal properties				
		$\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )	$E$ (GN m <sup>-2</sup> )	$\sigma_{TS}$ (MN m <sup>-2</sup> )	$\lambda$ (J s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$c_p$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$a$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> )	$T_g$ (K)	$T_m$ (K)	$\alpha$ (K <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> )
Alumino-silicate	Fibre glass	2700	85	60	1.0	800	0.46	863	1500	5.2
Boro-silicate	Pyrex	2300	65	55	1.0	753	0.57	743	1400	3.2
Glass	Silica	2200	75	70	1.4	840	0.76	1253	1715	0.6
Glass	Soda	2500	74	50	1.0	503	0.80	793	1996	7.8
Glass	Lead	3000	60	65	0.8	670	0.40	663	1996	9.4

**Table D.3** Mechanical and thermal properties of some engineering ceramics:  $\rho$  is density;  $E$  is Young's modulus;  $\sigma_y$  is yield stress;  $\sigma_{TS}$  is ultimate tensile stress;  $\epsilon_f$  is elongation at failure;  $\lambda$  is thermal conductivity;  $c_p$  is specific heat capacity at constant pressure;  $a$  is thermal diffusivity;  $T_m$  is melting temperature;  $\alpha$  is coefficient of linear expansivity (\*four point bending; + compression)

Material	Grade	Mechanical properties					Thermal properties				
		$\rho$ (kg m <sup>-3</sup> )	$E$ (GN m <sup>-2</sup> )	$\sigma_y^*$ (MN m <sup>-2</sup> )	$\sigma_{TS}$ (MN m <sup>-2</sup> )	$\epsilon_f$ (%)	$\lambda$ (J s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$c_p$ (J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$a$ (m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> )	$T_m$ (K)	$\alpha$ (K <sup>-1</sup> × 10 <sup>-6</sup> )
Alumina	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3970	345	455	250 <sup>+</sup>	—	7.80	800	9.54	2303	8.5
Aluminium nitride	AlN	2700	320	441	425	—	180	700	95.2	2173	4.4
Beryllia	BeO	3100	400	246	250	—	210	1080	62.7	2803	7.4
Boron carbide	B <sub>4</sub> C	2520	450	350	350	—	37.0	950	15.5	2623	4.3
Brick	Red	2300	17	500	36 <sup>+</sup>	—	0.60	440	59.3	2980	9.0
Diamond		3510	500	1500	10000 <sup>+</sup>	—	2000	472	1207	4300	1.2
Granite		2750	70 <sup>+</sup>	—	175 <sup>+</sup>	23	1.5	800	0.68	7000	8.0
Limestone	CaCO <sub>3</sub>	2000	63 <sup>+</sup>	—	110 <sup>+</sup>	20	1	1000	0.50	2750	7.0
Magnesia	MgO	3580	395	280	—	—	62	940	18.4	3073	12
Marble		2850	75 <sup>+</sup>	—	115 <sup>+</sup>	—	3	880	1.20	—	6.5
Porcelain		2400	70	—	—	45	5	1070	1.95	1823	3.0
Sialon	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> -Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3200	300	425	400	—	22	750	9.2	1600	3.1
Silicon carbide	SiC	3170	400	140	450	0.6	100	1240	0.16	2500	4.5
Silicon nitride	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	3100	175	210	275	—	16	750	6.9	2023	2.6
Tungsten carbide	WC	15800	700	—	344	—	70	340	13	3073	7.3
Zirconia	ZrO <sub>2</sub>	5600	138	175	325	—	19	460	0.6	2770	11

# MŰANYAGOK

**Table D.4** Mechanical and thermal properties of some engineering polymers;  $\rho$  is density;  $E$  is Young's modulus;  $\sigma_y$  is yield stress;  $\sigma_{TS}$  is ultimate tensile stress;  $\epsilon_f$  is elongation at failure;  $\lambda$  is thermal conductivity;  $c_p$  is specific heat capacity at constant pressure;  $a$  is thermal diffusivity;  $T_g$  is glass transition temperature;  $T_m$  is melting temperature;  $\alpha$  is coefficient of linear expansivity (Kevlar is a registered trademark of E.I. du Pont de Nemours and Company)

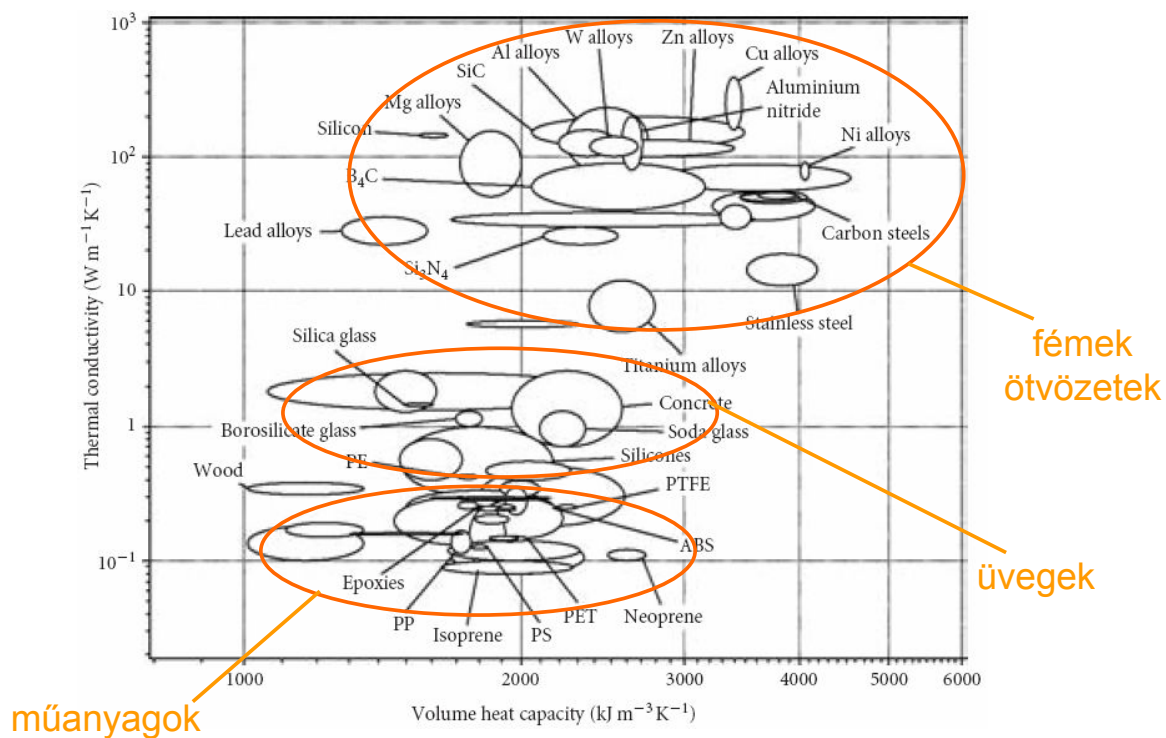
Material	Grade	Mechanical properties					Thermal properties					
		$\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$E$ ( $\text{GN m}^{-2}$ )	$\sigma_y$ ( $\text{MN m}^{-2}$ )	$\sigma_{TS}$ ( $\text{MN m}^{-2}$ )	$\epsilon_f$ (%)	$\lambda$ ( $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$c_p$ ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$a$ ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 10^{-6}$ )	$T_g$ (K)	$T_m$ (K)	$\alpha$ ( $\text{K}^{-1} \times 10^{-6}$ )
Acrylic	Moulded	1150	3.1	74	69	6	0.20	1500	0.12	373	403	73
Epoxy	Cast	1120	3	80	90	3	0.17	1400	0.11	380	420	5
Melamine	Phenolic	1630	10.7	94	70	80	0.56	1700	0.20	–	360	4
Nylon	6	1130	3	79	100	70	0.23	700	0.29	340	480	94
Polyamide	Kevlar®	1450	110	120	3200	6.6	0.37	1100	0.23	553	1273	28
Polycarbonate		1200	2.38	62	66	80	0.19	1300	0.12	573	783	75
Polyetheretherketone		1330	4.5	99	110	37	0.25	2000	0.01	413	613	39
Polyethylene	Low density	920	0.18	20	13	600	0.25	2300	0.12	270	360	200
Polyethylene	High density	930	0.43	25	30	200	0.52	2300	0.24	300	383	200
Polymethylmethacrylate	Atactic	1190	3.18	80	76	5	0.20	1500	0.11	378	400	250
Polypropylene	Atactic	900	1	25	35	220	0.16	2100	0.01	253	310	62
Polystyrene	Amorphous	1050	3.1	40	50	2	0.13	1300	0.01	373	373	70
Polyurethane		1100	0.44	25	27	250	0.19	1500	0.12	–	358	280
Polyvinylchloride		1352	0.01	28	37	300	0.13	1800	0.05	350	370	150
Rubber	Polyisoprene	916	0.02	–	17	500	0.13	1905	0.07	220	350	660

# KOMPOZITOK

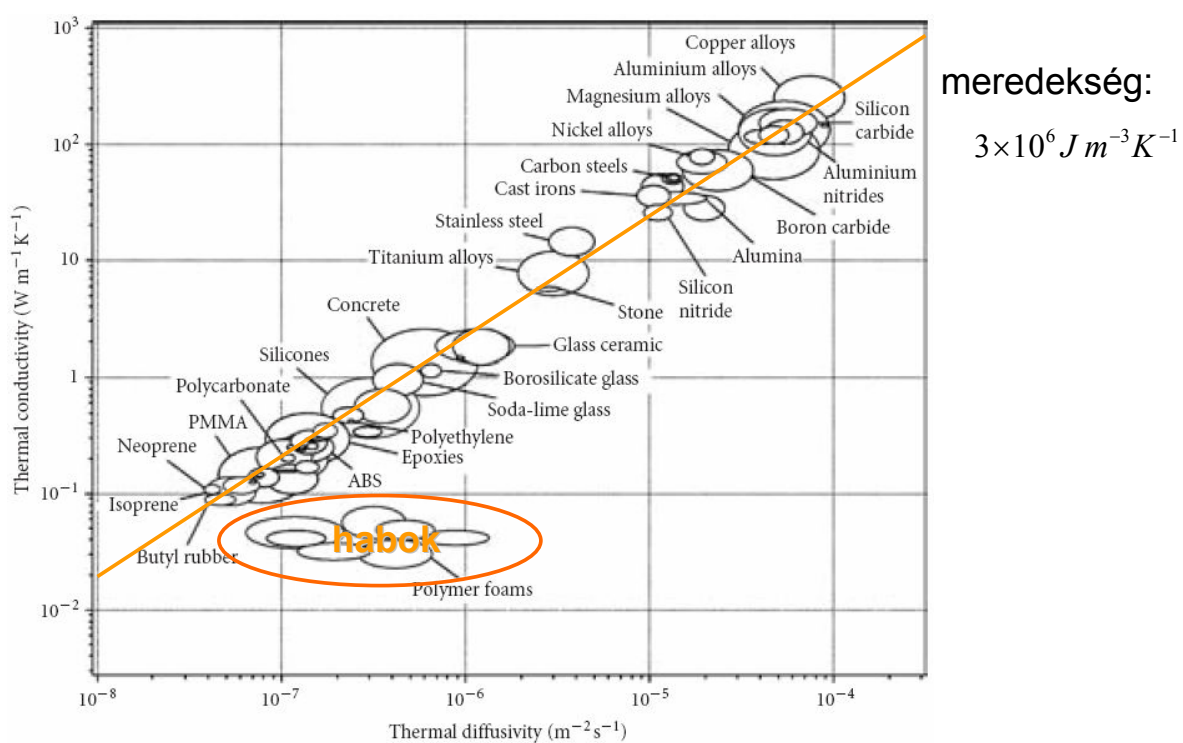
**Table D.5** Mechanical and thermal properties of some engineering composites;  $\rho$  is density;  $E$  is Young's modulus;  $\sigma_y$  is yield stress;  $\sigma_{TS}$  is ultimate tensile stress;  $\lambda$  is thermal conductivity;  $c_p$  is specific heat capacity at constant pressure;  $a$  is thermal diffusivity;  $T_m$  is melting temperature;  $\alpha$  is coefficient of linear expansivity (\*bending; <sup>+</sup> compression; || parallel to grain/reinforcement; <sup>⊥</sup> perpendicular to grain/reinforcement)

Material	Grade	Mechanical properties					Thermal properties					
		$\rho$ ( $\text{kg m}^{-3}$ )	$E$ ( $\text{GN m}^{-2}$ )	$\sigma_y$ ( $\text{MN m}^{-2}$ )	$\sigma_{TS}$ ( $\text{MN m}^{-2}$ )	$\lambda$ ( $\text{J s}^{-1} \text{m}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$c_p$ ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ )	$a$ ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1} \times 10^{-6}$ )	$T_m$ (K)	$\alpha$ ( $\text{K}^{-1} \times 10^{-6}$ )		
Aluminium alloy–SiC	Particulate	3050	200	300	350	180	850	69.4	823	16.5		
Bone	<i>In vivo</i>	2100	20	–	150	0.38	440	0.29	–	1.46		
Carbon fibre reinforced polymer	CFRP	1700	100	–	250	0.75	1373	0.30	500	8		
Concrete		2400	30 <sup>+</sup>	400	40 <sup>+</sup>	0.10	3350	0.01	1600	12		
Glass fibre reinforced polymer	GFRP	2400	80	–	220	0.60	3350	0.01	1600	10		
Human tissue	Muscle	1010	–	–	–	0.46	3662	12.4	–	–		
Titanium alloy–SiC	Fibre	4100	320	170	450	23	523	9.8	1950	6.8 (  ), 8.0 ( <sup>⊥</sup> )		
Wood	Ash	600	10.5*	55*	75*	1.0 (  ), 0.4 ( <sup>⊥</sup> )	1800	0.65	–	50 (  ), 27 ( <sup>⊥</sup> )		
	Fir	520	12.0*	40*	65*	1.0 (  ), 0.4 ( <sup>⊥</sup> )	1700	0.79	–	55 (  ), 25 ( <sup>⊥</sup> )		
	Oak	680	11.5*	50*	75*	1.5 (  ), 0.6 ( <sup>⊥</sup> )	1900	0.77	–	70 (  ), 30 ( <sup>⊥</sup> )		
	Pine	600	12.5*	50	75*	1.0 (  ), 0.4 ( <sup>⊥</sup> )	1700	0.69	–	60 (  ), 25 ( <sup>⊥</sup> )		

# Anyagi tulajdonság diagramok, 1



# Anyagi tulajdonság diagramok, 2



# Anyagi tulajdonság diagramok, 3

