

# **Bevezetés az anyagtudományba**

X. előadás

2010. április 15.

## **Alapok**

### **Optikai tulajdonságok:**

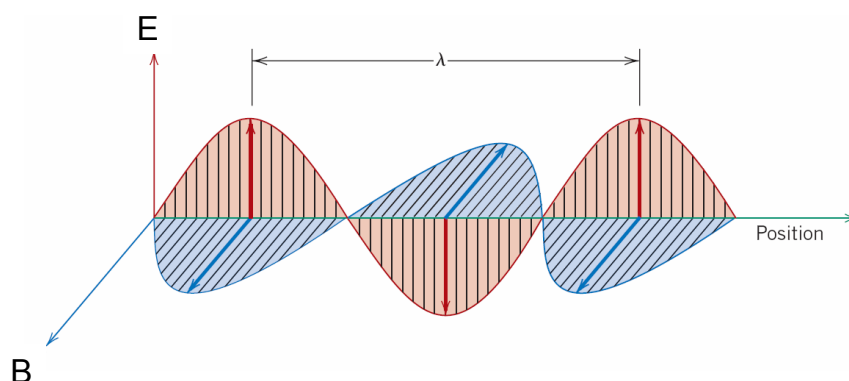
miként válaszol az anyag, ha arra elektromágneses sugárzás  
– konkrétan látható fény – esik?

**Optika** – a fény tudománya és technikája

**A fény** – elektromágneses hullám és részecske (foton).

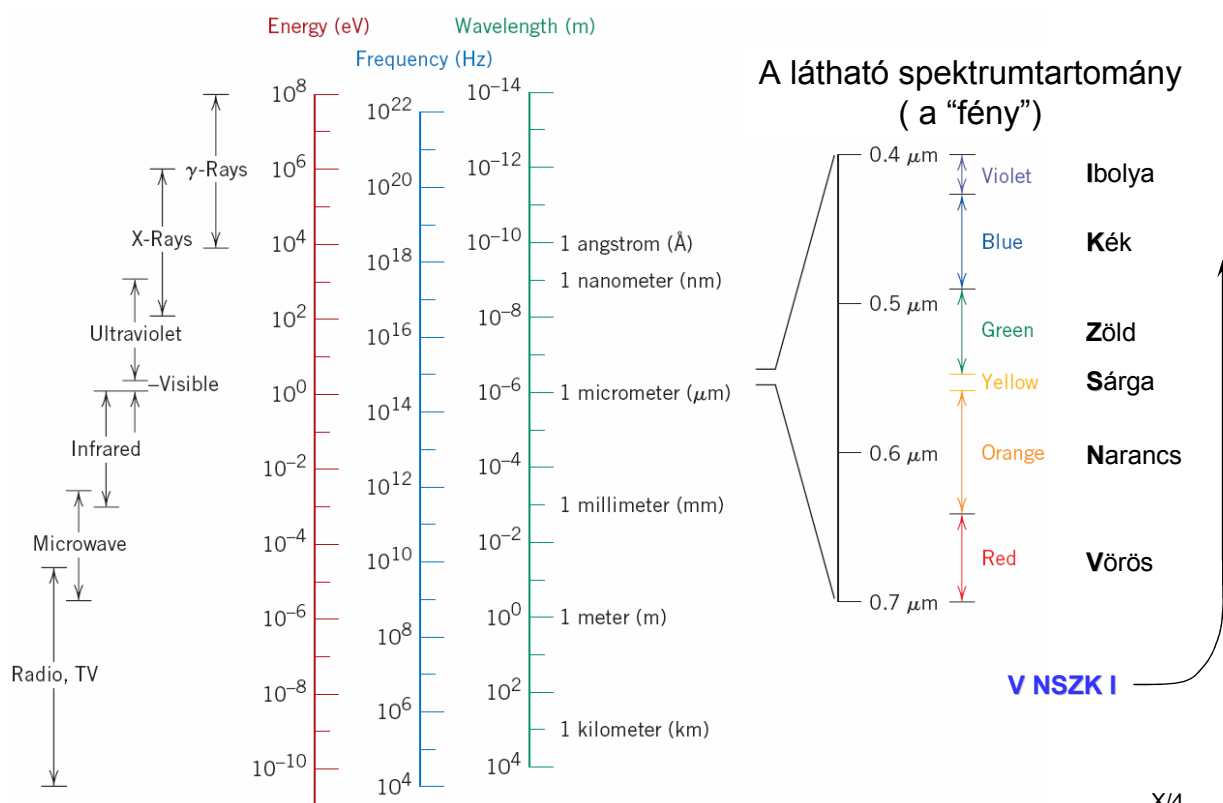
# Az elektromágneses sugárzás

Az elektromágneses hullámok **tranzverzális hullámok**.  
Az elektromágneses hullámban az **E** és **B** vektorok merőlegesek egymásra és a terjedési irányra.



X/3

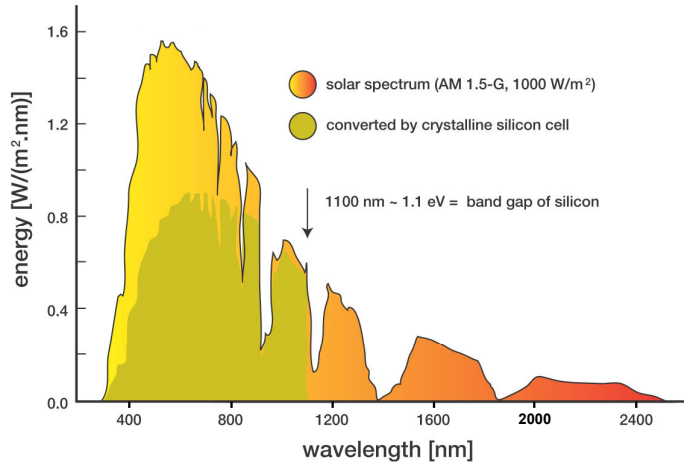
# Az elektromágneses spektrum



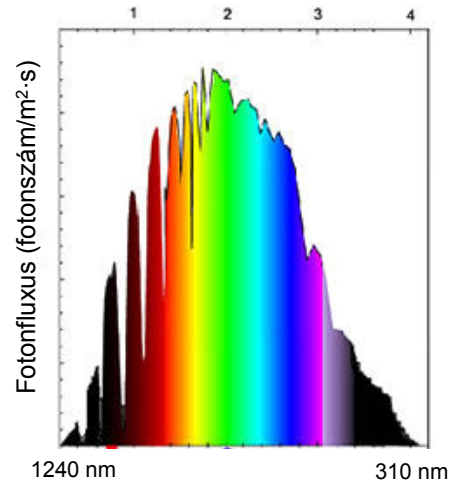
X/4

# “Optika – a fény tudománya és technikája”

A Nap sugárzási spektruma



Fotonenergia (eV)



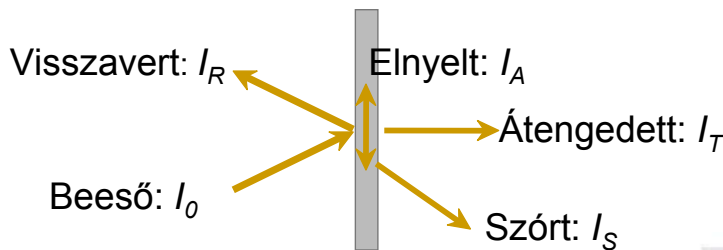
“Hullám”:  $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$   $c = \lambda \nu$

“Részecske” foton:  $E = h \nu = \frac{hc}{\lambda}$

Ahol  $c$  ( $3,00 \times 10^8$  m/s) a vákuumbeli fénysebesség,  $\epsilon_0 = 8,855 \cdot 10^{-12}$  C<sup>2</sup>/Nm<sup>2</sup> ( $=8,855 \cdot 10^{-12}$  As/Vm) a vákuum permittivitása (elektromos állandó),  $\mu_0 = 1,256 \cdot 10^{-8}$  Vs/Am a vákuum permeabilitása (mágneses állandó),  $\lambda$  a hullámhossz,  $\nu$  a frekvencia,  $E$  a fotonenergia,  $h$  a Planck állandó ( $6,62 \cdot 10^{-34}$  J·s)

X/5

## Fény és anyag kölcsönhatása: transzmisszió, abszorpció, reflexió, szórás



$I$ : intenzitás [ $I$ ]=Wcm<sup>-2</sup>

$$I_0 = I_T + I_A + I_R + I_S$$

$$I_T/I_0 = T, I_A/I_0 = A, I_R/I_0 = R, T + A + R = 1$$



Egy adott spektrumtartományban

Átlátszó anyagok: csekély  $R$  és  $A$ , (tipikusan dielektrikumok)

Áttetsző anyagok: jelentős szórás, (dielektrikumok bizonyos formái, szerkezet!)

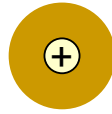
Nem átlátszó anyagok:  $T$  kicsi, (fémek tipikusan ilyenek)

X/6

# Fény és anyag kölcsönhatása

Atomi szinten:

Megvilágítás  
nélkül:



Az anyagon áthaladó  
fény hatására



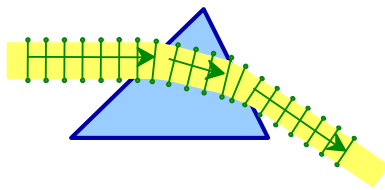
az elektronfelhő  
torzul

polarizáció

A fény (elektromos térerősség komponense) és az atommagokat körülvevő elektronfelhő kölcsönhatásának, azaz a polarizáció két következménye:

- 1) energiaveszteség  $\equiv$  *abszorpció*, illetve
- 2) sebességcsökkenés  $\Rightarrow$  *törés*

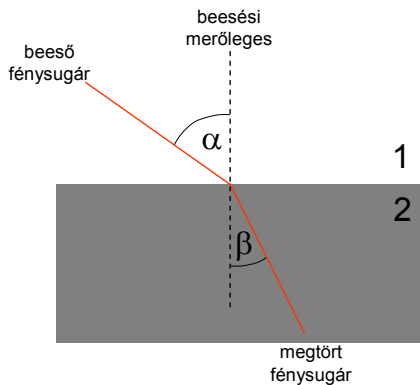
$$n = \text{abszolút törésmutató} \equiv \frac{c \text{ (fénysebesség vákuumban)}}{v \text{ (fénysebesség az anyagban)}}$$



Üvegek:	1,5 - 1,7
Műanyagok:	1,3 - 1,6
PbO:	2,67
Gyémánt:	2,41

X/7

## Snellius-Descartes (törési) törvény



a) a megtört fény sugár a beeső fény sugár és a beesési merőleges által kijelölt síkban van

b)

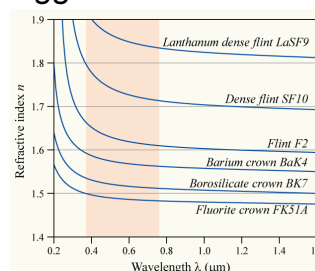
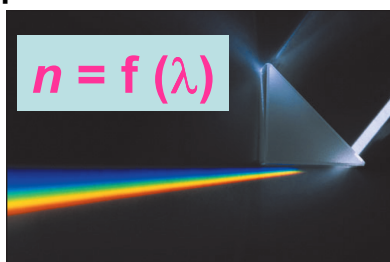
$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta = \text{áll.}$$

vagy

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{c_1}{c_2}$$

a második közegnek az elsőre vonatkoztatott **relatív törésmutatója**

**Diszperzió:** a törésmutató hullámhosszfüggése



**normális** diszperzió:

$$\frac{dn}{d\lambda} < 0$$

**anomális** diszperzió:

$$\frac{dn}{d\lambda} > 0$$

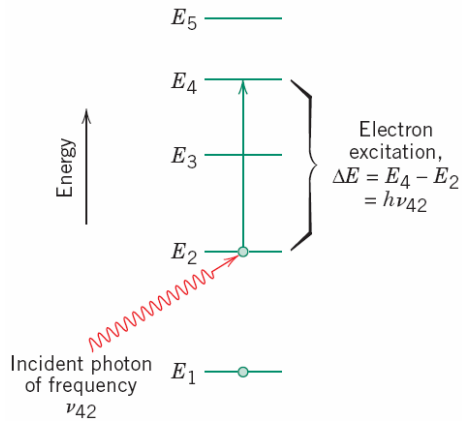
empirikus összefüggések (Cauchy, Sellmeier formulák)

X/8

# Elektronátmenetek: abszorpció és emisszió

Fényelnyelés nem csak a polarizációval történhet.

A fényelnyelés egy izolált atom esetén szemléltetve



Egy  $h\nu$  energiájú foton **abszorpciója**:

A betöltött  $E_2$  és az üres  $E_4$  energiaszintek  $\Delta E$  különbsége éppen egyenlő a foton  $h\nu$  energiájával.

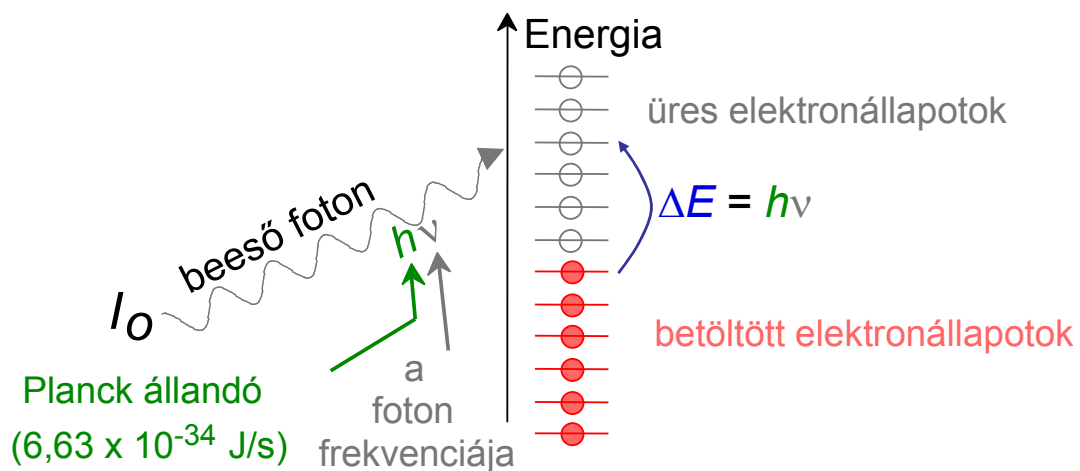
Az elektron nem marad gerjesztett állapotban:

relaxáció  $\Rightarrow$  foton **emisszió**.

X/9

## FÉMEK

# A fémek optikai tulajdonságai: abszorpció



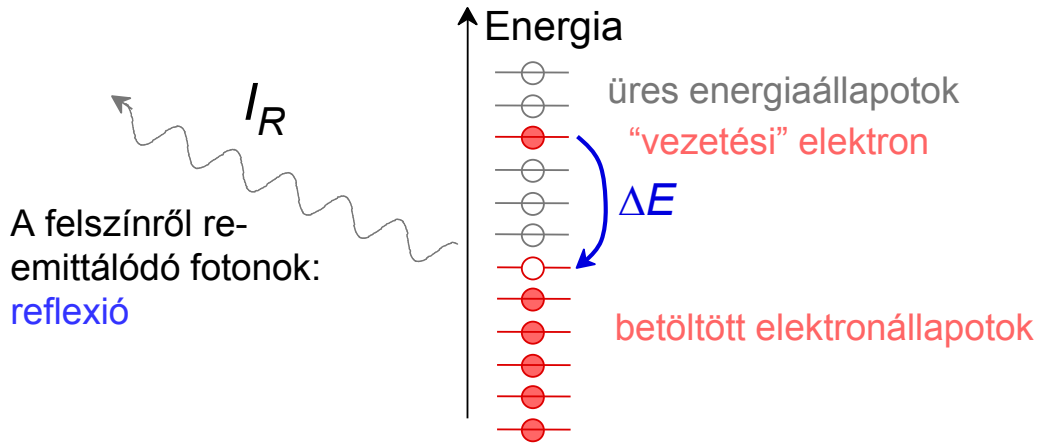
Vezetési sáv: részlegesen betöltött. Mivel az üres elektronállapotok kontinuumot alkotnak, a fémek az alacsony frekvenciáktól az UV-ig mindent elnyelnek. Mégpedig egy vékony felszíni rétegben ( $d < 100 \text{ nm}$ ).

Ugyanakkor átlátszóak a röntgen és gamma fotonokra.

X/10

# A fémek optikai tulajdonságai: reflexió

Az elektron relaxációja (nagy valószínűséggel) ugyanolyan frekvenciájú foton emisszióját eredményezi.



Reflexióképesség:  $0,90 < I_R/I_o < 0,95$ .  $R=R(\lambda)$ !

X/11

## Színek

**Arany**

$\lambda$	R	% Reflectivity
400 nm	24.90	
420 nm	26.50	
440 nm	28.10	
460 nm	31.60	
480 nm	39.00	
500 nm	49.50	
520 nm	57.80	
540 nm	63.40	
560 nm	67.80	
580 nm	71.00	
600 nm	73.80	
620 nm	76.10	
640 nm	78.20	
660 nm	80.10	
680 nm	81.90	
700 nm	83.60	

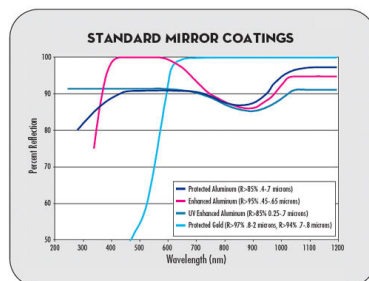
**Réz**

$\lambda$	R	% Reflectivity
400 nm	35.20	
420 nm	37.70	
440 nm	40.20	
460 nm	42.20	
480 nm	43.80	
500 nm	45.00	
520 nm	46.00	
540 nm	47.60	
560 nm	52.60	
580 nm	63.90	
600 nm	71.00	
620 nm	75.40	
640 nm	78.50	
660 nm	81.00	
680 nm	83.20	
700 nm	85.20	

**Ezüst**

$\lambda$	R	% Reflectivity
400 nm	69.80	
420 nm	71.00	
440 nm	73.20	
460 nm	75.00	
480 nm	76.80	
500 nm	78.20	
520 nm	79.50	
540 nm	80.80	
560 nm	81.70	
580 nm	82.50	
600 nm	83.20	
620 nm	84.00	
640 nm	84.60	
660 nm	85.20	
680 nm	86.00	
700 nm	86.50	

A reflexió során változik a spektrumszín aránya  $\Rightarrow$  ha fehér fény esik rájuk, akkor nem fehéret vernek vissza.



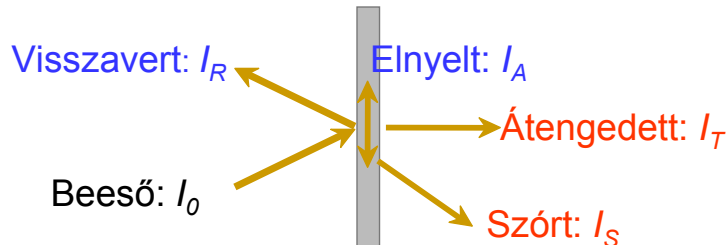
A reflexió során alig változik a spektrumszín aránya  $\Rightarrow$  a ráeső fénygel azonos (szín)összetételű fényt ver vissza.

Optikai minőségű Al és Au tükör reflexió spektrumai

X/12

# A nem-fémes anyagok optikai tulajdonságai

A különbség: (bizonyos spektrumtartományokban) az anyag átlátszó.  
Az abszorpció két lehetséges mechanizmusa:  
polarizáció és vegyértéksáv-vezetési sáv átmenet.



Szigetelők, félvezetők

# A fény törése

Az (átlátszó) anyagba belépő fény sebessége lecsökken, ennek megfelelően a határfelületen a sugár megtörik:

$$n = \frac{c}{v}$$

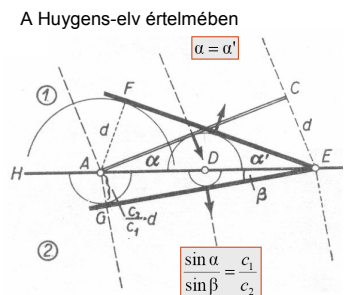
$c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$ , ahol  $\epsilon_0$  ( $= 8,855 \cdot 10^{-12}$  As/Vm) a vákuum (1) permittivitása és  $\mu_0$  ( $= 1,256 \cdot 10^{-8}$  Vs/Am) a vákuum permeabilitása.  
analog módon:  $v = (\epsilon \mu)^{-1/2}$ , ahol  $\epsilon$  és  $\mu$  a (2) közeg anyagának permittivitása, illetve permeabilitása.

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad \mu = \mu_r \mu_0$$

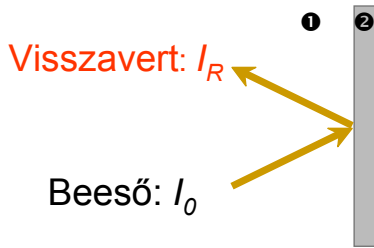
$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} = (\epsilon_r \mu_r)^{1/2}$$

ahol  $\epsilon_r$  az anyag relatív dielektromos állandója, míg  $\mu_r$  a relatív mágneses permeabilitás.  
Mivel a nemfémes anyagok többségére  $\mu_r \approx 1$ ,

$$n \approx \sqrt{\epsilon_r} = (\epsilon_r)^{1/2}$$



# Visszaverődés, reflexió, R



$$R = I_R / I_0.$$

Fresnel-formulák

Merőleges beesés esetén

$$R = \left( \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} \right)^2$$

Ha a fénysugár levegőből ( $n \approx 1$ ) lép be az anyagba

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

Minél nagyobb az  $n$ , annál nagyobb a reflexió.

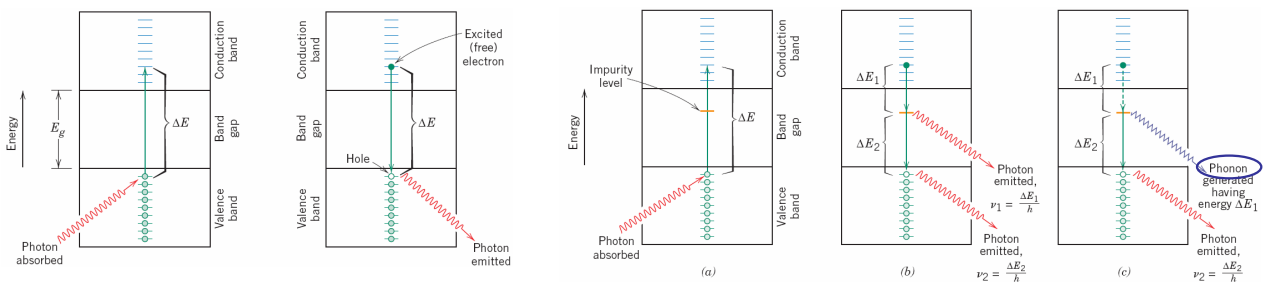
Példák:

Optikai üveg:  $n = 1,46$   
 $R = 0,035$ , azaz 3,5%.

Gyémánt:  $n = 2,41$   
 $R = 0,17$ , azaz 17%.

Anyagszabászat: antireflexiós rétegek

# Abszorpció, A



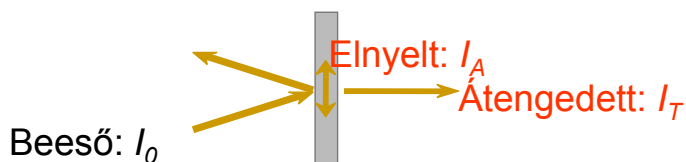
Ha  $E_g < 1,8 \text{ eV}$  ( $\lambda = 700 \text{ nm}$ ), elnyelés a teljes látható tartományban.

Az anyag fekete: pl. Si, GaAs

Ha  $E_g > 3,1 \text{ eV}$  ( $\lambda = 400 \text{ nm}$ ), nincs abszorpció a látható tartományban.

Az anyag színtelen, átlátszó: üveg, kvarcüveg, gyémánt

Ha  $E_g$  e két határérték között van, az anyag a látható tartomány egy részében átlátszó/abszorbeáló: színes



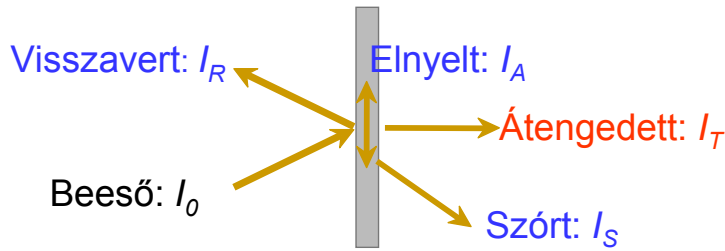
$$I_T = I_0' e^{-\beta x}$$

ahol  $\beta$  [ $\text{cm}^{-1}$ ]

az abszorpciók együttható



# Transzmisszió, T



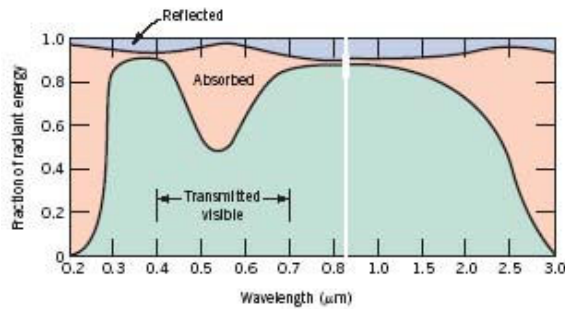
Tudjuk, hogy

$$R = I_R/I_0 \text{ és } I_T = I_0' e^{-\beta x}$$

ahol  $I_0' = I_0 - I_R$ .

Amiből az áthaladás után:

$$I_T = I_0(1-R)^2 e^{-\beta x}$$



# Színek

Az anyag színét az átengedett és a re-emittált fény együttesen határozza meg.

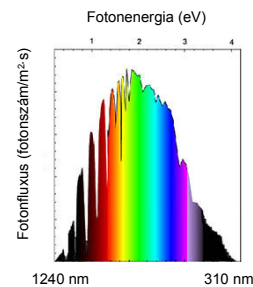
Kadmium szulfid (CdS)



--  $E_g = 2,4 \text{ eV}$  →

-- a **kékben** és **ibolyában** elnyel, →

-- a **vörös/narancs/sárgát** átengedi, ez adja a színét.



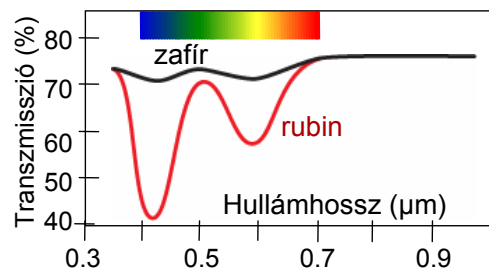
**Rubin** = zafír ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) + (0,5 - 2) at%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$

-- a zafír színtelen

( $E_{gap} > 3.1\text{eV}$ )

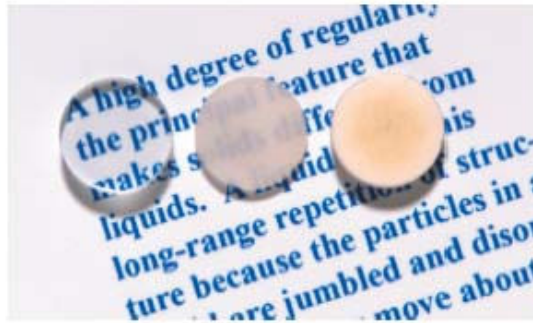
-- a  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  hozzáadása:

- abszorpciós centrumok
- kékben/sárgában/zöldben elnyelővé válik
- a vöröset átengedi
- Az eredmény: a **rubin** mélyvörös.



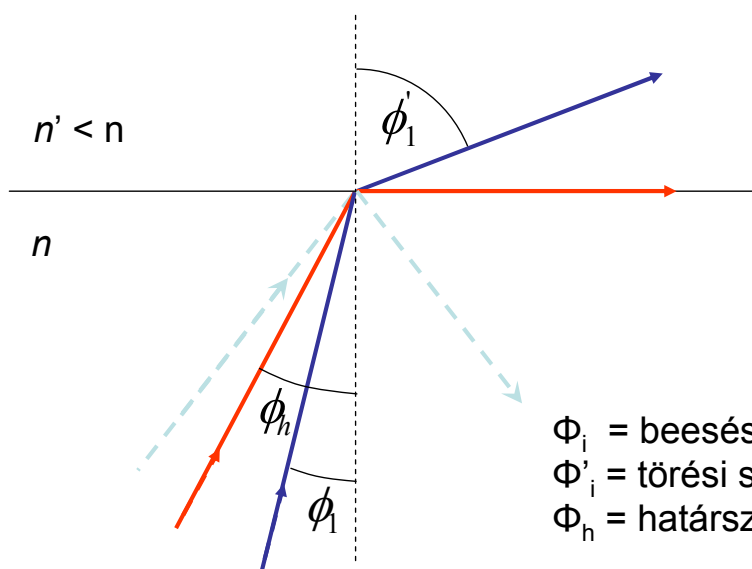
# Szórás

Jellemzően a polikristályos anyagokban, illetve préselt (pasztillázott) mintákban, polimerekben.



X/19

## Teljes visszaverődés



*Emlékeztető:*  
A beesési szög szinuszja egyenesen arányos a törési szög szinuszával. Az arányossági tényező a második közegnek az elsőre vonatkoztatott [törésmutatója](#)

$\phi_i$  = beesési szög  
 $\phi_1$  = törési szög  
 $\phi_h$  = határszög

$$\frac{n'}{n} = \frac{\sin \phi_i}{\sin \phi_1}$$

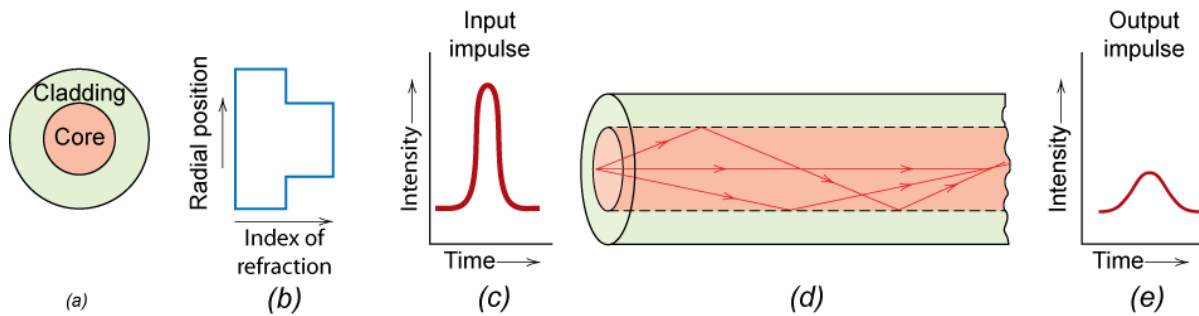
$\phi_h$ -nél  $\phi_1 = 90^\circ$

$\phi_i > \phi_h$ : teljes visszaverődés

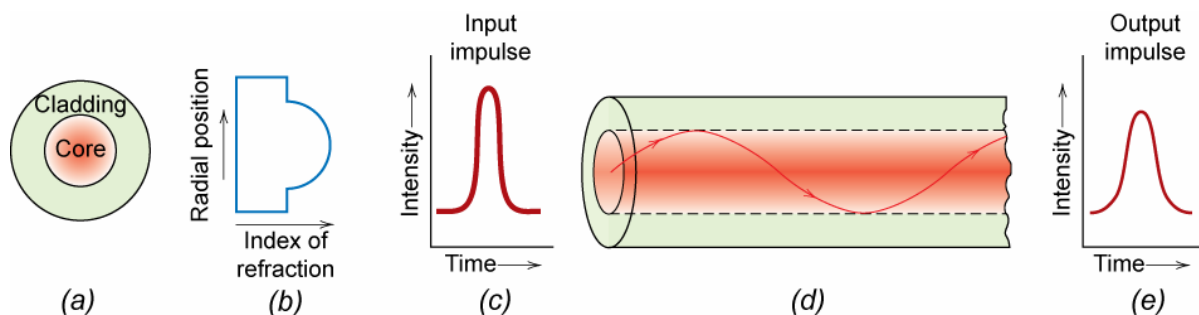
X/20

# Optikai szál profilkok

## Lépcsős indexű (step-index)



## Folytonosan változó indexű (graded-index)



X/21

# Szálcsillapítás

Mi okozza?

### Szórás (80-90%)

Rayleigh:  $d \ll \lambda$ , Mie:  $d > 0.6 \lambda$

### Abszorpciós csillapítás (10-20%)

fém ionok ( $\text{Cr}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ , ...),

OH<sup>-</sup>: 0,72; 0,95; 1,24; 1,38; 2,7; 4,2  $\mu\text{m}$

### Sugárzási veszteség

- nagy hullámhossznál és kis magátmérőnél
- már nagy görbületi sugarú hajlítás esetén is jelentkezik.

Mitől függ a mértéke?

Anyagfüggő ( $\text{SiO}_2$  vagy polimer alapú)

Hozzákevert adalékanyagok

Gyártás során bekerülő

szennyezőanyagok

A molekulák a saját rezgési

hullámhosszokon érkező fotont elnyelik

Hullámhosszfüggő csillapítás

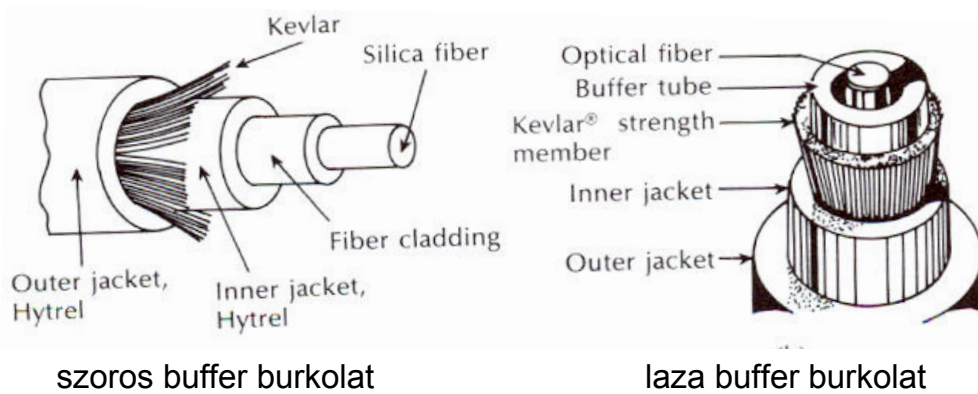
A távközlési cél: 850nm 2dB/km,

1300nm 0,4dB/km , 1550nm 0,2dB/km.

Decibel (dB): két mennyiség arányának mértéke (dimenzió nélküli):  $X_{\text{dB}} = 10 \log_{10}(X/X_0)$ , ahol  $X_0$ , a referenciaszint, rendszerint egységnyi. 2dB: 1,58 0,4dB: 1,096 0,2dB: 1,047

X/22

# Az optikai szál “üvegszál”



## Átmérők:

Mag (core): 6-60  $\mu\text{m}$ , köpeny (cladding): 125  $\mu\text{m}$ , primer bevonat: 250  $\mu\text{m}$ ,  
szekunder bevonat: 1000  $\mu\text{m}$ , védőcső: 1-2 mm