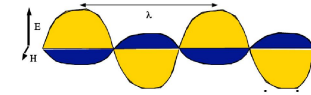


10. Materiens optiska egenskaper

[Callister, etc.]

10.0 Grunder: upprepning av elektromagnetism

- Ljus är en elektromagnetisk våg



$$E = E_0 \exp[-i(kx - \omega t)]$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (\lambda = \text{wavelength})$$

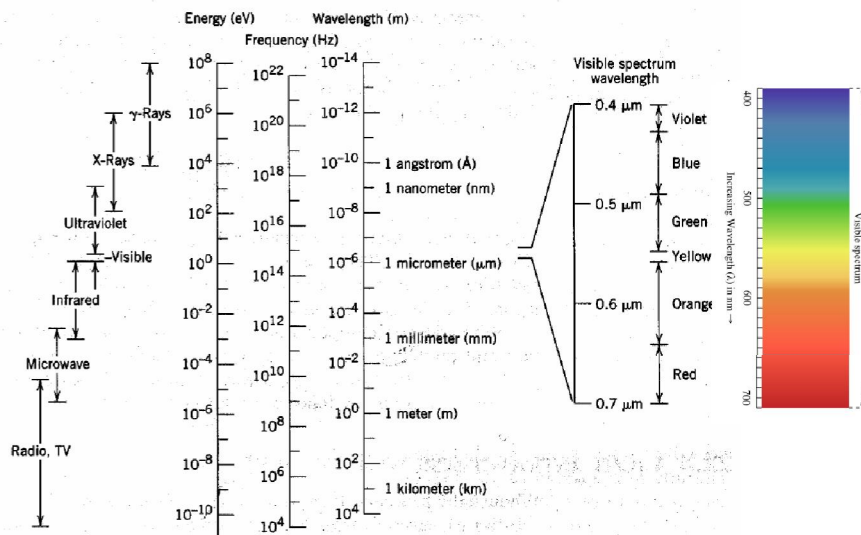
$$\omega = 2\pi\nu \quad (\nu = \text{frequency})$$

$$\frac{\omega}{k} = \nu\lambda = c \quad c = \text{speed}$$

- λ våglängd, ν våglängd, k vågtal, c hastighet, E elfält, H magnetfält
- Men kan enligt kvantmekaniken också förstås som en partikel, fotonen!

$$\epsilon = h\nu = \hbar\omega$$

Det elektromagnetiska spektret

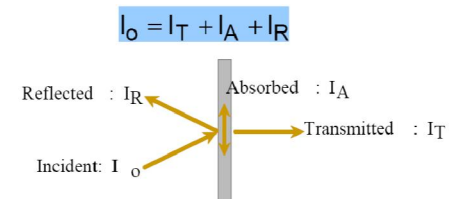


10.1 Växelverkan mellan ljus och materia

- Vad kan ljus göra då den växelverkar med materia?

- Den kan:

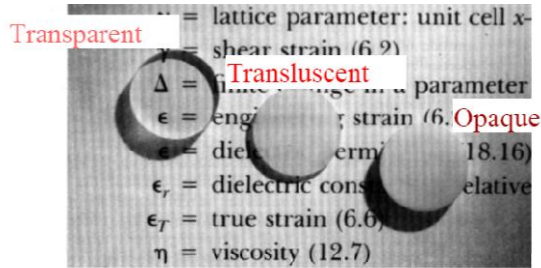
- Reflekteras
- Attenueras (absorberas)
- Transmitteras





10.1 Växelverkan mellan ljus och materia

- Material klassificeras enligt hur detta sker
 - Genomskinlig (transparent)
 - Genomlysande (translucent)
 - T.ex. s.k. mjölkglas som används i toaletter mm.
 - Ogenomskinlig (opaque)

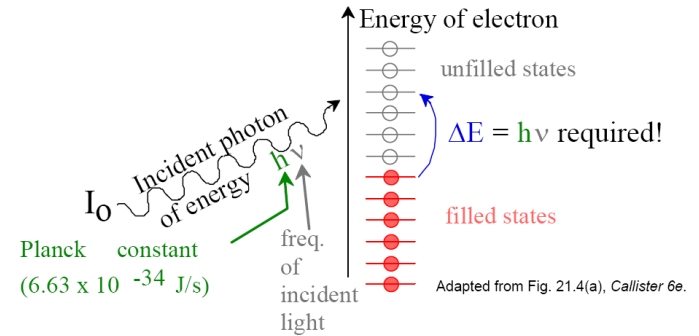


Adapted from Fig. 21.10, Callister 6e. (Fig. 21.10 is by J. Telford, with specimen preparation by P.A. Lessing.)



10.1 Växelverkan mellan ljus och materia

- Vad bestämmer vad som sker?
- Ljus växelverkar i allmänhet främst med elektroner i materialet



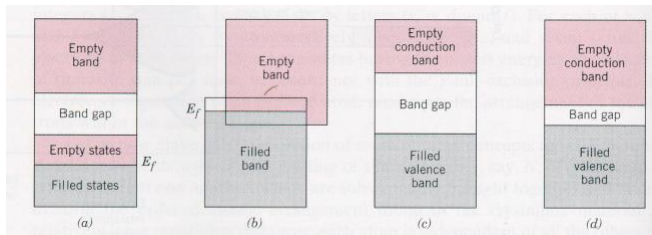
Adapted from Fig. 21.4(a), Callister 6e.



10.2 Bandstrukturen

- För att en foton med energin $E = h\nu$ skall kunna absorberas, måste en elektronisk transition med energin ΔE vara möjlig!
- Bandstrukturen har därmed en central roll i att bestämma vad som sker!

- Jämför kapitel 8:



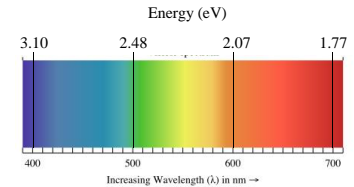
- Ifall materialet har ett bandgap, är vissa transitionsenergier ΔE omöjliga => materialet är genomskinligt för dessa energier!!



10.2 Bandstrukturens roll

- Med denna enkla insikt och jämförelse med det synliga ljusets spektrum kan vi genast lista ut huruvida vissa material är genomskinliga eller inte!

- Och tom. färgen i vissa fall

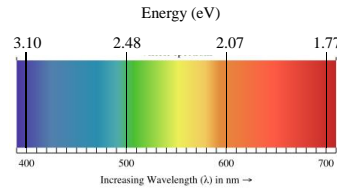


- Metaller: alla ΔE möjliga, ogenomskinliga
- Isolatorer har $\Delta E > 3 \text{ eV}$ och är därmed genomskinliga för synligt ljus
- Halvedare kan vara genomskinliga eller ogenomskinliga beroende på bandgapets storlek

10.2 Bandstrukturens roll

- Exempel på några bandgap (Wikipedia)

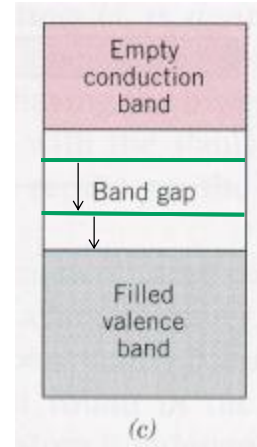
| Material | Bandgap (eV) |
|------------------|--------------|
| C (grafit) | 0.0 |
| C (diamant) | 5.5 |
| Si | 1.1 |
| Ge | 0.67 |
| SiC | 2.86 |
| GaAs | 1.43 |
| GaS | 2.5 |
| GaN | 3.4 |
| ZnO | 3.37 |
| SiO ₂ | 9.65* |



- Vilka av dessa kan antas vara genomskinliga?

Rollen av orenheter

- Enligt denna tabell borde t.ex. diamant och kvarts vara helt genomskinligt – men ändå kan ju diamant och glas ha ett stort antal olika färger??
- Förklaringen ges av defekter och orenheter!
 - Dessa kan ge upphov till diskreta energitillstånd i bandgapet, mellan vilka optiska transitioner kan ske vid en bestämd färg



Rollen av orenheter

- Med att dopa kristallen med lämpliga orenheter, kan man få dem att ha önskad färg

- Exempel: färgskala hos kvarts-kristaller



10.3 Ljusets reflektion och brytning

- Materialets optiska respons för genomskinliga material bestäms av dess refraktionsindex n
- Men det gäller också att ljusets hastighet v är långsammare i ett medium med en permittivitet ϵ som avviker från den i vakuum, enligt

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

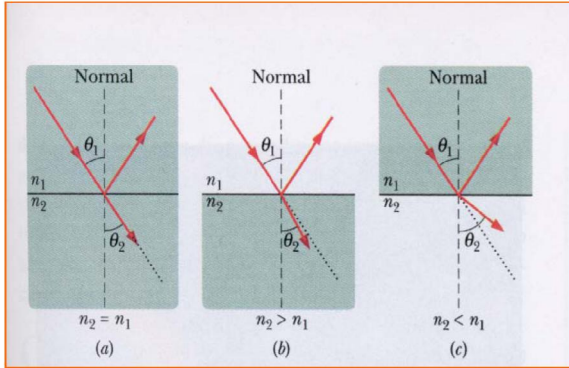
$$n = \frac{c}{v}, \quad v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\sqrt{\epsilon \mu}}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \cong \sqrt{\epsilon_r}$$

- ϵ = permittivitet, ϵ_r = relativ permittivitet, μ = permeabilitet, ϵ_0 = vakuums permittivitet, μ_0 = vakuums permeabilitet

10.3 Ljusets reflektion och brytning – Snells lag

- I genomskinliga material följer ljusets brytning Snells lag
 - Detta går igenom i detalj på elektrodynamik-kurserna

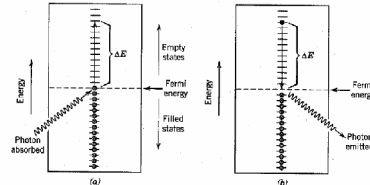


| Material | n |
|-----------------|------|
| Lead glass | 2.1 |
| Silica glass | 1.46 |
| Soda-lime glass | 1.51 |
| Quartz | 1.55 |
| Plexiglas | 1.49 |
| Polypropylene | 1.49 |

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$$

Ljusets reflektion från metaller

- Metaller är ogenomskinliga – men reflekterar ljus bra
 - Varför?
 - Orsaken hänger också ihop med bandgapet:



- (a) Absorption of a photon for metallic materials in which an electron is excited into a high-energy unoccupied state.
- (b) Reemission of a photon by the direct transition of an electron from a high to a low energy state.

OPTICAL PROPERTIES OF METALS: REFLECTION

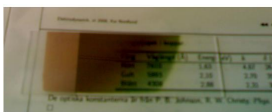
- Electron transition emits a photon.
 - re-emitted photon from material surface
- Reflectivity = I_R/I_0 is between 0.90 and 0.95.
- Reflected light is same frequency as incident.
- Metals appear reflective (shiny)!

10.4 Attenuation

- I metaller (och andra fall där ljuset attenueras) tränger ljus nog fortfarande in i materialet, men bara till ett visst djup
- Detta kan i elektrodynamiken beskrivas med ett komplex-värdt refraktionsindex $\tilde{n} = n + ik$ som leder till att en elektromagnetisk våg försvagas, **attenueras** i materialet som

$$\tilde{\mathbf{E}} = \tilde{\mathbf{E}}_0 e^{-u/\delta}$$

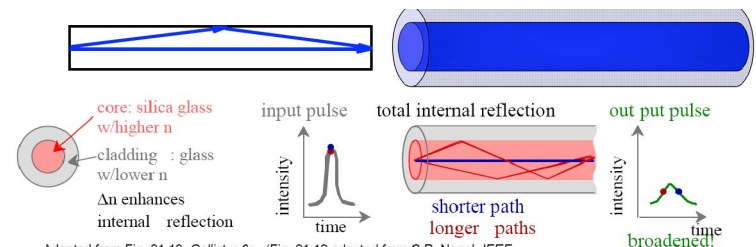
- Här är δ det s.k. inträngningsdjupet
- Exempel för Cu:
 - Om Cu-lagret är nm-tunn, får Cu olika färger!



| Färg | Våglängd (Å) | Energi (eV) | k | δ (nm) |
|-------|--------------|-------------|------|---------------|
| Rött | 7610 | 1,63 | 4,67 | 26 |
| Gult | 5893 | 2,10 | 2,70 | 35 |
| Blått | 4308 | 2,88 | 2,31 | 30 |

10.5. Optiska vågledare (waveguide)

- Om man tillverkar en fiber av två olika material med lämpligt valt förhållande mellan refraktionsindexerna, kan man få ljus att röra sig oändligt långt inne i fibern, också om den böjs
 - Bara böjningsvinkeln inte är alltför stor!
 - Fenomenet kallas total intern reflektion
- Detta kallas en optisk fiber, och är grunden för all modern telekommunikation!





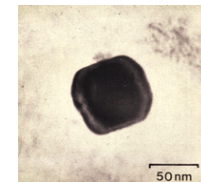
10.6 Nanomaterials optiska egenskaper

- Nanomaterial har speciellt intressanta optiska egenskaper
- Detta har flera orsaker:
 - Materialet kan vara tunnare än inträngningsdjupet, jfr. ovan
 - Då objekt är i nanoskala, ändras deras elektroniska struktur och bandgap
 - Kvantinfångning gör tillståndstätheten diskret
 - Metallnanopartiklar kan ha plasmon.excitationer som har diskrete absorptions- och emissions-pikar
 - Rayleigh-spridning ändras drastiskt på nanoskala



Lycurgus-vasen

- Den första kända tillämpningen av nanopartiklars optiska egenskaper är den s.k. Lycurgus-vasen från 300-taler e.Kr!
- Denna ändrar färg beroende på om den belyses framifrån eller bakifrån!
 - Orsaken är ickelinjära plasmon-oskillationer i Au/Ag-nanopartiklar inne i dem!



God jul!



... med en julgran av färgad kvarts!