



530117 Material fysik vt 2010

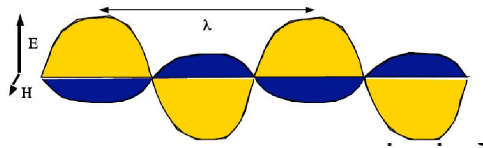
10. Materiens optiska egenskaper

[Callister, etc.]



10.0 Grunder: upprepning av elektromagnetism

- Ljus är en elektromagnetisk våg



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

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

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

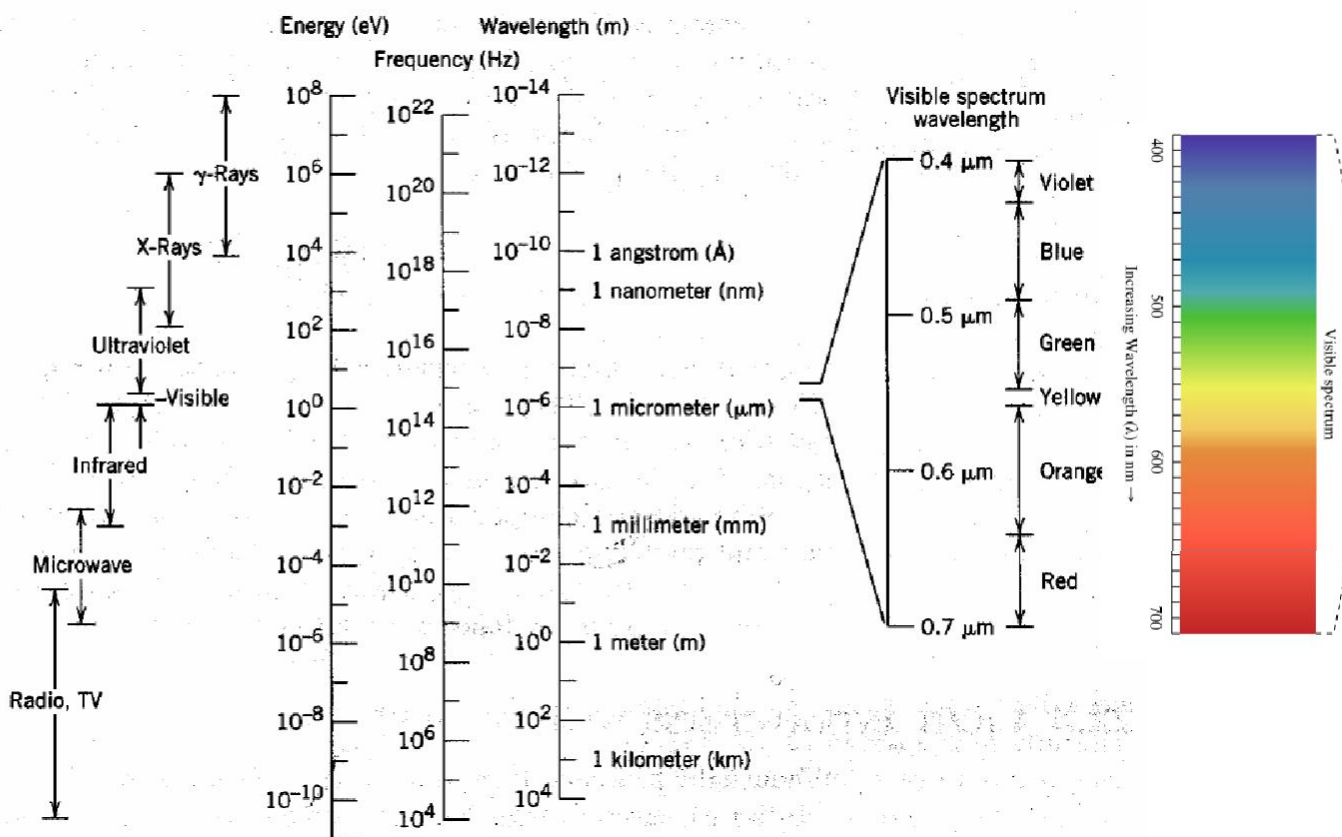
$$\frac{\omega}{k} = \nu\lambda = c \quad c = \text{speed}$$

- 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



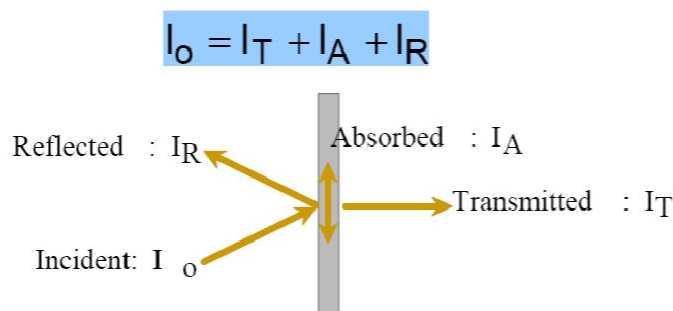
Materialfysik 2010 – Kai Nordlund

3



10.1 Växelverkan mellan ljus och materia

- Vad kan ljus göra då den växelverkar med materia?
- Den kan:
 - Reflekteras
 - Attenueras (absorberas)
 - Transmitteras



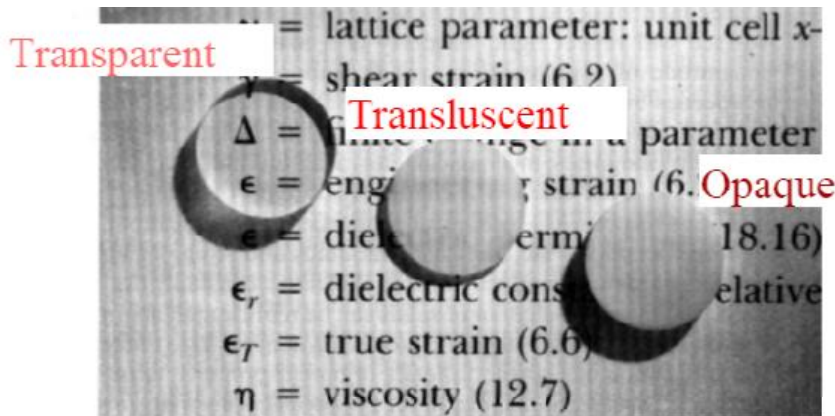
Materialfysik 2010 – Kai Nordlund

4



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)

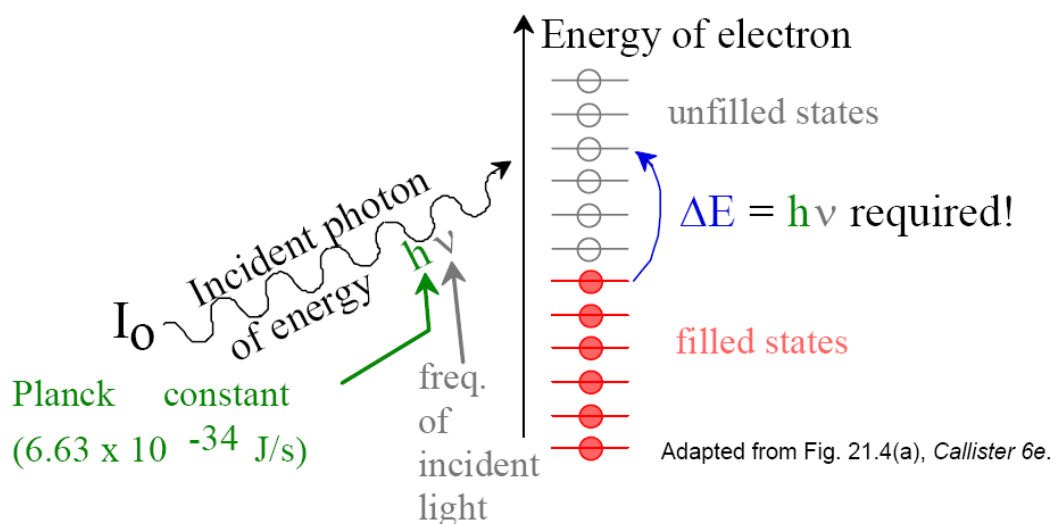


Adapted from Fig. 21.10, *Callister 6e*. (Fig. 21.10 is by J. Telford, with specimen preparation by P.A. Lessing.)



10.1 Växelverkan mellan ljus och materia

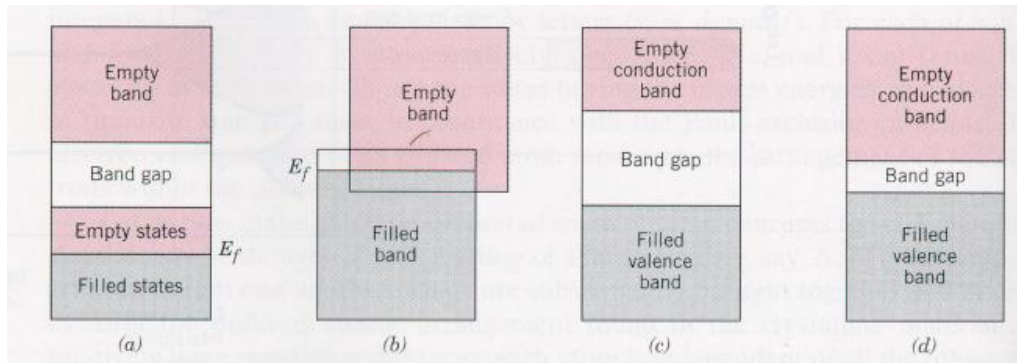
- Vad bestämmer vad som sker?
- Ljus växelverkar i allmänhet främst med elektroner i materialet





10.2 Bandstrukturen

- För att en foton med energin $E = hv$ 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:

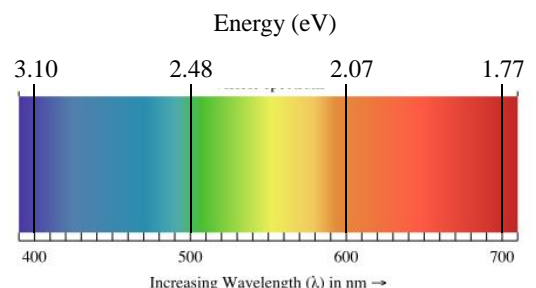


- Ifall materialet har ett bandgap, är vissa transitionsenergier ΔE omöjliga => materialet är genomskinligt för dessa energier!!



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



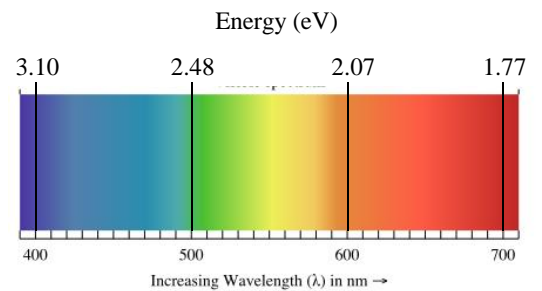
- Metaller: alla ΔE möjliga, ogenomskinliga
- Isolatorer har $\Delta E > 3 \text{ eV}$ och är därmed genomskinliga för synligt ljus
- Halveledare kan vara genomskinliga eller ogenomskinliga beroende på bandgapets storlek



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*

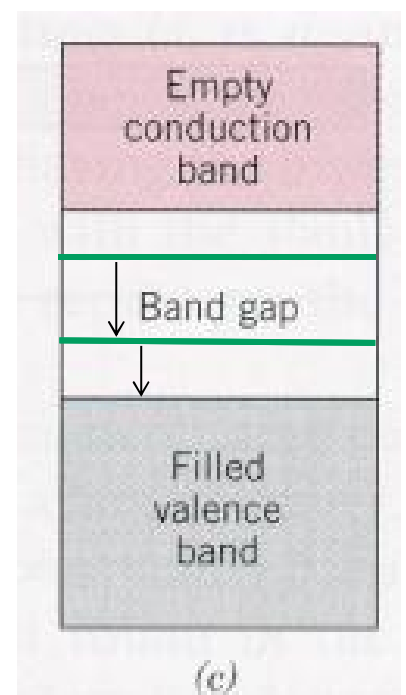


- Vilka av dessa kan antas vara genomskinliga?



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



Materialfysik 2010 – Kai Nordlund

http://gabyworld.com/index.php?option=com_content&task=view&id=16&Itemid=27

11



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

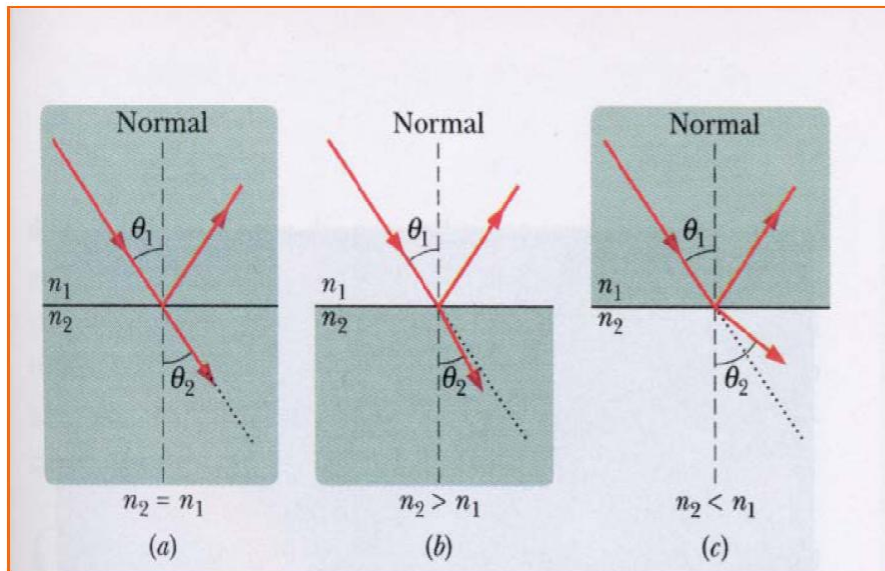
Materialfysik 2010 – Kai Nordlund

12



10.3 Ljusets reflektion och brytning – Snells lag

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



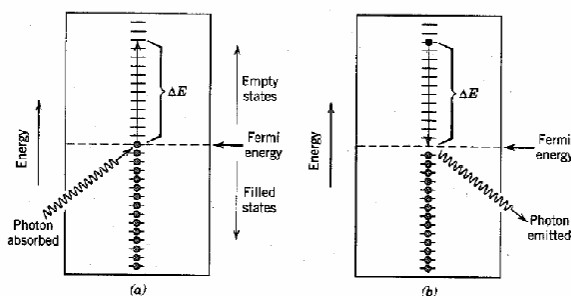
Material	n
Lead glass	2.1
Silica glass	1.46
Soda-lime glass	1.51
Quartz	1.55
Plexiglas	1.49
Polypropylene	1.49

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



Ljusets reflektion från metaller

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

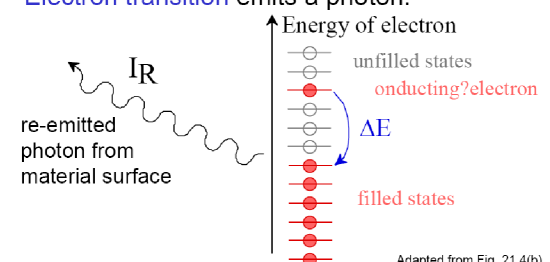


(a) Absorption of a photon for metallic materials in which an electron is excited into a high-energy unoccupied state.

(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.



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

- Reflectivity = I_R/I_0 is between 0.90 and 0.95.
- Reflected light is same frequency as incident.
- Metals appear reflective (shiny)!

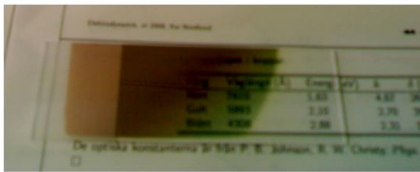


10.4 Attenuation

- 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 refreaktionsindex $\tilde{n} = n + ik$ 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

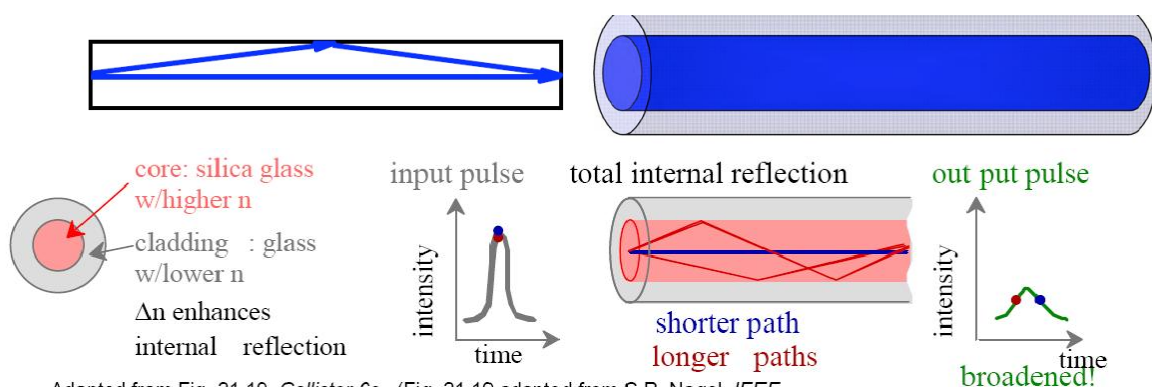
Materialfysik 20 [Vladimir Touboltsev, Helsingfors Universitet 2010. Bild av Kai Nordlund.]

15



10.5. Optiska vågledare (waveguide)

- Om man tillverkar en fiber av två olika material med lämpligt valt förhållande mellan refraktionsindexena, 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!



Materialfysik:

Adapted from Fig. 21.19, Callister 6e. (Fig. 21.19 adapted from S.R. Nagel, *IEEE Communications Magazine*, Vol. 25, No. 4, p. 34, 1987.)

16



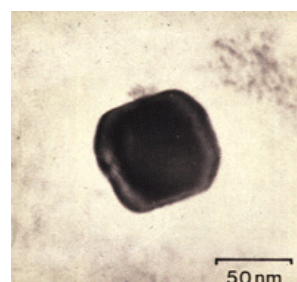
10.6 Nanomaterials optiska egenskaper

- 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!