

SRP-opgave. Optisk interferens og refleksion fra overflader

Dette SRP-oplæg giver dig mulighed for at arbejde med interferens af lys. Du får en introduktion til lys som elektromagnetiske bølger og hvordan lys reflekteres fra overflader. Lys og dets refleksion og brydning i grænseflader indgår overalt i de teknologiske produkter vi omgiver os med. Ud over optiske komponenter som linser, skærme i computere og telefoner og belysning er store dele af vores internet baseret på optiske komponenter med optiske egenskaber tilpasset deres funktion. Det er derfor vigtigt 1) at kunne designe refleksionsegenskaber teoretisk, 2) at kunne fremstille de designede overflader og 3) at kunne verificere designet gennem målinger. Dette oplæg til SPR-opgave tager dig gennem alle 3 elementer ved anvendelser af refleksioner af lys. På AAU's SRP-dage kan du (1) udføre eksperimenter, (2) få måledata med hjem og (3) høre et foredrag om teorien på gymnasieniveau. En AAU-forsker vil hjælpe med eksperiment og dataopsamling, samt holde foredraget.

Teori:

Lys er elektromagnetiske bølger, hvis bevægelse styres af en bølgeligning i lighed med det, der kendes fra andre bølger så som lyd og bølger på vandoverflader. Baggrunden for bølgeligningen er Maxwells ligninger, som kan sammensættes til følgende differentialligning for det elektriske felt $\vec{E}$

$$\nabla^2 \vec{E} - n^2 \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

Her er n materialets brydningsindeks og $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ er lysets hastighed i vakuum.

Den simpleste beskrivelse af lyset fås ved at repræsentere det elektriske felt ved en plan monokromatisk bølge med den cykliske frekvens ω : $\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0(\omega) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}$.

Ved at indsætte i bølgeligningen ses at den plane bølge er en løsning hvis $k = n\omega/c = n2\pi/\lambda$, hvor λ er lysets bølgelængde.

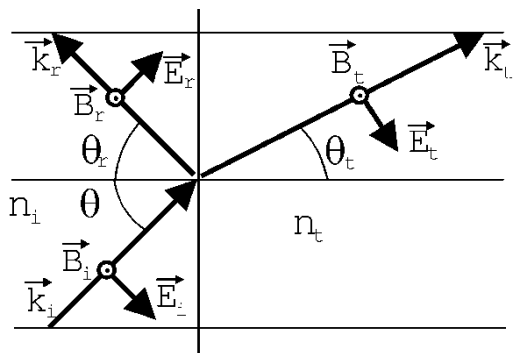
Det elektriske felt er en reel fysisk størrelse. Den komplekse eksponentielle form er imidlertid en praktisk matematisk repræsentation, blot skal man huske, at kun realdelen giver fysisk mening. Formalismen kan også beskrive dæmpning i materialet. Lad os indføre et komplekst brydningsindeks på formen

$$n = n' - i\kappa, \quad (2)$$

hvorved også bølgetallet k bliver kompleks. Betragtes udbredelse langs x-aksen får ligningen for feltet dermed formen

$$\vec{E}(\vec{r}, t) = \vec{E}_0 e^{-\omega/\kappa x} e^{i(n\omega/c x - \omega t)}. \quad (3)$$

Det ses at imaginærdelen af brydningsindekset beskriver materialets dæmpning mens realdelen beskriver bølgeudbredelsen. Elektromagnetiske bølger, beskrevet ved elektriske felter, er polariseret, fx med feltet svingende i en bestemt retning. Det betegnes ved, at lyset er polariseret. Når en lysstråle rammer en overflade og reflekteres, danner den indsendte og reflekterede stråle en plan kaldet indfaldsplanen. Alle



polarisationer af lyset kan beskrives som en superposition af lys med feltet polariseret i indfaldsplanen og vinkelret på indfaldsplanen. Det er illustreret på figuren herunder. For at beskrive refleksion ved grænseflader skal grænsebetingelserne for felterne benyttes: Tangential komponenten (E_t) af $\vec{E}$ og normal komponenten (B_n) af det tilhørende magnetfelt $\vec{B}$ er kontinuert ved grænseflader. Det fører direkte til

$$n_i \frac{\omega}{c} \sin \theta = n_i \frac{\omega}{c} \sin \theta_r = n_t \frac{\omega}{c} \sin \theta_t.$$

Dermed fås refleksionsloven: $\theta_r = \theta$ og brydningsloven (Snell's lov)

$$n_i \sin \theta = n_t \sin \theta_t. \quad (4)$$

Endvidere kan vi beregne forholdet mellem det reflekterede og det indsendte felt og tilsvarende mellem det transmitterede og indsendte felt. Det gøres for lys polariseret henholdsvis i indfaldsplanen (P-polariseret) og vinkelret på indfaldsplanen (S-polariseret). Forholdene bliver for p-polarisation

$$r_p = \frac{n^2 \cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{n^2 \cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}} \quad (5)$$

og tilsvarende for s-polarisation

$$r_s = \frac{\cos \theta - \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}}. \quad (6)$$

Refleksionskoefficienterne (19)-(22) er komplekse størrelser hvis materialet er absorberende (n kompleks). De indeholder altså både ændring i størrelse og fase af det reflekterede lys i forhold til det indsendte. Det er imidlertid ikke det elektriske felt, men intensiteten givet ved

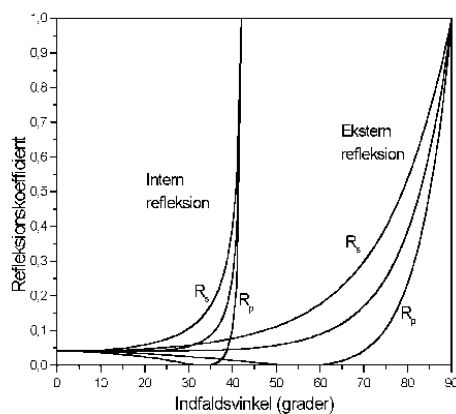
$$I = n \frac{\epsilon_0 c}{2} |E|^2, \quad (7)$$

Energi-refleksionskoefficienten defineres ved

$$R_{p,s} = |r_{p,s}|^2 \quad (8)$$

Refleksionskoefficienterne for både luft/glas (ekstern) og glas/luft (intern) grænseflader er vist på figuren herunder. Også middelværdien af R_p og R_s , som kan benyttes til at beskrive upolariseret lys er vist. Over den

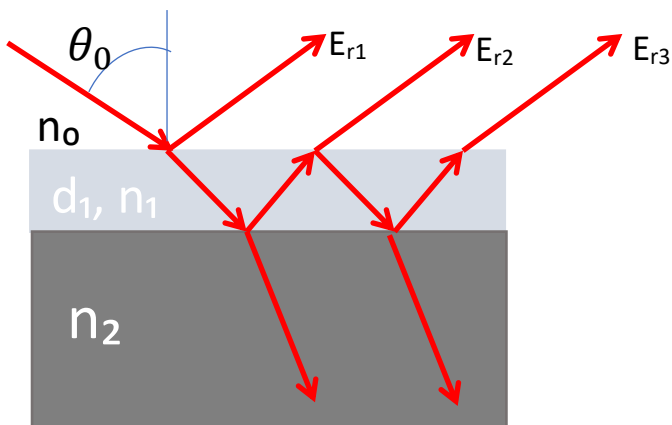
kritiske vinkel ($\sim 42^\circ$) reflekteres lyset 100% ved total intern refleksion. I dette tilfælde er $n = \frac{n_t}{n_i} < 1$ og $\sqrt{n^2 - \sin^2 \theta}$ bliver kompleks når indfaldsvinklen overstiger den kritiske vinkel. Refleksionskoefficienten er



dermed også kompleks, men har størrelsen 1. Den komplekse refleksionskoefficient betyder at feltet har en eksponentiel dæmpet hale, som strækker sig $\sim$ bølgelængden ud i luften.

Multiple refleksioner

Det simpleste eksempel på multipel refleksion er et enkelt gennemsigtigt lag på en overflade som vist på



figuren herunder. Lyset vil reflekteres fra overfladen og fra grænsefladen mellem det gennemsigtige lag og substratet. Der er uendelig mange refleksioner, som bliver svagere for hver gang lyset løber frem og tilbage i det gennemsigtige lag. Den samlede refleksion kan beskrives som summen af alle de interfererende refleksioner, hvilket leder til

$$r = \frac{r_{01} + r_{12}e^{-2i\beta}}{1 + r_{01}r_{12}e^{-2i\beta}} \quad (9)$$

hvor

$$\beta = 2\pi d / \lambda \sqrt{n_1^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_0} \quad (10)$$

beskriver faseforskellen mellem to naborefleksioner.

Eksperimenter:

Som et eksempel på en overflade med multiple refleksioner vælger vi at fremstille tynde oxidlag på en silicium krystal – en silicium wafer. Silicium (Si) har et højt brydningsindeks og absorberer synligt lys mens siliciumoxid er transparent med et lavt brydningsindeks. Siliciumoxid kan dannes på Si krystallen ved at varme den op til en høj temperatur i en ovn, fx 1000°C. Dermed diffunderer luftens ilt gennem den allerede dannede oxid til grænsefladen til Si og danner mere oxid. Tykkelsen af oxidlaget kan derfor styres ved den tid hvor prøven udsættes for den høje temperatur.

Målinger af refleksion af en laserstråle fra prøven som funktion af indfaldsvinklen vil give information om tykkelsen af oxiden gennem oscillerende refleksionskoefficienter. Oscillationerne kommer på grund af skiftevis konstruktiv og destruktiv interferens mellem lys reflekteret fra oxidlagets overflade og Si krystallens overflade. Endvidere kan målingerne foretages med lasere med forskellige bølgelængder, hvilket også vil afspejles i refleksionskoefficienterne. Refleksionskoefficienterne vil nemlig afhænge af forholdet mellem tykkelsen af oxidlaget og lysets bølgelængde (se udtrykket for β i ligning 10).