

FYS 2150 – Modul 3

Polarisasjon

Fysisk institutt, Universitetet i Oslo
(Sist endret March 28, 2018)

Vi skal i denne øvelsen studere lineært og sirkulært polarisert lys.

I. POLARISASJONSVEKTORENE

En plan, lineært polarisert lysbølge med polarisasjon $\vec{\epsilon}$ beskrives ved hjelp av funksjonen

$$\vec{\epsilon}(\vec{k}, \sigma) e^{i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)}.$$

Her er $\omega = 2\pi\nu$ vinkelfrekvensen og $k = 2\pi/\lambda$ vinkelbølgetallet, der ν og λ er lysets frekvens og bølgelengde, respektivt. Parameteren σ antar to verdier som spesifiserer to ortogonale enhetsvektorer vinkelrett på \vec{k} . En sirkulært polarisert lysbølge langs z -aksen beskrives ved hjelp av funksjonen

$$\vec{\epsilon}(\vec{k}, \pm) e^{i(kz - \omega t)}$$

der

$$\vec{k} = (0, 0, k) \text{ og } \vec{\epsilon}(\vec{k}, \pm) = \mp \frac{1}{\sqrt{2}}(1, \pm i, 0).$$

I et *birefringent* material som kalsitt kan vi bestemme retningen til lyset slik at $k_x \neq k_y$. Ved $z = 0$ velger vi lineært polarisert lys med $\theta = 45^\circ$ i xy -planet, dvs. $\vec{E}_0 = (\vec{E}_x + \vec{E}_y)/\sqrt{2}$ med

$$\vec{E}_x = (1, 0, 0)e^{-(k_x z - \omega t)} \quad (1)$$

$$\vec{E}_y = (0, 1, 0)e^{-(k_y z - \omega t)}. \quad (2)$$

Etter en avstand d inn i materialet har \vec{E}_x og \vec{E}_y fått en relative fase slik at

$$\vec{E} = \frac{(1, e^{i(k_y d - k_x d)}, 0)}{\sqrt{2}} e^{i(k_x d - \omega t)}.$$

Hvis tykkelsen av materialet d velges slik at $(k_x - k_y)d = \pi/2$ får vi sirkulært polarisert lys for $z \geq d$, dvs.

$$\vec{E} = \frac{(1, i, 0)}{\sqrt{2}} e^{i(k_x d + kz - \omega t)}.$$

Vi setter inn $k_i = 2\pi n_i \lambda_0$, der λ_0 er bølgelengden i vakum og n_i er brytningsindeksen i materialet for lys polarisert langs i -aksen og får uttrykket for tykkelsen av en $\lambda/4$ -plate:

$$d = \frac{\lambda_0}{4(n_x - n_y)}.$$

Hvis vi setter to slike $\lambda/4$ -plater etter hverandre får vi

$$\vec{E} = \frac{(\hat{x} - \hat{y})}{\sqrt{2}} e^{i(k_x d + kz\omega t)}/\sqrt{2},$$

som er lineært polarisert lys med $\theta = -45^\circ$, dvs. rotert med -90° i forhold til den opprinnlige polariseringsretning.

II. POLARISASJONSFILTERET

Et polarisasjonsfilter er utstyrt med en viser som angir transmisjonsretningen for den elektriske vektoren i lyset. Filteret kan roteres i holderen. Når filteret benyttes til å frembringe polarisert lys, kalles det en polarisator. Når det benyttes til å analysere lys, kalles det en analysator. For å forstå hvordan polarisasjonsfilteret kan absorbere lys med den elektriske feltvektoren vinkelrett på transmisjonsretningen, kan det være nyttig å tenke på det mikrobølgefilteret Heinrich Hertz oppfant i 1888. Dette filteret bestod av en rekke tynne parallelle metalltråder utspent over en rektangulær ramme. Den elektriske vektorens komponent langs trådene induserer en strøm i metallet og vil derfor dempes. Filterets transmisjonsretning er vinkelrett på trådene.

Oppgave 1. Upolarisert lys

De fleste lyskilder sender ut upolarisert lys. Undersøk lyset fra en spektrallampe med en analysator og en lysmåler. Tegn en skisse av apparaturen. Den observerte sammenhengen mellom analysatorvinkel og illuminans (belysningsstyrke) i lux angis i en tabell.

Oppgave 2. Malus' lov

To polarisasjonsfiltre og en lysmåler plasseres så tett inntil en spektrallampe som mulig. Mål illuminansen E for følgende verdier av vinkelen mellom transmisjonsretningene til polarisatoren og analysatoren:

$$0^\circ, 10^\circ, 20^\circ, \dots, 90^\circ.$$

Framstill grafisk $E(\theta) - E(90^\circ)$ som funksjon av $\cos^2 \theta$. Trekk en glatt kurve gjennom punktene. Gi en teoretisk begrunnelse for kurvens form.

Tre polarisasjonsfiltre og en lysmåler plasseres så tett inntil en spektrallampe som mulig. Det første filteret innstilles på 0° , det tredje på 90° og det andre på en vinkel θ forskjellig fra 0° og 90° . Hvordan vil illuminansen som registreres av lysmåleren variere med θ ?

Oppgave 3. Refleksjon av polarisert lys

Vi benytter et modifisert spektrometer, som illustrert i figur 1. Prismebordet er utstyrt med en spesiell

mekanisme som sørger for at bordets dreievinkel er halvparten av lysintensitetsmålerens. Ved riktig orientering av prismet vil lys fra laseren reflekteres fra en av prismets sideflater slik at det kan observeres av lysintensitetsmåleren for vilkårlig valg av innfallsvinkel. Et polarisasjonsfilter er montert mellom laseren og prismet.

1. Innstill polarisatorens transmisjonsretning slik at lyset fra laseren blir polarisert vinkelrett på innfallsplanet. I følge Fresnels likninger for refleksjon av polarisert lys, skal den reflekterte strålens intensitet øke jevnt når innfallsvinkelen ϕ varieres fra 0° . Les av lysintensitetsmåleren for ulike verdier av ϕ fra 0° til 90° .
2. Innstill polarisatorens transmisjonsretning slik at lyset fra laseren blir polarisert parallelt med innfallsplanet. I følge Fresnels likninger skal den reflekterte strålens intensitet forsvinne når innfallsvinkelen ϕ er lik den såkalte polarisasjonsvinkelen ϕ_P som er gitt ved $\tan \phi_P = n$, der n er brytningsindeksen til prismeglasset. Dette er Brewsters lov. Forsøk å bestemme n ved å finne den vinkelen ϕ som gir lavest lysintensitet.
3. Finn transmisjonsretningen til polaroidbriller. Be grunn produsentens valg av transmisjonsretning

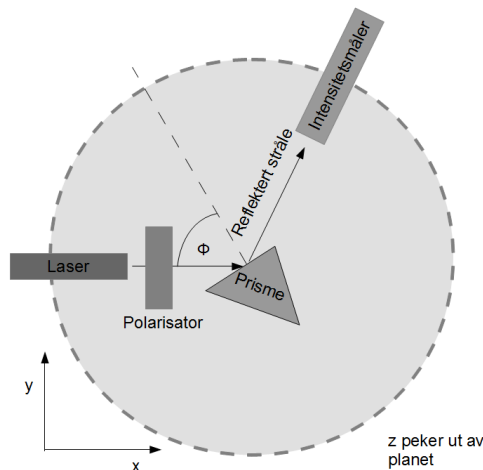


FIG. 1: Oppsettet brukt i oppgave 3: modifisert spektrometer. I stedet for å måle det spredte lyset, måler vi heller den reflekterte strålen.

Oppgave 4. Forsøk med platesats

Følgende komponenter plasseres på den optiske benken:

- en spektrallampe

- en skjerm med horisontal spalte
- en konveks linse
- en glassplatesats
- en analysator
- en hvit skjerm eller mattskive

Avstanden mellom komponentene velges slik at spalten avbildes skarpt på den hvite skjermen.

1. La platesatsen stå vertikalt. Undersøk om illuminansen på den hvite skjermen varierer når analysatoren roteres.
2. Velg platesatsens orientering slik at lysets innfallsvinkel blir lik $\arctan n$, der n er brytningsindeksen til glasset i platene. Undersøk om illuminansen på den hvite skjermen varierer når analysatoren roteres. Hva er årsaken til at lyset som går gjennom platesatsen blir delvis polarisert?

III. KALSITTKRYSTALLENS STRUKTUR

I laboratoriet finnes det en modell som viser kalsitkrySTALLens struktur. Kalsiumionene er representert ved aluminiumsfargede kuler. Karbonatomene og oksygenatomene er representert ved henholdsvis svarte og røde kuler. Vi legger merke til at de tre oksygenatomene i hver CO_3 -gruppe danner en likesidet trekant. Gruppens karbonatom ligger i skjæringspunktet for normalene fra hjørnene til de motstående sidene. Vi legger merke til at atomene i samtlige CO_3 -grupper, "de flate radikaler", ligger i parallelle, ekvidistante plan. Retningen vinkelrett på disse planene kalles krystallens optiske akse.

Oppgave 5. Dobbeltbrytning i kalsitt

1. En kalsitkrySTALL som er skåret slik at den har to parallelle sider vinkelrett på den optiske akse, legges på en tekstsider. Betrakt teksten gjennom krystallen slik at siktelinjen er parallell med den optiske akse. Beskriv ditt inntrykk av bokstavene i teksten.
2. Betrakt den samme teksten gjennom en kalsitkrySTALL som har sin naturlige form. Beskriv ditt inntrykk av bokstavene i teksten.
3. Følgende komponenter plasseres på den optiske benken:
 - en spektrallampe
 - en irisblender
 - en konveks linse
 - en analysator

- en hvit skjerm

Diameteren på irisblenderens apertur innstilles på noen få mm. Avstanden mellom komponentene velges slik at aperturen avbildes skarpt på skjermen. Hold den krystallen du benyttet i punkt 1 mellom linsen og skjermen slik at den optiske akse er parallell med linjen fra aperturen til bildet av aperturen på skjermen. Undersøk om lyset som kommer ut fra krystallen er polarisert. Tegn en skisse av apparaturen.

4. Hold den krystallen du benyttet i punkt 2 mellom linsen og skjermen slik at lysstrålen fra aperturen er vinkelrett på en av krystallens sideflater. Du ser nå to bilder på skjermen. Det ene bildet dannes av den såkalte ordinære strålen gjennom krystallen. Dette bildet ligger på samme sted som det bildet du observerte i punkt 3. Strålen som danner det andre bildet, kalles ekstraordinær. Du kan også benytte en mindre krystall som er montert i en dreibar holder. Tegn en skisse av apparaturen. Finn ut hvordan de to strålene er polarisert. Legg merke til at krystallens optiske akse er parallell med planet gjennom de to strålene som kommer ut av krystallen.

IV. FORSINKELSESPATER

Vi tenker oss at vi skjærer ut en tynn plate med tykkelse t fra en kalsittkrystall slik at snittflatene er parallele med krystallens optiske akse. Vi benytter en optisk benk med en natriumlampe som gir tilnærmet monokromatisk lys med bølgelengde $\lambda = 589$ nm i luft, en irisblender, en konveks linse, en polarisator og en hvit skjerm. Avstandene mellom komponentene velges slik at irisblenderens apertur avbildes skarpt på skjermen. Så setter vi inn kalsittplaten til høyre for polarisatoren. Platen stilles slik at dens optiske akse blir vertikal. Hvis nå polarisatorens transmisjonsretning stilles vertikalt (0°), vil en ekstraordinær bølge forplante seg gjennom krystallen. I denne er den elektriske vektoren parallell med den optiske akse, og lysets bølgelengde inne i krystallen er λ/n_E . Stilles polarisatoren på 90° , forplanter en ordinær bølge seg gjennom krystallen. Den elektriske vektoren står vinkelrett på den optiske akse og bølgelengden for lyset inne i krystallen er λ/n_0 . For kalsitt er $n_0 = 1,6583$ og $n_E = 1,4864$. Inne i krystallen har derfor den ekstraordinære bølgen større hastighet enn

den ordinære. Hvis polarisatorvinkelen stilles på en verdi som er forskjellig fra 0° og 90° , vil to bølger forplante seg gjennom krystallen. La oss velge polarisatorvinkelen lik 45° og se bort fra at noe lys reflekteres fra krystallens forside. Da vil amplitydene til de to bølgene være omtrent like. Siden de to bølgene har forskjellige hastigheter, vil de være faseforskjøvet i forhold til hverandre når de kommer ut av krystallen. Den ordinære bølgen vil være forsinket i forhold til den ekstraordinære. Faseforskjellen er

$$\Delta\phi = \frac{2\pi t}{\lambda}(n_0 - n_E).$$

Hvis tykkelsen t tilpasses slik at $\Delta\phi = \pi$, vil den elektriske vektoren i bølgen som kommer ut fra platen være rotert 90° i forhold til den elektriske vektoren i lyset som går inn i krystallen (når polarisatoren er innstilt på 45°). Dette kan kontrolleres ved hjelp av en analysator som plasseres til høyre for kalsittplaten. Tykkelsen t må være lik

$$\frac{\lambda}{2(n_0 - n_E)} = 1,71 \text{ } \mu\text{m}.$$

Hvis krystallens tykkelse er halvparten av denne verdien, får vi en faseforskjell på $\pi/2$ mellom strålene. Platen kalles i dette tilfelle for en $\lambda/4$ -plate, og lyset som kommer ut fra krystallen er sirkulært polarisert (se på realdelen til $\vec{e}_x e^{i(\omega t + \phi)} + \vec{e}_y e^{i\omega t}$, der $\phi = \pi$ eller $\pi/2$).

Oppgave 6. Sirkulært polarisert lys

Polarisatoren stilles på 0° . Analysatoren stilles på 90° . Mellom de to polarisasjonsfiltrene plasseres en $\lambda/4$ -plate (for $\lambda = 550$ nm) som dreies til illuminansen på skjermen er minimal. Retningen på den optiske akse til forsinkelsesplaten er nå enten 0° eller 90° . Så stilles polarisatoren på 45° . Lyset som kommer ut fra $\lambda/4$ -platen er nå sirkulært polarisert. Drei analysatoren og observer illuminansen på skjermen.

Oppgave 7. Rotasjon av polarisasjonsretningen

Kombinasjon av to $\lambda/4$ -plater gir en $\lambda/2$ -plate. Retningene på $\lambda/4$ -platenes optiske akser er ikke avmerket, men ved å prøve deg frem kan du oppnå en rotasjon av \vec{E} på 90° .