

FYS 2150 – Modul 3

Polarisasjon

Fysisk institutt, Universitetet i Oslo

Vår 2004

Redigert høst 2013

1 Polarisasjonsvektorene

Vi skal i denne øvelsen studere lineært og sirkulært polarisert lys. En plan, lineært polarisert lysbølge beskrives ved hjelp av funksjonen

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

Her er ω vinkelfrekvensen og k vinkelbølgetallet. 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

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

2 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 inducerer 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.

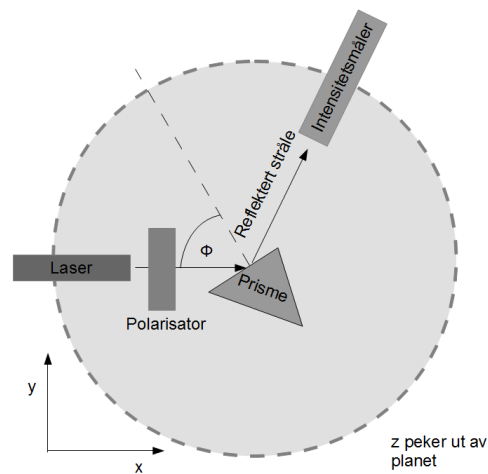
1. Innstill polarisatorens transmisjonsretning slik at lyset fra laseren blir polarisert vinkelrett på innfallsplanet. I følge Fresnels likninger for refleksjon av polarisert lys, skal den reflekterte strålens intensitet øke jevnt når innfallsvinkelen ϕ varieres fra 0° . Les av lysintensitetsmåleren 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. Begrunn produsentens valg av transmisjonsretning

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.



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

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?

3 Kalsittkrystallens struktur

I laboratoriet finnes det en modell som viser kalsittkrystallens 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. Dobbelbrytning i kalsitt

1. En kalsittkrystall som er skåret slik at den har to parallelle sider vinkelrett på den optiske aksens, legges på en tekstsider. Betrakt teksten gjennom krystallen slik at siktelinjen er parallell med den optiske aksens. Beskriv ditt inntrykk av bokstavene i teksten.
2. Betrakt den samme teksten gjennom en kalsittkrystall 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.

4 Forsinkelsesplater

Vi tenker oss at vi skjærer ut en tynn plate med tykkelse t fra en kalsittkrystall slik at snittflatene er parallelle 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

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

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 $\vec{e}_y e^{i(\omega t + \phi)} + \vec{e}_z e^{i\omega t}$, 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 $\lambda = 550 \text{ nm}$) 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° .

5 Prelaboppgaver

Kort informasjon

Disse oppgavene må løses før dere skal på laben. Besvarelsen skal leveres gjennom en fler-valsprøve **på Fronter**. Denne finner du i fellesrommet, under mappen "Prelab". Maksimal uttelling er 20 poeng, grense for bestått er 15 poeng. **Prelaboppgavene må være levert og bestått før labdagen**. Disse oppgavene skal sørge for at dere har lest og forstått oppgaveteksten før dere kommer på laben, slik at arbeidet der blir mest mulig effektivt.

Dere vil trenge noen datasett for å gjøre beregningene i oppgavene under. Disse ligger i en mappe kalt "skript og filer til bruk på lab og prelab". Denne finner dere i øvingsmappen i fellesrommet på Fronter, samme sted som dere fant denne oppgaveteksten.

Du trenger følgende filer til disse oppgavene:

- "Polarisering1.dat"
- "Polarisering2.dat"
- "Polarisering3.dat"

Oppgavene

I disse oppgavene representerer **E** den elektriske feltvektoren, og **B** representerer magnetfeltet.

1. Hva kjennetegner en lineært polarisert lysbølge?

2 poeng

- A. **E** og **B** er faseforskøvet med $\pi/2$
- B. Retningen til **E** endres med konstant vinkelhastighet i planet normalt på utbredelsehastigheten.
- C. **E** ligger hele tiden i samme plan
- D. **E** og **B** er parallelle

2. Hva kjennetegner en sirkulært polarisert lysbølge?

2 poeng

- A. **E** og **B** er faseforskøvet med $\pi/2$
- B. Retningen til **E** endres med konstant vinkelhastighet i planet normalt på utbredelsehastigheten.
- C. **E** ligger hele tiden i samme plan
- D. **E** og **B** er parallelle

3. Hva må være tilfellet for at en bølge skal kunne være polarisert?

1 poeng

- A. Den må være transversal
- B. Den må være longitudinal
- C. Den må ligge i den synlige delen av det elektromagnetiske spektrumet (~ 390 til ~ 700 nm)
- D. Den må ikke være koherent

4. Hvordan defineres "innfallsplanet" når vi snakker om refleksjon og refraksjon?

1 poeng

- A. Innfallsplanet er spent ut av innkommende stråle og z-aksen, slik den er definert i figur 1
 B. Innfallsplanet er planet som spennes av innkommende stråle og reflektert stråle (xy-planet i figur 1)
 C. Innfallsplanet er planet refleksjonsflaten ligger i

5. Hva sier Malus' lov? (θ er vinkelen mellom \mathbf{E} og analysatorens transmisjonsretning)

2 poeng

- A. For en lineært polarisert bølge er lysintensiteten $I \propto \theta$.
 B. For en lineært polarisert bølge er lysintensiteten $I \propto \sin(\theta)$.
 C. For en lineært polarisert bølge er lysintensiteten $I \propto \cos(\theta)$.
 D. For en lineært polarisert bølge er lysintensiteten $I \propto \cos^2(\theta)$.

6. Se nærmere på oppgave 3 og figur 1. Anta at polarisatoren er innstilt slik at \mathbf{E} står normalt på innfallsplanet, det vil si i xz-planet slik det er definert i figur 1. Hvordan bør målingene fra lysintensitetsmåleren utvikle seg når innfallsvinkelen ϕ øker fra 0 til 90°?

2 poeng

- A. Intensiteten øker lineært med ϕ .
 B. Intensiteten øker med ϕ , men det er ikke en lineær sammenheng.
 C. Intensiteten avtar lineært når ϕ øker.
 D. Intensiteten avtar når ϕ øker, men det er ikke en lineær sammenheng.

7. Anta at du i oppgave 3 har stilt inn polarisasjonsfilteret slik at \mathbf{E} ligger parallellt med innfallsplanet (xy-planet i figur 1). Du endrer innfallsvinkelen til lysintensiteten er på et minimum. Du måler da innfallsvinkelen til å være 55.6°. Hva er brytningsindeksen n_2 til prismet? Anta at brytningsindeksen til lufta er $n_1 = 1.00$.

2 poeng

- A. $n_2 = 1.46$
 B. $n_2 = 1.48$
 C. $n_2 = 1.50$
 D. $n_2 = 1.52$

8. Vi tenker oss en krystall som har tilsvarende egenskaper som kalsitt: den har to ulike brytningskoeffisienter $n_O = 1.500$ og $n_E = 1.600$. Vi planlegger å sende gjennom monokromatisk lys med bølgelengde $\lambda = 589$ nm. Hvilken tykkelse d må krystallen skjæres til for å få en $\lambda/2$ -plate?

2 poeng

- A. $d = 2.88 \mu\text{m}$
 B. $d = 2.90 \mu\text{m}$
 C. $d = 2.92 \mu\text{m}$

D. $d = 2.95 \mu\text{m}$

9. Vi setter tre $\lambda/4$ -plater etter hverandre, alle med den optiske akse i samme retning. Deretter sender vi lys med lineær polarisering 45° på den optiske akse til krystallene. Hva slags polarisering har lyset etter det har passert gjennom alle platene?

2 poeng

- A. Det har ingen bestemt polarisering lengre
- B. Lyset blir stoppet av den siste platen
- C. Lineært
- D. Sirkulært

10. Last ned de tre filene "polarisering1.dat", "polarisering2.dat" og "polarisering3.dat", og last de inn i Matlab. De består av to kolonner, hvor den første kolonnen representerer målinger av \mathbf{E} i y-retning, og den andre kolonnen representerer målinger av \mathbf{E} i z-retning (bølgen beveger seg altså langs x-aksen). Hvilken fil inneholder data som kan tenkes å være fra lineært polariserte bølger? (Hint: du kan prøve å se på faseforskjeller, men det er nok enklere å plote de to komponentene mot hverandre. NB: Det er ikke mulig å måle \mathbf{E} -feltkomponentene til synlig lys på denne måten, men vi kan alltid tenke oss dette er målinger av lavfrekvente radiobølger)

2 poeng

- A. "Polarisering1.dat"
- B. "Polarisering2.dat"
- C. "Polarisering3.dat"
- D. Ingen av dem.

11. Hvilken av filene over inneholder data som kan tenkes å være fra sirkulært polariserte bølger?

2 poeng

- A. "Polarisering1.dat"
- B. "Polarisering2.dat"
- C. "Polarisering3.dat"
- D. Ingen av dem.