

Skautað ljós

Tilvísun

1. Ohanian: *Physics*, kafli 37.4.
2. Fowles: *Introduction to Modern Optics*, kafli 2 og 6.
3. Hecht: *Optics*, kafli 8.
4. Benson: *University Physics*, kafli 38.9.

1 Inngangur

Tilraunin snýst um eðlisfræði skautaðs ljóss, leiðir til skautunar, tvíbrotsseiginleika efna og greiningu skautunar. Leiðir til að breyta einu skautunarformi í annað eru athugaðar. Hér verður aðeins dregið á helstu hugtök sem varða skautun ljóss, svo nemendum er vísað til heimildanna hér að ofan um alla nánari umfjöllun. Til aðgreiningar frá einvíðum algebraískum stærðum eru vektorar táknaðir hér með feitu lettri.

2 Kynning á hugtökum

2.1 Skautunarflokkar

Ljós er rafsegulbylgja, hátfðnisveifur í **rafsviði** og **segulsviði**. Þróun þessarra sviða í tíma og rúmi er lýst með jöfnum Maxwells. Með þeim má sýna að um planbylgjur gildir

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0, \quad \mathbf{k} \cdot \mathbf{H} = 0, \quad \mathbf{E} \cdot \mathbf{H} = 0 \quad (1)$$

þar sem \mathbf{k} er svokallaður bylgjuvektor, \mathbf{E} er rafsviðsvektor og \mathbf{H} segulsviðsvektor. Útbreiðslustefna rafsegulsviðsins er í stefnu \mathbf{k} . Stefnuvektorar sviðanna \mathbf{E} og \mathbf{H} eru innbyrðis hornréttir og báðir hornréttir á útbreiðslustefnuna. Planbylgjuna má því kalla þverbylgju. Vegna þessa eiginleika er oftast nóg að fylgjast með öðru sviðinu og þá er rafsviðið gjarna valið.

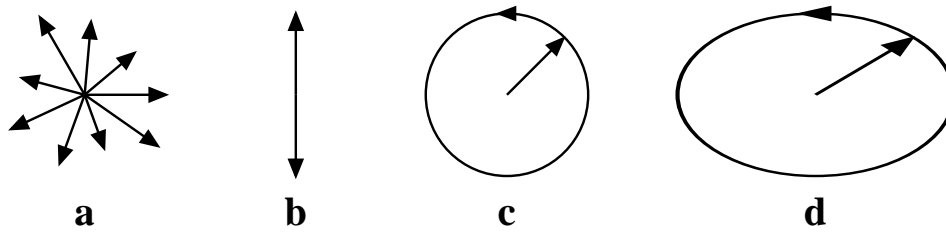
Skautunarástand ljóss má flokka í þrjá meginflokkar:

- a. **Óskautað ljós.** Stefna \mathbf{E} vektors breytist tilviljanakennt með tíma, í fleti sem er hornrétt á \mathbf{k} .
- b. **Línuskautað ljós.** Stefna \mathbf{E} vektors í plani hornrétt á \mathbf{k} breytist ekki með tíma (að undanskilinni formerkjabreytingu). $\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos \omega t$. Hér má alltaf skilgreina tvær óháðar grunnstefnur í planinu, og þar með tvo óháða undirflokkar línulegrar skautunar.
- c. **Hringskautað ljós.** Lengd \mathbf{E} vektors óháð tíma en stefna breytist með jöfnum hornhraða í plani hornrétt á $\mathbf{k} = k\mathbf{u}_z$. $\mathbf{E} = E_0(\mathbf{u}_x \cos \omega t + \mathbf{u}_y \sin \omega t)$ Með formerkjabreytingu á hornhraðanum má skilgreina tvo óháða undirflokkar með sitt hvora umferðarstefnuna. \mathbf{u}_x , \mathbf{u}_y og \mathbf{u}_z eru einingarvektorar sem eru hornréttir hver á annan.

Milliflokkur sem kallast sporbaugsskautað ljós fæst með samantekt á línulegri skautun og hringskautun. $\mathbf{E} = E_0(\mathbf{u}_x(1 + \alpha) \cos \omega t + \mathbf{u}_y \sin \omega t)$. Almennir ljósgjafir svo sem glóðarperur og flúrpípur gefa óskautað ljós, en sumir leisar og allir LCD-skjái gefa skautað ljós

3 Skautunaraðferðir

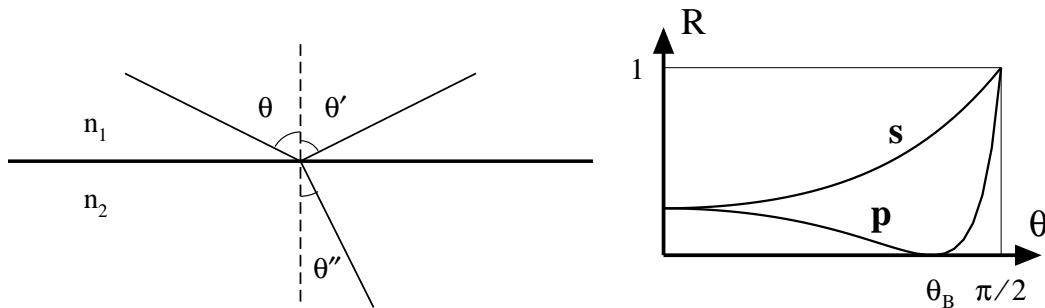
Óskautað ljós má skauta eftir nokkrum leiðum og eins finnast leiðir til að færa ljósgeisla milli skautunarflokkanna línuskautað og hringskautað ljós.



Mynd 1: Rafsviðsstefnur fyrir a) óskautað ljós, b) línuskautað ljós, c) hringskautað ljós, d) sporbaugsskautað ljós. Útbreiðslustefnan er þvert á myndplanið.

3.1 Skautun með speglun

Speglunarstuðlar R fyrir skilflöt tveggja efna með brotstuðlana n_1 og n_2 eru mismunandi fyrir skautunarstefnu sem liggur í innfallsplani (p-skautun) og hina sem er hornrétt á innfallsplanið (s-skautun). Innfallsplanið er skilgreint af innfallsgeisla og normal á speglunarflötinn. Á mynd 2 er myndflöturinn innfallsplanið. Við Brewster hornið θ_B verður speglunarstuðullinn núll fyrir



Mynd 2: Speglnun og ljósbrot á skilfleti tveggja efna

Mynd 3: Speglunarstuðlar fyrir skilflöt tveggja gegnsærra efna, sem fall af innfallshorni.

ir p-skautun (sjá myndir 2 og 3) svo speglaði geislinn inniheldur aðeins s-skautað ljós. Um Brewsterhornið gildir að

$$\tan \theta_B = n_2/n_1 \quad (2)$$

og að milli speglaða geislans og þess brotna er rétt horn.

3.2 Skautun með ísogi

Efni sem eru mynduð úr löngum leiðandi sameindakeðjum má gera skautandi með því að raða keðjunum upp hlið við hlið. Rafleiðnieiginleikar efnisins verða þá stefnuháðir. Leiðnin getur orðið mörgum stærðarþrepum stærri í stefnu keðjanna en þvert á þær. Rafsviðssveiflur þvert á stefnu keðjanna speglast minna við að fara inn í efnið og dofna minna á leið í gegnum það vegna leiðninnar, en sveiflur í stefnu keðjanna.

3.3 Skautun með tvíbrjótandi efnum

Tvíbrjótandi (e. birefringent) eru þau efni kölluð sem einkennast af að ljóshraði í efninu og þar með brotstuðull er háður bæði útbreiðslustefnu ljóssins og skautunarstefnu. Nafnið kemur af þeim eiginleika að ljósgeisli sem fellur á tvíbrjótandi efni, undir innfallshorni sem ekki er núll, klofnar almennt í tvo aðskilda geisla sem eru línuskautaðir hornrétt hvor á annan. Stefnur skautunarvektoranna ráðast af eiginvektorum í kristalbyggingu efnisins.

3.4 Hringaskautun

Hringaskautað rafsvið má fá fram með samantekt tveggja rafsviða sem eru línuskautuð hornrétt hvort á annað, með fasamun sem nemur $\pi/2$.

$$\begin{aligned}\mathbf{E} &= E_0 \mathbf{u}_x \cos(kz - \omega t) + E_0 \mathbf{u}_y \cos(kz - \omega t \pm \pi/2) \\ &= E_0 [\mathbf{u}_x \cos\{\mp(kz - \omega t)\} + \mathbf{u}_y \sin\{\mp(kz - \omega t)\}] \end{aligned} \quad (3)$$

Snúningsstefnan (e. helicity) ræðst af formerki fasaseinkunarinnar. Með því að draga saman fasaseinkunina og rúmhluta fasans fæst að annar geislinn er fjórðungi úr öldulengd á eftir hinum.

$$kz \pm \pi/2 = \frac{2\pi}{\lambda} z \pm \frac{\pi}{2} = \frac{2\pi}{\lambda} (z \pm \frac{\lambda}{4}) \quad (4)$$

Fasaseinkun milli tveggja skautaðra geisla getum við stillt af með þykkt tvíbrjótandi þynnu, sem hefur brotstuðlana n_x og n_y fyrir skautunarstefnurnar \mathbf{u}_x og \mathbf{u}_y . Geisli með skautunarstefnuna $\mathbf{E} \sim \mathbf{u}_x + \mathbf{u}_y$ klofnar upp í tvo þætti eftir grunnstefnunum í þynnunni og hraði geislanna ræðst af brotstuðlunum. Fasamuninn á geislunum er þeir fara út um bakhlið þynnunnar má skrifa sem

$$\Delta\theta = k_x d - k_y d = \frac{2\pi}{\lambda} (n_x - n_y) d \quad (5)$$

Fasamunur sem nemur $\Delta\theta = \pi/2 \pm n\pi$ gefur hringaskautað ljós meðan $\Delta\theta = n\pi$ gefur áfram línuskautað ljós þar sem skautunarstefnan hefur snúist um hornið $n\pi/2$. Fasamunur sem ekki fellur að þessum gildum gefur millistigið, sporbaugsskautun, sem einnig fæst fram ef skautunarstefna upphafsgeislans liggur ekki mitt á milli kristalásanna \mathbf{u}_x og \mathbf{u}_y . Tvíbrjótandi þynnur sem gefa fasamismuninn $\Delta\theta = \pi/2$ nefnast kvartbylgjuþötur.

Á svipaðan hátt og við gátum myndað hringaskautað svið úr tveim línuskautuðum með hæfilegri fasaseinkun, getum við myndað línuskautað svið úr tveim hringaskautuðum.

$$\begin{aligned}\mathbf{E} = \mathbf{E}_+ + \mathbf{E}_- &= E_0 [\mathbf{u}_x \cos \omega t + \mathbf{u}_y \sin \omega t] + E_0 [\mathbf{u}_x \cos(-\omega t + \phi) + \mathbf{u}_y \sin(-\omega t + \phi)] \\ &= 2E_0 \cos(\omega t - \frac{\phi}{2}) \left[\mathbf{u}_x \cos \frac{\phi}{2} + \mathbf{u}_y \sin \frac{\phi}{2} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

Fasamunurinn ϕ milli hringaskautuðu sviðanna stjórnar stefnu línuskautaða sviðsins.

4 Tilraun

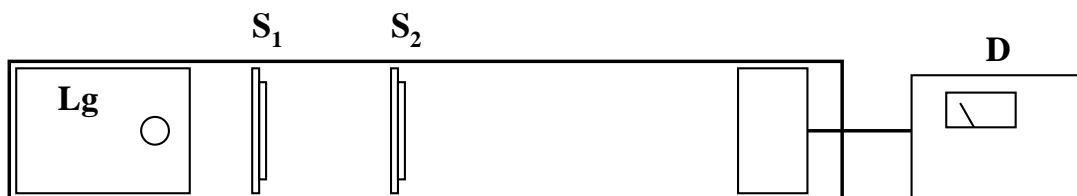
Nemendur eru áminntir um að vanda til skilgreininga á þeim mörgu hornabreytistærðum sem koma fyrir í þessari tilraun.

4.1 Skautunarsíur

- Komið ljósgjafa og ljósnema fyrir á ljósbekknun líkt og sýnt er á mynd 4. Stillið einni skautunarsíu S_1 upp milli ljósgjafa og nema, og mælið gegnskinstyrk sem fall af stöðuhorni síunnar, θ_1 .
- Bætið annarri skautunarsíu S_2 við og mælið ljósstyrkinn sem fall af $\phi = \theta_2 - \theta_1$. Berið mælingarnar saman við lögmál Malusar

$$I = I_{max} \cos^2 \phi \quad (7)$$

- Stillið $\phi = \pi/2$ og komið þriðju skautunarsíunni S_3 fyrir á milli hinna tveggja. Athugið hvaða áhrif snúningur á S_3 hefur og gefið skýringar á því sem gerist.



Mynd 4: Uppstilling til mælinga á línuskautuðu ljósi. (Lg) ljósgjafi, (S_1) og (S_2) skautunarsíur, (D) ljósnemi.

4.2 Kvartbylgjuplötur

- Stillið skautunarsíunum S_1 og S_2 upp á bekkinn þannig að $\phi = \theta_2 - \theta_1 = 0$. Komið kvartbylgjuplötu Q_1 fyrir á milli skautunarsíanna og mælið gegnskinstyrkinn sem fall af stöðuhorni $\lambda/4$ plötunnar, Ψ .
- Snúið $\lambda/4$ plötunni í þá stöðu að skautunarvektor sviðsins liggi mitt á milli eiginvektora plötunnar (ϕ er enn 0). Mælið gegnskinið nú sem fall af ϕ . Berið mælingarnar saman við líkan og útskýrið hvaða tilgangi þessi stilling á hornstöðunni Ψ þjónaði.
- Bætið nú annarri kvartbylgjuplötu við á milli skautunarsíanna, og látið hana snúa "eins" og þá sem fyrir er. Mælið gegnskinstyrk sem fall af ϕ , og skýrið áhrifin af seinni plötunni.