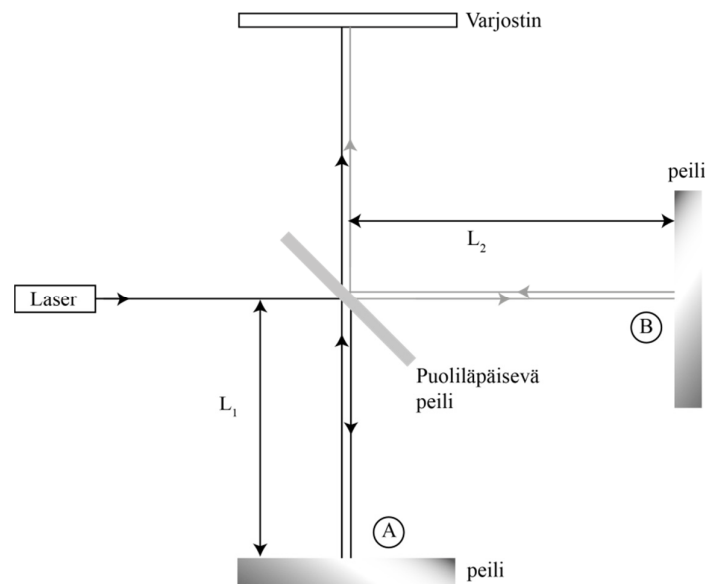


INTERFEROMETRI

1 Johdanto

1.1 Michelsonin interferometri

Michelsonin interferometrin periaate on esitetty kuvassa 1. Laitteisto koostuu laserista, puoliläpäisevästä peilistä, kahdesta tasopeilistä ja varjostimesta. Tuleva tasoaalto jaetaan puoliläpäisevällä peilillä kahteen aaltorintamaan A ja B. Aaltorintamat heijastuvat peileistä ja palaavat puoliläpäisevälle peilille, jossa ne yhtyvät jälleen tasoallokseksi. Tasoaalto etenee varjostimelle, jossa havaitaan valon interferenssi.



Kuva 1. Michelsonin interferometrin periaate.

Jos interferometrissä valo kulkee reitillä A matkan s_1 , jossa taitekerroin on n_1 ja reitillä B matkan s_2 , jossa taitekerroin on n_2 , on vaihe-ero aaltorintamien yhtyessä:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_1 s_1 - n_2 s_2), \quad (1)$$

missä λ_0 on valon aallonpituus tyhjiössä. Yhtälössä (1) esiintyvää tuloa ns kutsutaan optiseksi matkaksi. Jos optisten matkojen tulo on aallonpituuden monikerta, vaihe-ero on $2\pi \cdot n$ monikerta ja kyseessä on konstruktiiivinen interferenssi. Jos taas optisten matkojen ero on $(N + \frac{1}{2})\lambda_0$, on kyseessä destruktiiivinen interferenssi.

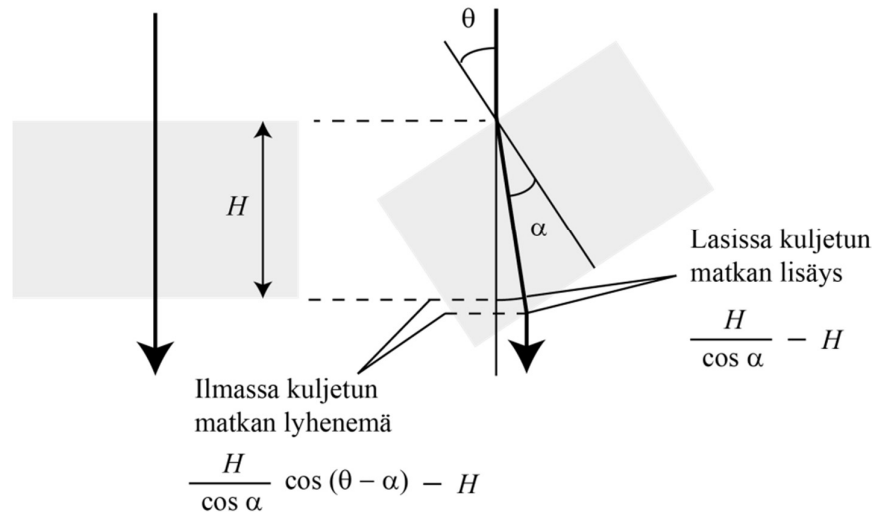
Jos Michelsonin interferometrissä matka L_1 kasvaa aallonpituuden puolikkaan verran, edestakainen matka s_1 kasvaa aallonpituuden verran. Tällöin varjostimella havaitaan täysi jakso, esimerkiksi valoisasta pimeään kautta valoisaan. Peilin sijainti voidaan siten mitata tarkkuudella, joka on pienempi kuin käytetyn valon aallonpituus. Samoin, jos taitekerroin reitillä B (tai A) muuttuu (esim. ilmanpaine muuttuu), mutta peilien etäisyydet ja taitekerroin reitillä A (tai B) pysyvät vakiona, aiheuttaa aallonpituuden suuruinen muutos optisessa matkassa varjostimella täyden jakson. Tämän avulla voi arvioida taitekertoimen mittauksen tarkkuudeksi $\Delta n_2 = \frac{\lambda_0}{s_2}$.

Edellä on oletettu, että tuleva aalto on tasoaalto ja että peilit ovat tarkasti kohtisuorassa valonsäteitä vastaan. Tällaisessa ideaalitapauksessa koko varjostimen valoisuus vaihtelee jaksollisesti optisten matkojen muuttuessa. Todellisessa Michelsonin interferometrissä peilit ovat kuitenkin usein hieman vinossa ja lisäksi valonlähteestä tuleva valo on tasoallon sijasta palloaalto, mistä johtuen varjostimella kuitenkin nähdään valoisia ja tummia raitoja, jotka muodostavat interferenssirengkaita. Keskiakselilla todellinen Michelsonin interferometri käyttäytyy silti kuin ideaalitapauksessa.

Yleensä interferometrisovelluksissa pyritään saamaan aikaan hidaskäyttö ja jatkuva optisen matkan muutos, jolloin renkaita laskemalla voidaan määrittää optisen matkan muutos hyvin tarkasti. Kun peili 1 tai 2 siirtyy hitaasti matkan L ilmassa, jonka taitekerroin on $n_i \approx 1$, optisen matkan muutos on $2n_i L$. Interferenssiiviivojen siirtymisiä havaitaan tällöin

$$N = \frac{2n_i L}{\lambda_0}. \quad (2)$$

1.2 Lasin taitekertoimen määrittäminen



Kuva 2. Valon kulkeman matkan muutos, kun lasilevyä käännetään.

Kun tasapaksua lasilevyä, jonka paksuus on H ja taitekerroin n_l käännetään hitaasti kohtisuorasta asennosta vinoon, säteen kulkumatka lasissa pitenee ja ilmassa lyhenee, kuten kuvassa 2 on havainnollistettu. Varjostimelta lasketaan N syttyvää ja sammuvaa interferenssiiviivaa. Optisen matkan muutos saadaan lasissa ja ilmassa edestakaisin kuljettujen matkojen erotuksena

$$2n_l \left(\frac{H}{\cos \alpha} - H \right) - 2n_i \left[\frac{H}{\cos \alpha} \cos(\theta - \alpha) - H \right] = N\lambda. \quad (3)$$

Taittumislain mukaan $n_i \sin \theta = n_l \sin \alpha$ ja $n_i \approx 1$, joten yhtälö (3) sievenee muotoon

$$n = 1 + \frac{\cos \theta + \frac{N\lambda}{4H}}{\frac{2H}{N\lambda}(1 - \cos \theta) - 1}. \quad (4)$$

1.3 Ilman taitekertoimen määrittäminen

Aineen taitekero n saadaan aineen sähköisistä ja magneettisista ominaisuuksista, joita kuvaavat suhteellinen permittiivisyys ϵ_r ja suhteellinen permeabiliteetti μ_r . Näitä käyttäen taitekero voidaan kirjoittaa muodossa

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}. \quad (5)$$

Aineen suhteellinen permittiivisyys voidaan kirjoittaa atomien tai molekyylin sähköistä polarisoitumista kuvaavan vakion α ja aineen atomitiheyden N_a avulla [1]

$$\epsilon_r = 1 + \alpha N_a. \quad (6)$$

Koska termi $\alpha N_a \ll 1$ ja ilman suhteellinen permeabiliteetti on yksi, voidaan kirjoittaa

$$n = \sqrt{1 + \alpha N_a} = 1 + \frac{1}{2} \alpha N_a. \quad (7)$$

Ilmalle atomitiheys saadaan riittävän tarkasti ideaalikaasun tilanyhtälöstä ja havaitaan, että taitekero vakio-tilassa riippuu paineesta. Kirjoitetaan uuden verrannollisuuskertoimen C avulla

$$n = 1 + \frac{\alpha p}{2 kT} = 1 + Cp. \quad (8)$$

Mittauksissa asetetaan toisen säteen kulkemalle reitille kaasukyveti, jossa säde kulkee päätylasien välillä matkan H kahteen kertaan. Pumpataan hitaasti kyvetistä ilmaa pois, jolloin kyvetissä oleva paine laskee arvosta p_1 arvoon p_2 . Samalla varjostimelta lasketaan N interferenssiiviivaa. Muutos optisessa matkassa on

$$\Delta(ns) = 2H[(1 + Cp_1) - (1 + Cp_2)] = N\lambda, \quad (9)$$

josta voidaan määrittää verrannollisuuskertoimen arvo

$$C = \frac{N\lambda}{2H(p_1 - p_2)} = \frac{N\lambda}{2H\Delta p}. \quad (10)$$

Yhtälö (10) voidaan esittää myös suoran yhtälönä muodossa

$$N = \frac{2HC}{\lambda} \Delta p, \quad (11)$$

joten verrannollisuuskero C voidaan määrittää suoran kulmakertoimen avulla. Kertoimen C avulla puolestaan saadaan ilman taitekero normaalipaineessa yhtälöstä (8).

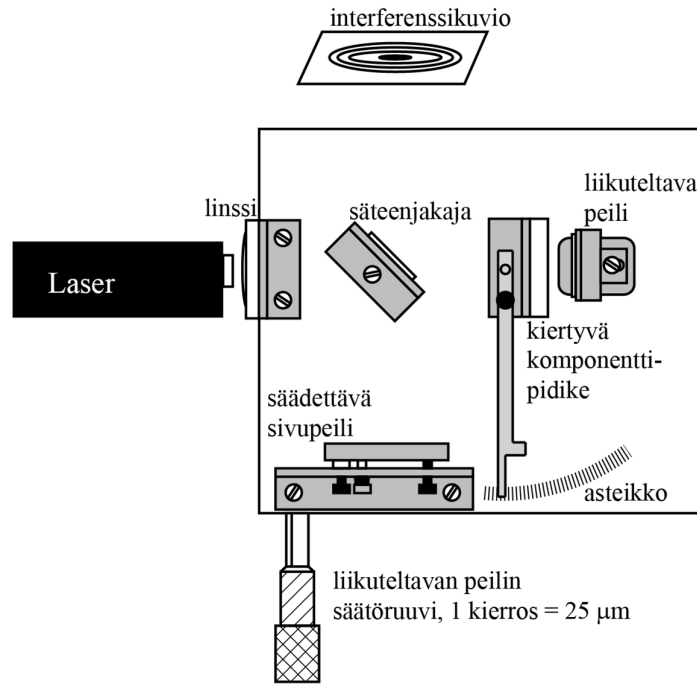
2 Tavoitteet

Työn tehtyään opiskelija

- osaa selittää miten valon konstruktiivinen ja destruktiivinen interferenssi syntyy
- osaa selittää Michelsonin interferometrin toiminnan periaatteet
- osaa selittää, mikä on materiaalin taitekero
- osaa esittää mittaustulokset kuvaajan avulla ja sovittaa suoran pisteistöön

3 Laitteisto

3.1 Laitteiston osat



Kuva 3. Michelsonin interferometrin kaaviokuva.

Muut tarvittavat välineet:

- mikrometriruuvi (pyydetään assistentilta)

Työssä käytettävä laitteisto on esitetty kuvassa 3. Valonlähteenä toimii punainen He-Ne-laser, jonka aallonpituus on 632,8 nm. Lasersäde ohjataan säteenjakajaan, josta osa säteestä heijastuu säädettyville sivupeilille, jonka kulmaa voidaan säätää peilin takana sijaitsevalla kahdella peukaloruuvilla. Sivupeililtä säde heijastuu suoraan varjostimelle. Osa laserilta tulevasta säteestä menee säteenjakajan läpi, mutta heijastuu takaisin liikuteltavasta peilistä ja siitä säteenjakajan kautta varjostimelle. Liikuteltavan peilin etäisyyttä säteenjakajasta voidaan säätää kuvaan merkityllä säätöruuvilla, jonka yksi kierros vastaa 25 μm siirtymää. Lisäksi laitteistoon kuuluu osoittimella varustettu kiertyvä komponenttipidike, johon voidaan liittää mitattava lasilevy tai kaasukyveti.

HUOM! Älä katso suoraan laseriin tai heijastuviin säteisiin!

Säilytä linssit ja peilit puhtaina (Älä koske pintoihin sormin!). Linssipaperia on joko pöydällä (Älä heitä pois yhden käytön jälkeen!) tai assistentilla.

Kaikki mittaustulokset ja kysymysten vastaukset kirjataan vastauslomakkeelle. On suositeltavaa käyttää lyijykynää. Vastauslomake palautetaan lopuksi assistentille.

3.2 Laitteiston suuntaus ja testaus

1. Laserin pitäisi olla sijoitettuna magneettisen L-pidikkeen avulla kiskoon. Sijoita kisko kiinni interferometrinen runkoon ja laser kiskolle n. 3 cm päähän interferometrinen rungon reunasta siten, että interferometrinen rungossa laserin edessä olevaan komponenttipidikkeeseen on helppo sijoittaa linssi ja ottaa se pois. Tarkista, että lasersäde on interferometrinen rungon suuntainen esim. paperiarkin avulla. Jos laser ei ole suorassa, säädä varovasti laseriskon *edessä* olevaa ruuvia, kunnes laser on suorassa.
2. Käännä säteenjakaja pois laserin edestä. Nosta linssi ja lasilevy sivuun. Laserin ja liikuteltavan peilin välissä ei ole nyt esteitä. Jotta syntyvä interferenssikuvio olisi selkeä ja siinä näkyisi sopiva määrä renkaita, on liikuteltava peili asetettava oikeaan kohtaan. Liikuteltavan peilin pidikkeelle on merkitty interferometrinen runkoon paikka valkoisilla viivoilla. Sopiva paikka pidikkeen etureunalle on noin 1 mm näiden viivojen takana, siis kauempana laserista. Jos peili *ei* ole näin:
 - avaa liikuteltavan peilin kiinnitysruuvi ja siirrä peili sopivaan kohtaan
 - tarkista, että lasersäde heijastuu takaisin laserin kolossa olevaan reikään
 - kiristä liikuteltavan peilin kiinnitysruuvi varovasti siten, ettei peili pääse kiristettäessä liikkumaan
3. Kiinnitä lasilevy kiertyvään komponenttipidikkeeseen ja aseta pidike paikalleen. Tarkista, että pidike mahtuu kiertymään ainakin 10 astetta esteettömästi. Poista kiertyvä komponenttipidike lasilevyineen. Käännä nyt säteenjakaja laserin säteeseen 45 asteen kulmaan kuvan 3 mukaisesti siten, että osa säteestä heijastuu säädettävän sivupeilin keskiosaan. Varjostimena käytettävällä seinällä pitäisi nyt näkyä useita valopisteitä, joista helposti erottuu kaksi kirkkainta. Kiristä säteenjakaja paikalleen sellaiseen asentoon, että kirkkaimmat valopisteet ovat mahdollisimman lähellä toisiaan.
4. Kun muutat säädettävän sivupeilin asentoa peukaloruuveilla, osa seinällä olevista pisteistä liikkuu ja osa pysyy paikallaan. Siirrä kirkkain *liikkuva piste* sivupeiliä säätämällä kirkkaimman *paikallaan pysyvän pisteen* päälle mahdollisimman tarkasti. Pisteet ovat kohdakkain silloin, kun päällekkäisten pisteiden kuva seinällä väräjäää (=interferoi) pienestäkin peilin suunnan muutoksesta.
5. Aseta linssi paikalleen laserin eteen kuvan 3 mukaisesti siten, että lasersäde edelleen osuu liikuteltavaan peiliin. Säädä sivupeilin avulla interferenssikuvio mahdollisimman symmetriseksi kuvan 3 mukaisesti. Huomaa, että kuvio on erittäin herkkä tärähdyksille ja saattaa pienen tönäisyn voimasta kadota kokonaan. Siinä tapauksessa poista linssi ja kohdista pisteet uudelleen edellisen kohdan mukaisesti.

4 Esitehtävät

Tutustu työhön liittyvään teoriaan haluamastasi fysiikan oppikirjasta esim. [2–4], lue työhöje läpi ja vastaa alla oleviin kysymyksiin vastauslomakkeeseen.

1. Selitä konstruktiivinen ja destruktiivinen interferenssi
2. Selitä valonsäteiden kulku Michelsonin interferometrissä
3. Mikä on aaltorintamien vaihe-ero Michelsonin interferometrissä puoliläpäisevän peilin ja varjostimen välillä?
4. Työssä mitataan ja piirretään muuttuvien interferenssirenkaiden lukumäärää N paineenmuutoksen Δp funktiona sekä sovitetaan tähän suora ($y=kx+b$). Mikä on yhtälön (11) mukaan tämän suoran kulmakerroin k ? Anna yhtälö k :lle ja ratkaise siitä verrannollisuuskerroin C ja sen avulla ilman taitekerroin n .
5. Määritä kokonaisdifferentiaalilla virhearvio ilman taitekertoimelle n edellisessä kohdassa saamastasi yhtälöstä. Ota muuttujista huomioon kulmakerroin k sekä kyvetin pituus H .

5 Mittaukset

5.1 Lasin taitekertoimen määrittäminen

1. Tee hypoteesi ja kirjaa se mittauslomakkeeseen: Mitä interferenssikuvioille tapahtuu, kun liikuteltavan peilin etäisyyttä säteenjakajasta muutetaan hitaasti säätöruuvia kääntämällä? Perustele vastauksesi fysiikan avulla.
2. **Testaus:** Testaa tekemäsi hypoteesia ja kirjoita havaintosi vastauslomakkeeseen. Jos havaintosi poikkesivat hypoteesista, niin pohdi miksi.
3. Kirjoita ylös laserin aallonpituus λ .
4. Mittaa mikrometriruuilla lasilevyn paksuus H ja kirjaa tulos vastauslomakkeeseen.
5. Aseta lasilevy kiertyvään komponenttipidikkeeseen ja kiinnitä pidike sille varattuun reikään interferometrin alustassa. Varmista silmänvaraisesti, että osoitin on suorassa komponenttipidikkeeseen nähden ja säädä sitä tarvittaessa.
6. Sijoita osoitin siten, että nonius-asteikon nolla kohdistuu pöydässä olevan kulma-asteikon nollaan.
7. Poista linssi laserin edestä. Sijoita sopiva varjostin (paperin palanen käy hyvin) liikuteltavan peilin taakse (Liikuteltava peili päästää osan laservalosta läpi.). Jos varjostimella näkyy kirkas valopiste ja muita sekundäärisiä valopisteitä käännä lasilevyä pidikettä sen verran, että varjostimen valopisteet ovat mahdollisimman lähellä toisiaan. Kohdista tämän jälkeen osoitin uudelleen, kuten kohdassa 6. Lasilevy on nyt kohtisuorassa lasersädetä vastaan.
8. Aseta linssi paikoilleen. Tee hienosäätö, kunnes näet seinällä mahdollisimman terävän ja symmetrisen interferenssikuvion.
9. Käännä lasilevyä osoittimesta kiinni pitäen hitaasti ja laske kuinka monta kertaa interferenssikuvion keskusta sammuu. Merkitse muistiin syttymisten määrä ja sitä vastaava kulma θ . Huomaa, että interferenssikuvio muuttuu aluksi hitaasti. Tee mittaus vähintään 3 kertaa. Sopiva interferenssirenkaiden lukumäärä on esim. 30.

5.2 Ilman taitekertoimen määrittäminen

1. Nosta kiertyvä komponenttipidike pois pöydältä ja irrota lasilevy. Kiinnitä kaasukyvetti kiertyvään komponenttipidikkeeseen ja aseta pidike takaisin pöydälle niin, että lasersäde kulkee kohtisuoraan sen läpi, kuten edellisen mittauksen kohdassa 5. (Osoittimen nollakohdasta ei tarvitse tässä mittauksessa välittää.) Säädä interferenssikuvio mahdollisimman teräväksi ja symmetriseksi.
2. Testaa käsipumpun toimintaa pumpaamalla hieman ilmaa pois kyvetistä ja huomio paineen muutos. Ilmaa kyvetti pumpun pienestä liipaisimesta. Painemittarin viisarin tulisi osoittaa nyt nollaa.
3. Laske sammuvien interferenssirenkaiden lukumäärä samalla, kun pumpaat hitaasti ja varovaisesti ilmaa pois kyvetistä. Varo heiluttamasta pumpua tai letkua, jotta kyvetti ei pääse liikkumaan paikaltaan. Merkitse painemittarin lukema ja sitä vastaava sammuneiden interferenssirenkaiden lukumäärä vastauslomakkeeseen. Toista mittaus vähintään viisi kerta käyttäen eri alipainetta (esim. 20, 30, 40, 50, 60 kPa).
4. Sammuta laser ja irrota pistoke pistorasiasta.

6 Tulosten käsittely

6.1 Lasin taitekertoimen määrittäminen

1. Laske mittaustulostesi perusteella lasin taitekerroin yhtälöstä (4).

6.2 Ilman taitekertoimen määrittäminen

1. Piirrä sammuneiden interferenssirenkaiden lukumäärä N alipaineen Δp funktiona. Yhtälön (11) mukaan pisteiden tulisi osua suoralle.
2. Määritä suoran kulmakertoimen virherajoineen ja ratkaise sen avulla ilman taitekerroin n kaavoja (8) ja (11) hyödyntäen. Kaasukyvetin pituus päätyikkunat pois lukien on $H = (3,0 \pm 0,1)$ cm.
3. Määritä taitekertoimelle virherajat kulmakertoimen virherajojen ja kyvetin pituuden virherajojen avulla. Määritä kyvetin pituuden ja kulmakertoimen osuudet taitekertoimen kokonaisvirheestä. Kirjaa tulokset vastauslomakkeeseen.
4. Tulosta piirtämäsi kuvaaja vastauslomakkeen liitteeksi.

7 Pohdittavaa

1. Miten määrittäisit lasin taitekertoimelle virherajat?
2. Mikä tekijä aiheuttaa ilman taitekertoimen mittauksessa suurimman virheen?
3. Mitä linssi tekee säteelle? Miksi linssi on tarpeellinen?
4. Vertaa saamiasi taitekertoimen arvoja kirjallisuudessa annettuihin arvoihin.

Lähteet

- [1] Esim. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands, The Feynman Lectures on Physics II, Addison-Wesley, 1964, Luku 11.
- [2] D.C. Giancoli, Physics for Scientists & Engineers with Modern Physics 4th edition, International edition, Pearson Education, Inc, 2009.
- [3] Hugh Young, Roger Freedman, A. Lewis Ford: University Physics with Modern Physics. International Edition. 13. painos. Pearson Education, 2011.
- [4] Halliday, Resnick, Walker, Fundamentals of Physics Extended, Extended 9th edition, International Student Version, Wiley & Sons, Inc., 2011.