

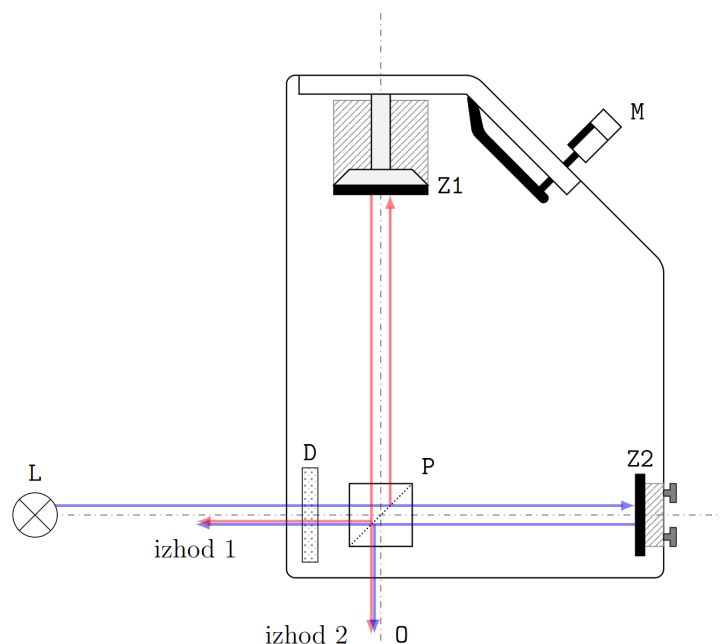
Absorpcija žarkov γ in β

Bor Kokovnik

Januar 2024

1 Uvod

Michelsonov interferometer je sestavljen iz treh osnovnih elementov: dveh ravnih zrcal ter polprepustnega zrcala. Shema interferometra je prikazana na sliki 1. Interferenčno sliko lahko opazujemo na opazovalnem zaslonu, če imamo dovolj svetlobe, pri manjših svetlobnih intenzitetah pa gledamo naravnost v interferometer.



Slika 1: Michelsonov interferometer je sestavljen iz polprepustnega zrcala in dveh ravnih ogledal. Vpadni svetlobni snop se na polprepustnem zrcalu P razdeli na dva delna snopa, ki padata pravokotno na ravni zrcali Z1 in Z2. Po odboju na Z1 in Z2 se delna snopa vrne nazaj na polprepustno zrcalo P, kjer se vsak od njiju spet razdeli na dva dela. S tem dobimo dva para vzporednih končnih snopov, ki sta na sliki označena kot izhod 1 in izhod 2. Snopa iz izhoda 2 gresta proti opazovalcu O in med seboj interferirata.

Polprepustno zrcalo P opišemo z amplitudno odbojnostjo r in prepustnostjo t , ki sta v splošnem kompleksni količini; če pa ni izgub, mora veljati $|r|^2 + |t|^2 = 1$. Končna delna snopa, ki prideta na izhod 2, imata enaki amplitudi, saj se vsak izmed njiju enkrat odbije na polprepustnem zrcalu P, enkrat pa je čezenj prepuščen.

Interferenčna slika je najenostavnejša, če na interferometer pošljemo ravno monokromatsko svetlobno valovanje s krožno frekvenco ω , katerega električno polje zapišemo kot

$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \cos(kl - \omega t)$, pri čemer \mathbf{E}_0 označuje amplitudo, $k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda}$ valovni vektor valovanja, $l = \int n(s)ds$ pa optično pot ($n =$ lomni količnik). V praksi se takemu valovanju zelo dobro približamo s kolimiranim laserskim snopom. Električno polje svetlobe na opazovalnem zaslonu \mathbf{E}_z je vsota električnih polj končnih delnih snopov

$$\mathbf{E}_z = \mathbf{E}_1 + \mathbf{E}_2 = \frac{1}{2}\mathbf{E}_0 \cos(kl_1 - \omega t) + \cos(kl_2 - \omega t), \quad (1)$$

pri čemer l_1 in l_2 označujeta optično pot prvega oz. drugega delnega snopa, predfaktor $\frac{1}{2}$ pa izvira iz privzetka, da nimamo izgub in je maksimalna amplituda na izhodu interferometra enaka vstopni amplitudi \mathbf{E}_0 . Fazna razlika

$$\Delta\Phi = k(l_1 - l_2) \quad (2)$$

je odvisna od razdalj d_1 in d_2 med polprepustnim zrcalom P in ravnima zrcaloma Z_1 oz. Z_2 ter od debeline in lomnega količnika materialov, ki jih oba snopa svetlobe prečkata na poti od polprepustnega zrcala do obeh zrcal. (Za polprepustno zrcalo želimo simetrično strukturo, ki je v našem primeru v kocko staknjen par tako imenovanih 45 stopinjskih prizem, v stičišču pa je dielektrični sloj naparjen na eno izmed obeh prizem.) Intenziteta svetlobe na opazovalnem zaslonu je sorazmerna

$$I_z \propto \|\mathbf{E}_z\|^2 = \|\mathbf{E}_1\|^2 + \|\mathbf{E}_2\|^2 + 2|\langle \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 \rangle| \quad (3)$$

in tako dobimo končni rezultat, da je

$$I_z = \frac{1}{2}I_0(1 + \cos \Delta\Phi) \quad (4)$$

pri čemer I_0 označuje intenziteto vpadnega snopa. Kadar je fazni zaostanek enak celemu večkratniku periode $\Delta\Phi = N2\pi$, dobimo interferenčne maksimume (zaslon je najbolj svetel), kadar pa velja $\Delta\Phi = (2N + 1)\pi$, dobimo interferenčne minimume (zaslon je najbolj temen). Iz gornjega izraza zopet vidimo, da brez izgub v interferometru v primeru fazne razlike $N2\pi$ vsa svetloba pride na en izhod interferometra. Fazna razlika med delnima snopoma na drugem izhodu je takrat taka, da tam pride do destruktivne interference.

Razliko optičnih poti delnih snopov Δl in s tem tudi fazni zaostanek $\Delta\Phi$ lahko zvezno spreminjamo s pomikanjem ravnega zrcala Z_1 . Na zaslonu se pri tem izmenoma pojavljajo interferenčni maksimumi in minimumi. Vsakokrat, ko zrcalo Z_1 premaknemo za razdaljo $\Delta d_1 = \frac{\pi}{k} = \frac{\lambda}{2}$ se optična pot prvega delnega snopa v zraku spremeni za $\Delta l_1 = 2d_1 = \lambda$ in $\Delta\Phi$ se poveča za 2π ; interferenčna slika se torej ponovi.

Michelsonov interferometer ima posebno nastavitvev, ki ji pravimo ekvidistančna lega ogledal. Takrat je interferometer nastavljen popolnoma simetrično in sta optični poti snopov od polprepustnega ogledala do obeh zrcal in nazaj enaki in je fazna razlika enaka 0 za vse valovne dolžine. To pomeni, da dobimo v bližini ekvidistančne lege interferenčne minimume in maksimume hkrati za vse barvne komponente svetlobe. Zato vidimo blizu ekvidistančne lege interferenco tudi z belo svetlobo, kar je soroden pojav kot interferenca na tanki plasti, npr. na oljnem madežu.

Michelsonov interferometer je od svoje prvotne konstrukcije (A.A. Michelson, 1881) do današnjih dni doživel številne variacije in nadgradnje. Z njim je bilo pokazanih nekaj za fizikalno znanost zgodovinsko pomembnih eksperimentov, med katerimi je najbolj znan

Michelson-Morleyev eksperiment, s katerim so ovrgli hipotezo o obstoju vse-obdajajočega etra. Danes se Michelsonovi interferometri uporabljajo za precizno merjenje dolžin in lomnih količnikov, z njimi kontroliramo majhne napake na različnih optičnih komponentah, uporabljamo ga v visoko ločljivi infra-rdeči spektroskopiji (Fourierova spektroskopija), itd.

Merilni inštrument je sestavljen takole: Na kovinski nosilni plošči so pritrjeni deli interferometra: polprepustno zrcalo P (angl. beamsplitter cube) ter ravni zrcali Z1 in Z2 (slika 1). Lastnosti Michelsonovega interferometra so simetrične glede na ravnino ogledala in ima zato dva enakovredna vhoda in izhoda. Izberemo en vhod, ki ga osvetljujemo s svetilom L. Lastnosti svetila lahko dodatno spreminjamo z lečami ali pa na vstopni strani med svetilo in polprepustno zrcalo namestimo še difuzno mlečno steklo D. Zrcalo Z1 je nameščeno na pomičnem nosilcu. Premikamo ga z mikrometrskim vijakom M preko prenosnega mehanizma, ki premik zreducira približno v razmerju 1:5 (če mikrometrski vijak premaknemo za 100 μm , se torej zrcalo Z1 premakne le za okoli 20 μm). Nastavitev zrcala Z2 spreminjamo z dvema justirnim vijakoma.

2 Potrebščine

- Michelsonov interferometer
- He-Ne laser z valovno dolžino $\lambda = (632,8 \pm 0,1) \text{ nm}$
- zračna komora z manometrom in zračna tlačilka
- Hg svetilka in volframska žarnica v istem ohišju
- Na svetilka
- mlečno steklo, difuzor iz belega papirja

3 Naloga

1. Z laserjem naravnaj interferometer ter umeri pomik zrcala Z1 v odvisnosti od nastavitve mikrometrskega vijaka.
2. Izmeri lomni količnik zraka v odvisnosti od zračnega tlaka.
3. Poišči ekvidistančno lego interferometra.
4. Izmeri koherentno dolžino bele svetlobe iz žarnice na volframsko žarilno nitko.
5. Izmeri valovni dolžini Na dubleta.

4 Meritve

Datum izvedbe eksperimenta: 6. 11. 2023

4.1 Določanje prestavnega razmerja mikrometrskega vijaka

Na podlagi dobro določene valovne dolžine He-Ne laserja lahko določimo prestavno premika ogledala Z1 v odvisnosti od nastavitve mikrometrskega vijaka. To storimo s premikanjem zrcala preko več ponovitev interferenčnega vzorca, saj vemo, da se to ponavlja na $\frac{\lambda}{2}$. Iz tega lahko določimo, za koliko se je zrcalo v resnici premaknilo in primerjamo s premikom, ki ga odčitamo iz mikrometrskega vijaka. Podatki za ta del vaje so zbrani v tabeli 1.

Tabela 1: Tabela premikov na mikrometrskem vijaku in števila ponovitev interferenčnega vzorca, ki so bile pri tem opažene.

| Δd [mm] $\pm 0,005$ mm | N |
|--------------------------------|-------------|
| 0,140 | 100 ± 2 |
| 0,160 | 100 ± 2 |
| 0,130 | 85 ± 1 |
| 0,150 | 100 ± 5 |
| 0,085 | 50 ± 1 |

Iz podatkov v tabeli 1 lahko izračunamo prestavno razmerje:

$$\nu = (4,9 \pm 0,1)$$

Torej je znaša pravo prestavno razmerje $1 : (4,9 \pm 0,1)$.

4.2 Lomni količnik zraka v odvisnosti od tlaka

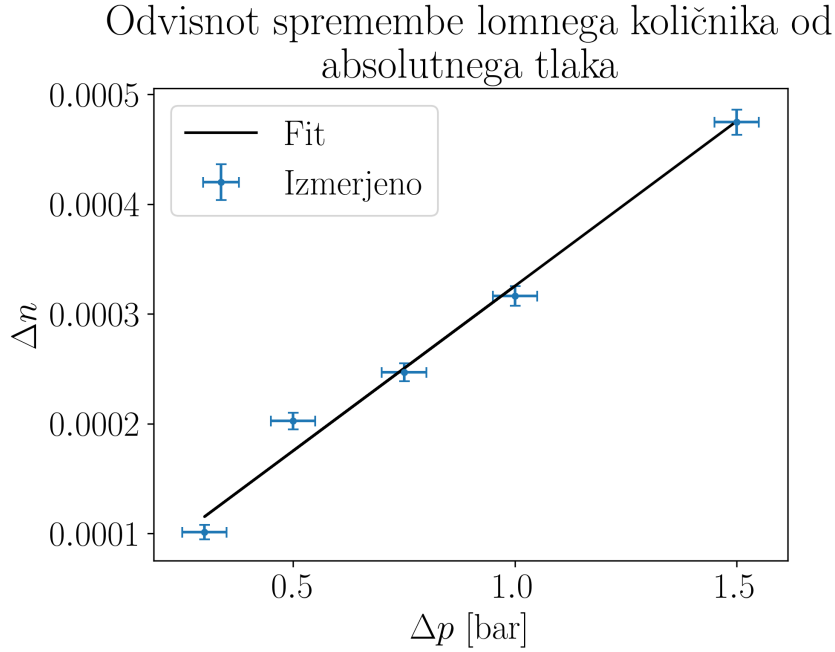
Za ta del vaje postavimo v optično pot enega od krakov interferometra zrakotesno komoro dolžine $l_k = (50 \pm 1)$ mm, v kateri lahko spreminjamo tlak. Ker vemo, da ima vakuum lomni količnik $n_0 = 1$, vzamemo to za vrednost lomnega količnika n pri tlaku $p_0 = 0$. Iz meritve števila prehodov skozi enako interferenčno sliko lahko določimo spremembo poti svetlobe v enem od krakov interferometra zaradi spremembe tlaka. Velja $\Delta n = \frac{N\lambda}{2l_k}$, kar sledi iz podaljšanja poti svetlobe skozi zračno komoro. Iz grafa 2, ki prikazuje Δn kot funkcijo absolutnega tlaka, lahko preko naklona premice določimo odvisnost $n(p)$:

$$n(p) = n_0 + k\Delta p = 1 + (3,0 \pm 0,2) \frac{1}{\text{bar}} \Delta p$$

Podatke, prikazane na grafu 2 najdemo v tabeli 2.

Tabela 2: Tabela števila ponovitev interferenčnega vzorca v odvisnosti od razlike med začetnim in končnim tlakom.

| Δp [bar] $\pm 0,05\text{bar}$ | N ± 1 |
|---------------------------------------|-----------|
| 0,50 | 32 |
| 1,00 | 50 |
| 0,75 | 39 |
| 0,3 | 16 |
| 1,5 | 75 |



Slika 2: Graf Δn v odvisnosti od absolutnega tlaka.

4.3 Iskanje ekvidistančne lege interferometra in meritev koherentne dolžine bele svetlobe

Ekvidistančno lego dosežemo, ko sta zrcala Z1 in Z2 enako oddaljeni od polprepustnega zrcala P.

To dosežemo z uporabo dveh virov svetlobe, z različnima koherentnima dolžinama. To sta Hg svetilka in volframska. Zaradi širše koherentne dolžine Hg svetilke se z njo približamo ekvidistančni legi, natančneje pa jo določimo z volframsko svetilko. Izmerjena vrednost ekvidistančne lege:

$$d_{ekvi} = (6,550 \pm 0,005) \text{ mm}$$

V teh točki lahko z zamikom ogledala Z2 hkrati vidimo več prog, iz katerih lahko ocenimo, po koliko progah pade kontrast za polovico in na podlagi te meritve in znane povprečne valovne dolžine bele svetlobe žarnice $\bar{\lambda} = 550 \text{ nm}$ preko zveze $l_{koh} = m\bar{\lambda}$ ocenimo koherentno dolžino bele svetlobe iz žarnice:

$$m = (4 \pm 1)$$

$$l_{koh} = (2,2 \pm 0,6) \text{ }\mu\text{m}$$

4.4 Meritev valovnih dolžin natrijevega dupleta

Zaradi slabega delovanja natrijeve svetilke tega dela vaje nisem opravljal, pač pa sem dobil podatke od kolega Ervina Mustafića. Te podatki so predstavljeni v tabelah 3 in 4. Iz podatkov iz tabele 3 lahko po enačbi $\bar{\lambda} = 2d_{100}/100$ izračunamo povprečno valovno dolžino obeh črt natrijevega dupleta:

$$\bar{\lambda} = (670 \pm 240) \text{ nm}$$

Tabela 3: Razdalja med 100 progami, izmerjena na mikrometru, oddaljena od Ervinove ekvidistančne lege $d_{ekvi} = (6,77 \pm 0,05)$ mm. Meritvi, ki najbolj odstopata sem zavrgel, saj ju je najverjetneje povzročil mrtvi hod vijaka.

| d [mm] $\pm 0,05$ mm | $N \pm 5$ |
|------------------------|-----------|
| 6,640 | 100 |
| 6,900 | 100 |
| 6,560 | 100 |
| 6,990 | 100 |
| 6,910 | 100 |

Tabela 4: Razdalje med pobleditvami, izmerjene na mikrometru.

| d [mm] $\pm 0,05$ mm | n |
|------------------------|-----|
| 6,760 | 1 |
| 6,800 | 2 |
| 6,830 | 3 |
| 6,880 | 4 |
| 6,920 | 5 |
| 6,970 | 6 |

Iz podatkov iz tabele 4 pa lahko izračunamo razliko valovnih dolžin črt dupleta $\Delta\lambda = \overline{\lambda}^2/(2d_2)$:

$$\Delta\lambda = (18 \pm 13) \text{ nm}$$

5 Analiza rezultatov

Med izvedbo vaje sva imela s kolegom več težav z zanesljivostjo opreme, kar se ponekod pozna na rezultatih. Nikjer ni to bolj očitno kot na rezultatih za natrijev duplet, kjer negotovost rezultata odraža te težave.

Pri določanju prestavnega razmerja mikrometrskega vijaka sva imela težave z zadosti počasnim obračanjem vijaka, da bi videla prehode med vzorci. To bi lahko odpravili s primernejšim prestavnim razmerjem, ali pa z večjim ročajem za vrtenje na mikrometrskem vijaku.

Kjub temu intervali negotovosti vseh vrednosti vsebujejo prvo vrednost, ali pa je pravilen red velikosti, not npr. natrijev duplet, za katerega je prava vrednost 589.592 nm za prvo črto in 588.995 nm za drugo (vir: https://en.wikipedia.org/wiki/Fraunhofer_lines).