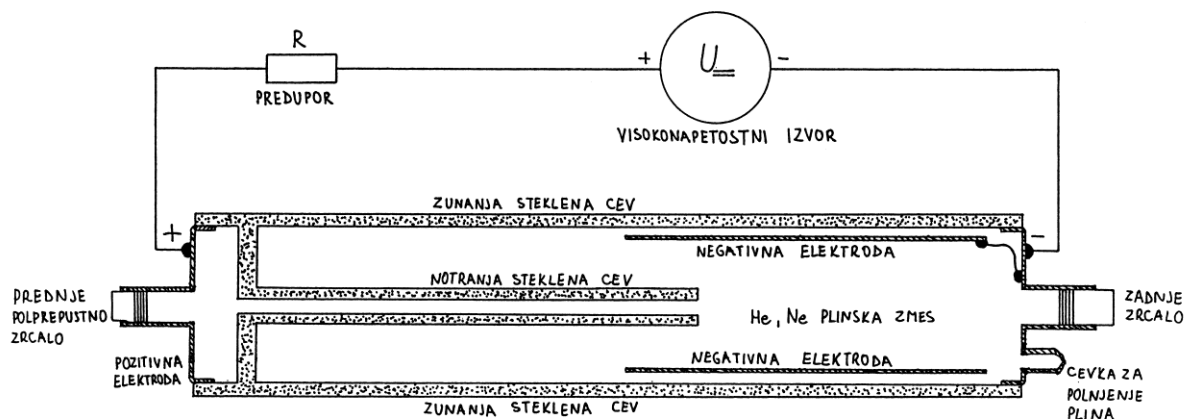


## Rodovi nihanja in lastnosti helij-neonskega laserja

### Rodovi nihanja laserskega izvora

Laserski izvor svetlobe je v marsičem podoben običajnim električnim oscilatorjem. Vsak električni oscilator potrebuje ojačevalnik in povratno vezavo, ki določa frekvenco nihanja oscilatorja. Na frekvenco nihanja električnega oscilatorja seveda vplivajo tudi lastnosti ojačevalnika, predvsem frekvenčni potek ojačenja in nelinearne lastnosti ojačevalnika pri velikih signalih v področju zasičenja.

Laserski izvor svetlobe vsebuje kot ojačevalnik aktivno snov, ki daje lasersko ojačenje svetlobe. Povratno vezavo zagotovimo z zrcali različnih izvedb. Zrcala tvorijo optični resonator, ki je frekvenčno močno odvisen. Tudi lasersko ojačenje aktivne snovi je frekvenčno odvisno. Za razliko od električnih ojačevalnikov, ki se običajno obnašajo kot nizkoprepustna sita, se obnaša lasersko ojačenje kot pasovno sito okoli ene ali več različnih valovnih dolžin, ki ustrezajo laserskim energijskim prehodom v aktivni snovi.



Slika 1: Zgradba He-Ne laserske cevi.

Čeprav se helij-neonski (He-Ne) laser običajno ne uporablja za optične komunikacije po svetlovodih, je delovanje te vrste laserja zelo podobno drugim vrstam laserjev. Za razliko od polprevodniških laserjev je helij-neonski laser mnogo večji, po navadi je v steklenem ohišju in običajno oddaja vidno svetlobo. Zaradi slednjega lahko konstrukcijo laserja in vse pojave opazujemo kar s prostim očesom. Poleg tega se helij-neonski laser uporablja kot izvor zelo kvalitetne svetlobe za celo vrsto poskusov v optiki. Zaradi velike dolžine optičnega resonatorja (okoli 30000 valovnih dolžin) je frekvenčni spekter He-Ne laserja zelo ozek, dosti ožji od polprevodniških laserjev.

Ker je aktivna laserska snov zmes plinov, mora biti ohišje laserja hermetično zaprta cev: to je naloga zunanje steklene cevi in dveh kovinskih pokrovov, privarjenih na oba konca cevi. Energijo za delovanje dovajamo v plinsko zmes preko električnega preboja v plinu. Električno gledano je He-Ne laser torej tlivka, z nekaterimi posebnostmi. V He-Ne laserju je aktivna laserska snov plin neon. Dodatek helija znatno izboljšuje izkoristek črpanja ustreznih energijskih nivojev neona, kar omogoči da sploh dosežemo lasersko ojačenje svetlobe.

Elektrode tlivke so zelo velike, da omejujemo segrevanje. V tlivkah se najbolj segreva negativna elektroda zaradi katodnega padca potenciala tik ob površini elektrode. Iz tega razloga kot katoda ne zadošča sam pokrovček cevi, pač pa je v stekleno cev vgrajena dodatna

kovinska cev kot negativna elektroda. Če se elektrode He-Ne laserja pregrejejo, to lahko povzroči osvoboditev plinov, ujetih na površini kovin, ki spremenijo sestavo plinov v cevi in preprečijo delovanje laserja.

Za vse vrste laserjev je značilno, da moramo dovesti zelo veliko količino energije na enoto aktivne snovi, da sploh dosežemo uporabno lasersko ojačenje. V plinskem laserju to storimo tako, da pot električnemu preboju zožimo na manj kot kvadratni milimeter s pomočjo dodatne, notranje steklene cevi. Čeprav med delovanjem laserja opazimo žarenje plina tudi drugod, je žarenje plina v notranji cevi dosti močnejše in samo tu pride do pojava laserskega ojačenja svetlobe. Ozka steklena cev je potrebna tudi zato, ker se spodnji energijski nivo neona prazni pri trkih atomov neona ob steno cevi.

Da dosežemo samostojno nihanje laserja, moramo aktivno lasersko snov vstaviti v resonator, ki daje na določenih frekvencah zadosti močno povratno vezavo. Resonator sestavimo iz dveh zrcal na obeh koncih cevi. Zrcala so izdelana iz stekla, ki je na notranji strani prevlečeno z več plastmi različnih dielektrikov. Debeline in lomni količniki teh plasti so tako izbrani, da dosežemo odboj na željeni valovni dolžini in preprečimo odboj na drugih valovnih dolžinah.

Če bi izdelali resonator He-Ne laserja z idealnimi zrcali, ki enako odbijajo vse valovne dolžine, bi takšen laser deloval v bližnjem infrardečem (nevidnem) področju, ker je tu ojačenje aktivne snovi največje. Da dosežemo delovanje laserja na valovni dolžini 632.8 nm (rdeča svetloba), potrebujemo zrcala, ki dobro odbijajo to valovno dolžino in hkrati čim manj odbijajo infrardečo svetlobo. S primernimi (frekvenčno-odvisnimi) zrcali dosežemo nihanje laserja tudi na drugih valovnih dolžinah v vidnem spektru (oranžna, rumena ali zelena svetloba).

He-Ne laserska cev je običajno dolga okoli 20 cm. Pri tej dolžini cevi potrebujemo za optimalno delovanje laserja na eni strani polprepustno zrcalo, ki prepušča približno 5 % vpadne svetlobe ter odbija preostalih 95 % svetlobe nazaj v laser. Na drugi strani laserskega resonatorja bi želeli idealno zrcalo za delovno valovno dolžino 632.8 nm, vendar v praksi dobimo tudi tu nekaj prepuščene svetlobe.

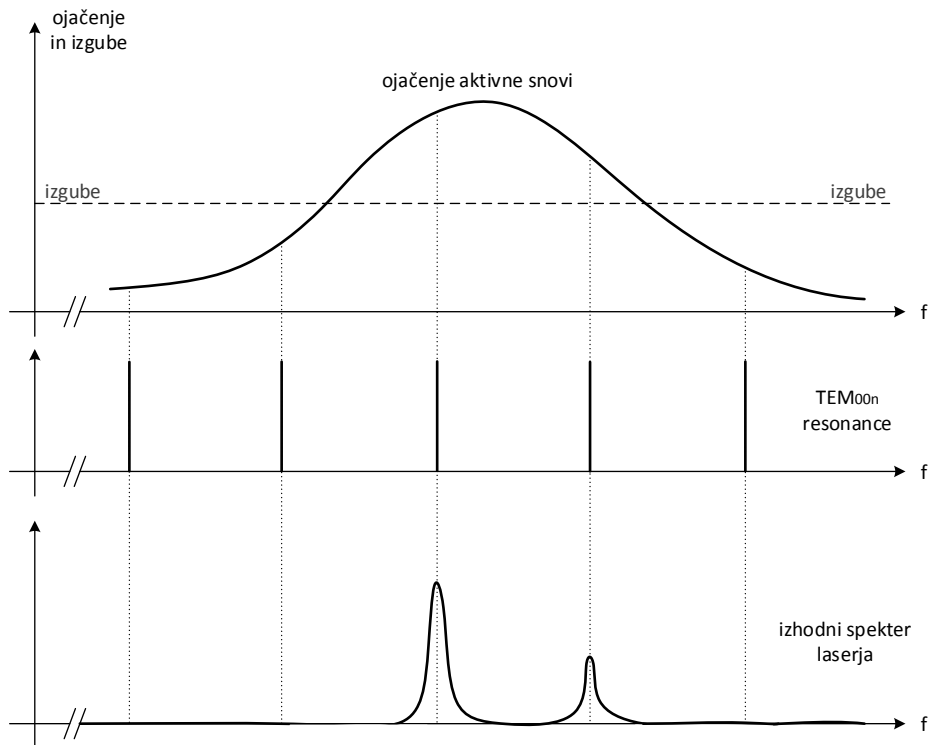
Frekvenčni potek in število resonančnih frekvenc optičnega resonatorja sta odvisna od vrste uporabljenih zrcal in njihove medsebojne namestitve. V laserjih z dvema koncentriranimi zrcalom na obeh koncih resonatorja (imenovan tudi Fabry-Perot ali FP resonator) je število resonančnih frekvenc izredno visoko, nekje med 1000 in 1000000. Število resonančnih frekvenc lahko znižamo z uporabo frekvenčno odvisnih zrcal oziroma z uporabo porazdeljene povratne vezave (angl. distributed feed-back ali DFB laser).

Kot posledica velikega števila resonančnih frekvenc laserji običajno nihajo na več različnih valovnih dolžinah hkrati. Ker so laserski resonatorji običajno podolgovate oblike, največkrat opazimo le vzdolžne rodove vrste  $TEM_{00n}$ . Pri širših resonatorjih (laserji velike moči) opazimo tudi pojav prečnih rodov vrste  $TE_{lmn}$  in  $TM_{lmn}$ . Medtem ko vzdolžni rodovi kazijo le frekvenčni spekter izhodne svetlobe, prečni rodovi kazijo tudi obliko izhodnega žarka laserja.

Vzbujeni Ne atomi so razmeroma ozkopasoven ojačevalnik na frekvenci 474 THz, ki ustreza valovni dolžini 632.8 nm. Frekvenčna pasovna širina ojačenja aktivne snovi (vzbujenih Ne atomov) je v velikostnem razredu nekaj GHz oziroma komaj nekaj milijonink osrednje frekvence 474 THz.

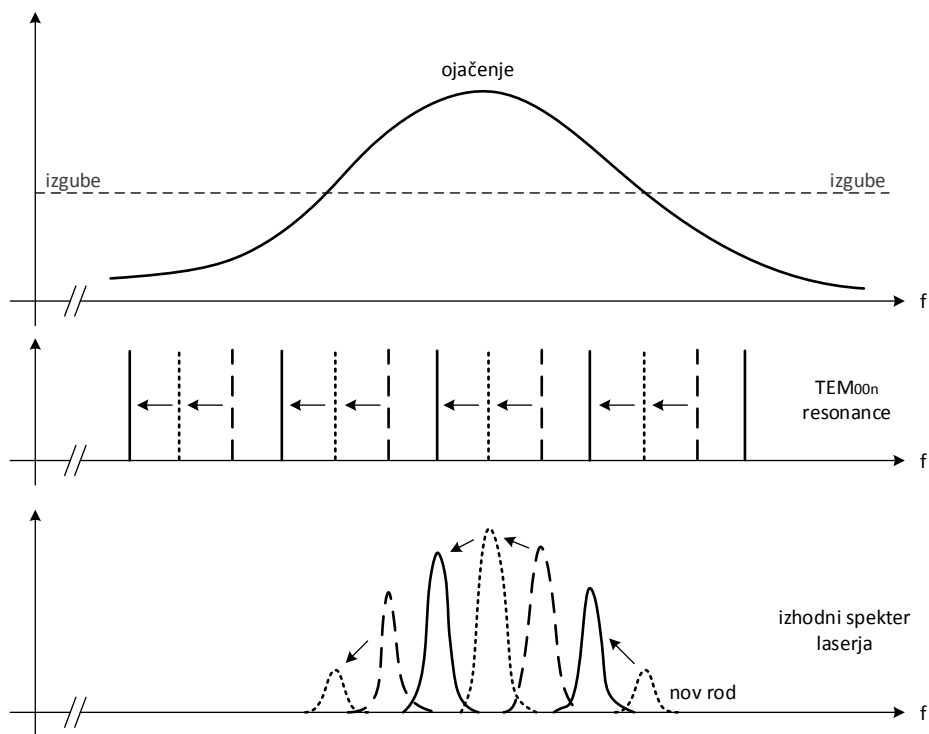
Pri dolžini laserske cevi 250 mm so posamične resonančne frekvence TEM rodov med sabo razmaknjene za 600 MHz. Pasovna širina vsake posamične resonance je v velikostnem

razredu 1 MHz. Helij-neonski laser zato običajno niha na več spektralnih črtah hkrati, kot je to prikazano na Sliki 2.



Slika 2: Ojačenje, izgube, resonance in spekter He-Ne laserja

Hkrati lahko začne laser nihati na povsem novem rodu, ki je ravnokar vstopil v območje zadostnega ojačenja aktivne snovi. Ob vklopu He-Ne laserja opazimo pojav preskoka rodov s periodo v velikostnem razredu 10 sekund. Z rastočo temperaturo cevi postaja pojav počasnejši in se povsem ustavi, ko doseže temperatura cevi ravnotežno stanje.



Slika 3: Časovni razvoj frekvenčnega spektra laserja

Zaradi rotacijsko-simetrične konstrukcije laserske cevi je polarizacija He-Ne laserja nedoločena. Zaradi pozitivne povratne vezave v laserju bo tudi najmanjša dvolomnost zrcal povzročila, da bo laser rajši nihal z določeno polarizacijo. Ravnina polarizacije je nestabilna in se s segrevanjem laserske cevi počasi spreminja.

Delovanje He-Ne laserja s povsem določeno linearno polarizacijo dosežemo z vgradnjo steklene ploščice v resonator, ki mora biti nagnjena za Brewster-jev kot glede na smer žarka v resonatorju. Brewster-jevo okno sicer odbija komaj kakšnih 10 % svetlobe z nezaželeno polarizacijo, vendar je to povsem zadosti, da prepreči nihanje laserja z neželeno polarizacijo.

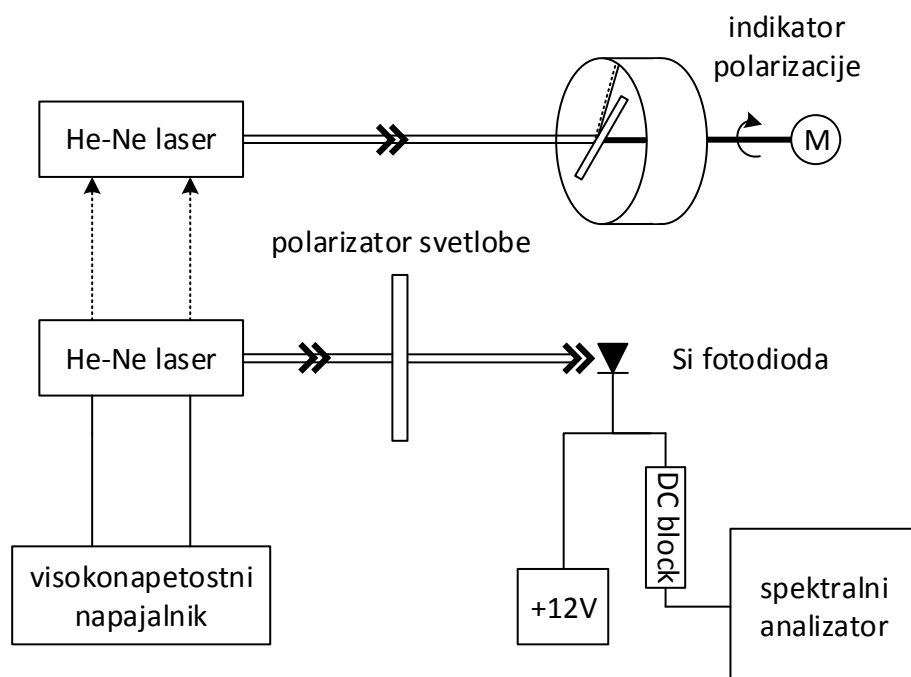
Tudi ko He-Ne laserska cev nima vgrajenega Brewstrovega okna, so posamični TEM rodovi linearno polarizirani. V nepolarizirani laserski cevi so sosednji rodovi vedno ortogonalno polarizirani, zato se s preskokom rodov menja tudi polarizacija izhodne svetlobe.

### Seznam potrebnih pripomočkov

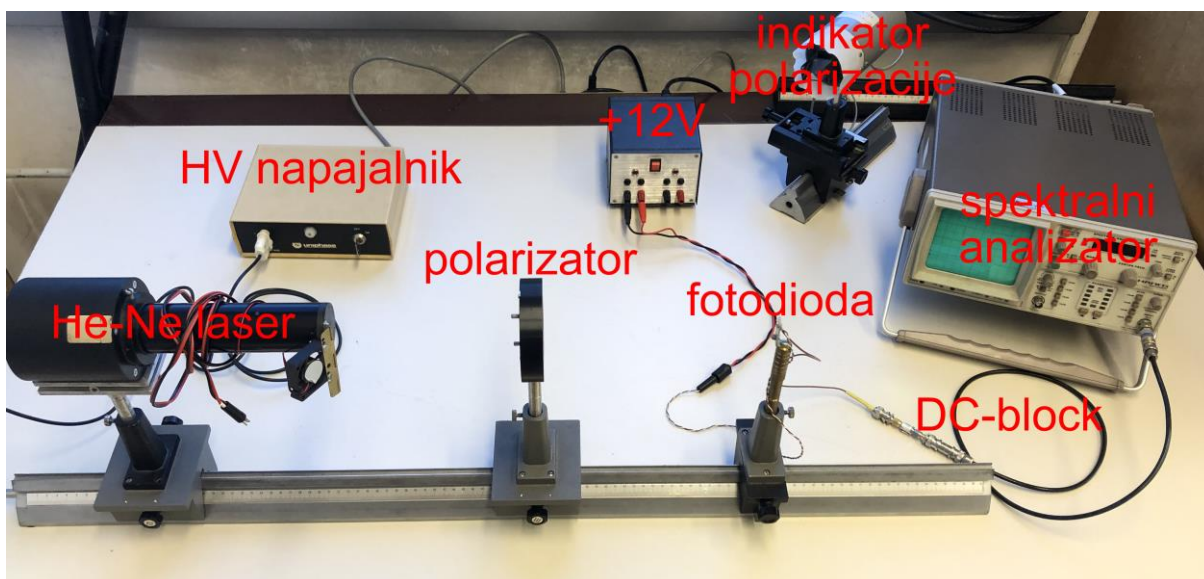
Za izvedbo vaje potrebujemo:

- Običajno, nepolarizirano He-Ne lasersko cev (brez ohišja)
- Polarizirano He-Ne lasersko cev (z ohišjem)
- Visokonapetostni izvor za napajanje cevi
- Si fotodiodo s predojačevalnikom in napajalnikom
- Mikrovalovni (radijski) spektralni analizator 0-2 GHz
- Nastavljivi polarizator svetlobe
- Indikator polarizacije svetlobe z vrtečim Brewstrovim zrcalom
- Optično klop s podstavki za sestavljanje vaje

Postavitev merilnih pripomočkov prikazuje Slika 4, razporeditev pa Slika 5.



Slika 4: Skica vezave merilnih pripomočkov



Slika 5: Slika vezave merilnih pripomočkov

### Opis poteka vaje

Za napajanje laserske cevi potrebujemo ustrezen visokonapetostni izvor. Laserska cev dane dolžine potrebuje za vžig napetost okoli 6 kV, med normalnim delovanjem pa znaša padec napetosti na cevi okoli 1200 V. Idealen izvor za napajanje laserske cevi je tokovni generator, praktično pa uporabljamo napetostni izvor z zaporedno vezanim preduporom.

Pri priključitvi cevi pazimo na polariteto. Laserska cev bi sicer delovala tudi z obratno polariteto oziroma pri napajanju z izmeničnim tokom, vendar bi se zaradi prekomernega segrevanja elektrod življenjska doba cevi precej zmanjšala.

Med delovanjem cevi opazimo močno svetlo-roza-rdečo svetlobo predvsem v notranjosti tanke notranje cevi. Ta svetloba vsebuje več povsem različnih spektralnih črt in je odvisna izključno od plinske zmesi ter jakosti toka skozi cev. Vzdolžna in prečna koherentna dolžina te svetlobe so zelo majhne in ustrezajo svetlobi tlivke, zato s takšno svetlobo težko opazimo interferenčne pojave.

Na obeh koncih laserske cevi pa izhaja svetloba povsem drugačne rdeče barve. Ker so rodovi v laserskem resonatorju skoraj TEM, nihajo zaključne ploskve resonatorja – zrcala skoraj povsem sofazno in je laserska svetloba usmerjena v obliko tankega žarka, ki po premeru ustreza premeru notranje steklene cevi v laserski cevi. Zaradi velike vzdolžne in prečne koherentne dolžine opazimo interferenčne pojave (migotanje, zrnatost) na vseh predmetih, ki so obsijani z lasersko svetlobo.

Izkoristek He-Ne laserja je zelo majhen. Cev dolžine 20 cm normalno deluje pri toku 5 mA in napetosti 1200 V, se pravi troši električno moč 6 W, izhodna svetlobna moč v obliki laserske svetlobe pa znaša komaj 2 mW. Kljub majhni moči je laserska svetloba nevarna za človeško oko, ker zaradi velike prečne koherentne dolžine oko fokusira lasersko svetlobo v eno samo točko na mrežnici.

Polarizacijo laserske cevi preverimo s pomočjo polarizatorja svetlobe, ki ga vstavimo kot analizador v izhodni svetlobni snop. Pri polarizirani laserski cevi lahko z vrtenjem polarizatorja poiščemo oster minimum, ki se s časom ne spreminja. Pri nepolarizirani cevi lahko sicer tudi

najdemo minimum, ki pa začne slabeti, povsem izgine in se čez čas spet prikaže na istem mestu, to je pri istem kotu zasuka analizatorja.

Vzdolžni rodovi v helij-neonskem laserju se neposredno kažejo v frekvenčnem spektru izhodne svetlobe, zato jih lahko neposredno opazujemo z optičnim spektralnim analizatorjem. Nihanje He-Ne laserja na več rodovih zmanjšuje za več velikostnih razredov koherentno dolžino izhodne svetlobe, kar lahko opazujemo z interferometrom.

Usihanje posameznih rodov, pojav novih rodov in preskakovanje med rodovi opazimo tudi s fotodiodo kot majhne spremembe izhodne moči laserja. Nihanje laserja na več rodovih lahko povzroči interferenčni pojav, ki ga opazimo kot amplitudno modulacijo izhodne svetlobe s povsem določenimi frekvencami, ki natančno ustrezajo dolžini laserske cevi.

Glede na dolžine razpoložljivih laserskih cevi pričakujemo električne signale v frekvenčnem področju od 300 MHz do 1000 MHz. Takšne signale najlažje opazujemo in izmerimo z mikrovalovnim (radijskim) spektralnim analizatorjem. Iz izmerjene frekvence lahko potem natančno izračunamo razdaljo med zrcali znotraj laserske cevi. Iz celotnega frekvenčnega spektra lahko tudi določimo število rodov, na katerih hkrati niha laserska cev.

Interferenco med rodovi He-Ne laserja najlažje opazimo pri polarizirani laserski cevi, saj imajo tu vsi rodovi isto polarizacijo in bo interferenčni pojav na fotodiodi vedno viden. Pri nepolarizirani He-Ne laserski cevi so sosednji rodovi med sabo ortogonalno polarizirani, zato takšna svetloba ne tvori nobenega interferenčnega pojava na fotodiodi.

Pri nepolarizirani He-Ne laserski cevi zato najprej določimo obe ravnini polarizacije rodov s pomočjo indikatorja polarizacije z vrtečim Brewstrovim zrcalom. Nato lasersko cev usmerimo na fotodiodo, vmes pa vstavimo polarizator. Polarizator zavrtimo tako, da je njegova ravnina pod kotom  $45^\circ$  glede na ravnini rodov v laserski cevi. Ko na mikrovalovnem spektralnem analizatorju opazimo interferenčni signal, z vrtenjem polarizatorja poskusimo izboljšati maksimum. Če pri nepolarizirani laserski cevi odstranimo zunanji polarizator, interferenčni pojav izgine oziroma močno oslabi.

Kot rezultat vaje si na koncu zabeležimo oznako in vrsto izmerjenih laserskih cevi, izmerjeno frekvenco interference rodov, izračunano razdaljo med zrcali laserskega resonatorja in število rodov. Pri daljših ceveh lahko opazimo interferenco med več kot dvema rodovoma, kar opazimo kot višje harmonske frekvence ter kot dodaten interferenčni pojav v okolici osnovne interferenčne frekvence, saj razlike frekvenc posameznih rodov niso povsem enake.

### Naloga

1. Izmerite dimenzije laserske cevi, določite polarizacijo.
2. S pomočjo spektralnega analizatorja izmerite frekvenco interference rodov, število rodov, ter iz podatkov izračunajte razdaljo med zrcali laserskega resonatorja.