

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

MARINA MARIĆ

FIZIKA S LASERSKIM
POINTERIMA
MICHELSONOV I MACH ZEHNDEROV
INTERFEROMETAR

DIPLOMSKI RAD

ZAGREB, 2008.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
FIZIČKI ODSJEK

SMJER: PROFESOR FIZIKE

Marina Marić

Diplomski rad

FIZIKA S LASERSKIM
POINTERIMA
MICHELSONOV I MACH ZAHNDEROV
INTERFEROMETAR

Voditelj diplomskog rada: Dr. sc. Goran Pichler

Ocjena diplomskog rada:	_____
Povjerenstvo:	1. _____
	2. _____
	3. _____
Datum polaganja:	_____

Zagreb, 2008.

*Mojoj mami i seki,
jer ste jednostavno najbolje*

HVALA!

Svima koji su uvijek bili uz mene.

Mojim prijateljima za sve razgovore, razumijevanje i pomoć koju su mi pružili tijekom studija.

Mojoj obitelji, posebno mami i sestri na svemu što su činile da mi olakšaju studiranje, na beskrajnom strpljenju, razmišljanju, stalnoj potpori i ljubavi.

Veliko HVALA mentoru dr. Goranu Pichleru na pruženoj prilici da unutar njegove grupe izradim Diplomski rad te čitavoj grupi za pomoć. Hvala Vam na iznimnoj pomoći, brojnim savjetima i satima posvećenim mom Diplomskom radu te svom znanju stečenom u to vrijeme.

SADRŽAJ

1. UVOD	2
2. Nd:YAG LASER	7
3. LASERSKI POKAZIVAČI	9
4. SPEKTROSKOPSKA MJERENJA	15
4.1 SPEKTROSKOPIJA	15
4.2 MJERENJA SPEKTRA	17
5. INTERFEROMETRIJA	21
6. MICHELSONOV INTERFEROMETAR	23
7. MACH ZEHNDEROV INTERFEROMETAR	26
8. MJERENJA S INTERFEROMETRIMA	29
8.1 MICHELSONOV INTERFEROMETAR	30
8.2 MACH ZEHNDEROV INTERFEROMETAR	34
9. ZAKLJUČAK	38
10. METODIČKI DIO	40
LITERATURA	46

1 UVOD

Svjetlost je oduvijek fascinirala ljude. Postoje različite teorije o svjetlosti još iz vremena prije Krista, pa sve do sada. 1700. godine Isaac Newton objasnio je neka svojstva svjetlosti, kao na primjer dugu, koja se javlja poslije kiše. Prema njemu, svjetlost putuje u ravnim linijama, ali se sastoji od sitnih čestica. Bio je samo djelomično u pravu. 1800-tih se otkriva da se svjetlost širi kao val i da se sastoji od različitih valnih duljina, frekvencija i amplituda. Tu teoriju predložio je Christian Huygens. Pokazalo se da su i Huygens i Newton djelomično u pravu. Ponekad se svjetlost ponaša kao val, a ponekad kao čestica.

Svjetlost je elektromagnetski val koji se može širiti i kroz vakuum, jer ne titraju čestice već električno i magnetsko polje u harmonijskom skladu. Nekohherentna je i može se dobiti iz mnogo izvora (sunce, žarulja, užarena čvrsta tijela...).

1917 godine Albert Einstein je jednostavnim izvodom dobio formulu za raspodjelu zračenja apsolutno crnog tijela. Pri tome je pretpostavio da postoji stimulirana emisija. To je, mnogo godina kasnije iskorišteno za otkriće masera, prethodnika lasera, i samog lasera. Maser je uređaj koji proizvodi koherentne elektromagnetske valove u mikrovalnom području spektra pomoću stimulirane emisije.

Prvi MASER u vidljivom spektru otkriven je 1960 godine, a napravio ga je Theodore H. Maiman i nazvao ga laser. Maiman je pomoću bljeskalice pobuđivao kristal rubina i proizveo lasersku svjetlost valne duljine od 694 nm.

Od tada do danas otkriveni su mnogobrojni laserski sistemi . Već 1960 godine pojavili su se prvi laseri s helijem i neonom.

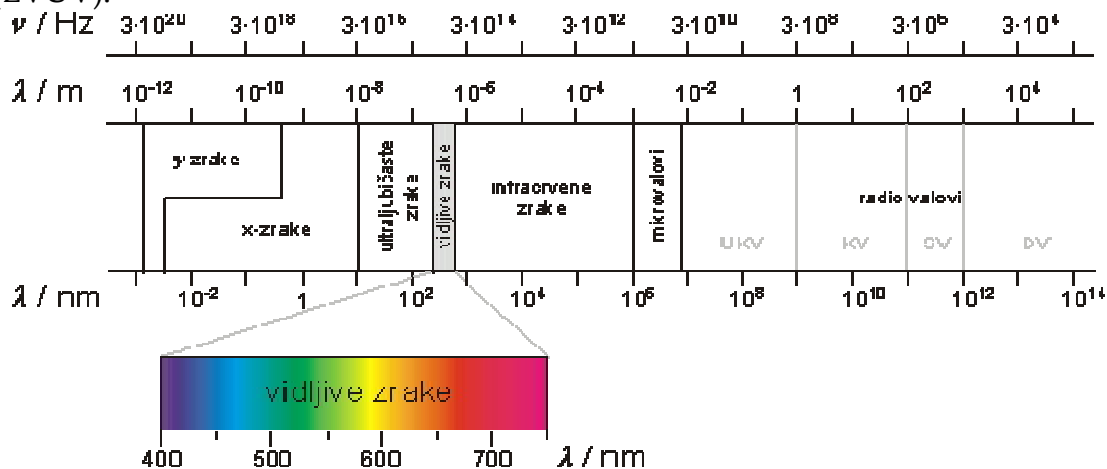
Laser - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation - naziv je za optičku napravu koja emitira koherentni snop fotona.

Za razliku od svjetlosti koju emitiraju uobičajeni izvori, kao što su žarulje, laserska je svjetlost redovito gotovo monokromatična, tj. samo jedne valne duljine (boje) i usmjerena je u uskom snopu. Snop je koherentan, što znači da su elektromagnetski valovi međusobno u istoj fazi i šire se u istom smjeru.

Vidljiva svjetlost je samo dio spektra elektromagnetskih valova. Upravo to je pretpostavio James Clark Maxwell, premda nije uspio dokazati svoju teoriju uskoro su otkrivena i druga zračenja.

Postoje mnoge vrste elektromagnetskih zračenja, pri čemu sve putuju brzinom svjetlosti. To su gama zrake, x zrake, ultraljubičasto zračenje, infracrveno zračenje, vidljiva svjetlost, radiovalovi i mikrovalovi, teraherzno zračenje (daleko infracrveno područje). Laseri mogu raditi u području koje se proteže

od područja koji ide od infracrvenog do ekstremno vakuum ultraljubičastog (EVUV).



Slika 1-1 Spektar elektromagnetskih valova

Laseri rade na principu stimulirane emisije.

Ako je elektron u višoj orbiti, atom u pobuđenom stanju ima tendenciju da padne u osnovno stanje. Pri tome se emitira foton, to jest dolazi do spontane emisije. Fotoni su čestice koje se mogu opisati kao elektromagnetski energijski paket određene frekvencije ν . Svaki foton ima energiju $E_f = h\nu$ (h - Planckova konstanta). Pri svakom prijelazu iz višeg u niže energijsko stanje atom emitira foton kojemu je energija jednaka razlici energija tih dvaju stanja.

$$E_2 - E_1 = h\nu$$

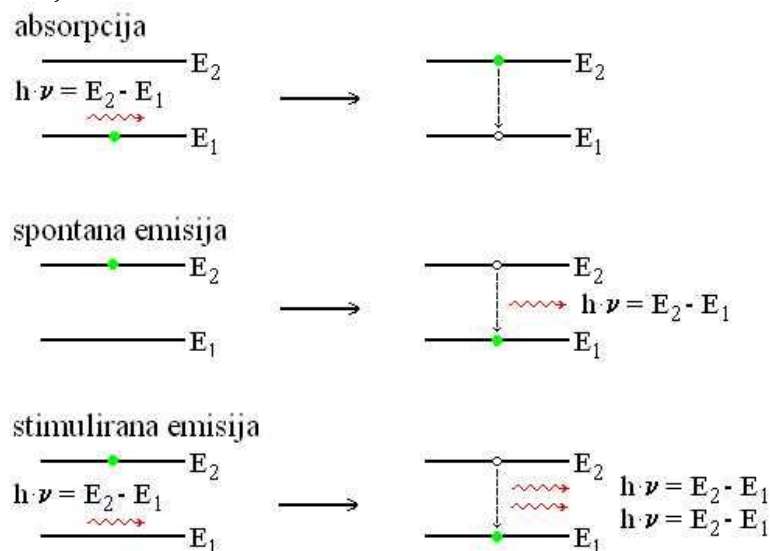
Albert Einstein se pitao što bi se dogodilo da su atomi već u pobuđenom stanju kada bi naišao foton odgovarajuće energije^[1]. Normalno razmišljanje bi bilo da će atom preći u stanje još više energije. No doći će do emisije fotona, a stimulirajući foton će nastaviti svoj put. Nakon procesa stimulirane emisije nastaju dva fotona jednake energije ili valne duljine, iste polarizacije i posve istog smjer. To je bila osnovna ideja koja je kasnije odvela do lasera.

Ako bi se moglo pogoditi atome s rezonantnim fotonima i pripremiti dovoljno atoma u pobuđenom stanju, moglo bi se stimulirati emisiju više fotona te bi se našli na putu za dobivanje laserske svjetlosti. Elektroni imaju kratko vrijeme života pobuđenog stanja (10 ns) pa je mala šansa da će i rezonantni foton naići u to kratko vrijeme. No ipak, šanse postoje.

Stimulirana emisija je rijetka i ne događa se bez vanjskog utjecaja, jer atomi teže stanju najmanjih mogućih energija. Nužno je postići da se više atoma nađe u pobuđenom stanju. To se naziva inverzija naseljenosti. Da bi došlo do nje, trebaju se pobuditi atomi i molekule na viši nivo energije. Većina se vrati u stanje niže energije toliko brzo da je pokušaj uzaludan. Ali ako se

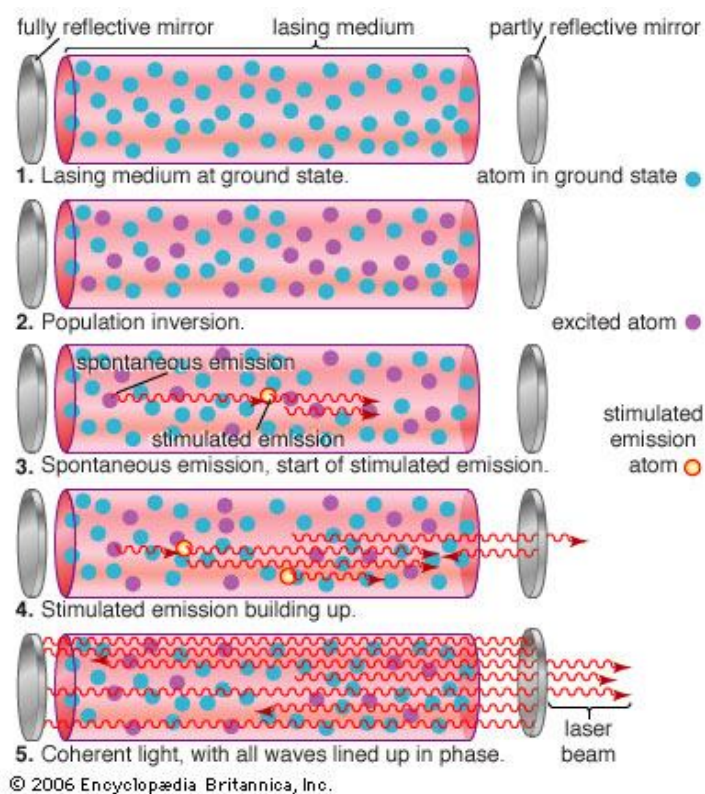
¹ Rezonantni foton kojemu je energija jednaka razlici energija višeg i nižeg energijskog stanja $E_2 - E_1 = h\nu$

pumpaju odgovarajući atomi s rezonantnom energijom na pravi način, rezultat je inverzija naseljenosti.



Slika 1-2 Absorpcija, spontana i stimulirana emisija

Stimulirana emisija ne mora biti u obliku zrake u određenom smjeru. Foton prave energije može stimulirati emisiju bez obzira na smjer u kojem ide. Tada nastaje npr. crveno svjetlo bez usmjerene zrake.

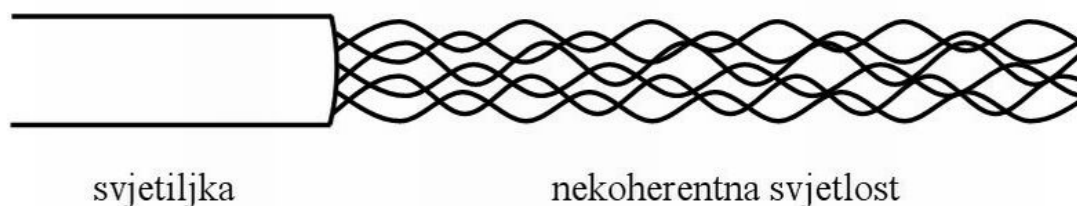


Slika 1-3 Proces nastajanja laserske svjetlosti unutar lasera

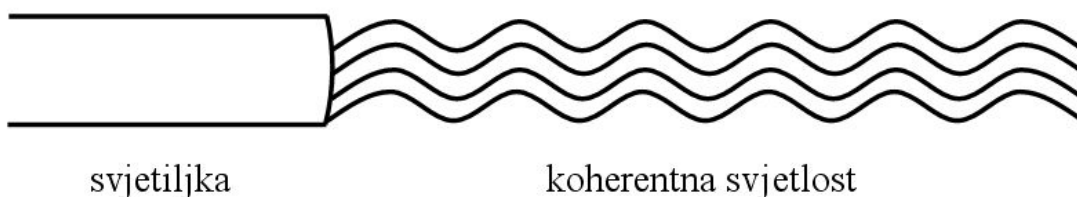
Theodor Maiman je baze valjka od rubina polirao, učinio ih glatkim i ravnim te ih napario srebrom tako da bi što bolje reflektirali svjetlost. To je učinilo veliku razliku, jer se svjetlost reflektirana s plašta valjka nije vraćala, dok se svjetlost reflektirana s baznih ploha vraćala unutar rubinskog štapića. Jedno od srebrnih zrcala je polupropusno i propušta dio svjetlosti. Dio koji se vraća u unutrašnjost rubina izaziva stimuliranu emisiju, a dio koji izlazi je laserska svjetlost.

Laserske zrake su paralelne, pa ih jednostavne leće mogu fokusirati. Zbog toga je laser idealan za operacije ili rezanje različitih materijala.

Laseri mogu proizvesti svjetlost u vrlo uskom rasponu frekvencija – tako da je samo jedne boje. Kažemo da je laserska svjetlost monokromatska. Laserska svjetlost je koherentna. To je omogućeno stimuliranom emisijom. Kad jedan foton stimulira emisiju drugog, novi foton započinje život u istoj fazi kao i onaj koji ga je stimulirao. Znači dol se podudara s dolom i brijeg s brijegom, tj. koherentni su. Koherentna duljina lasera ograničena je na nekoliko kilometara. Za usporedbu, monokromatske lampe, koje daju približno koherentnu svjetlost, imaju koherentnu duljinu samo nekoliko centimetara.



Slika 1-4 Nekoherentni izvor svjetlosti



Slika 1-5 Koherentni izvor svjetlosti

Lasери se dijele s obzirom na prirodu medija koji se koristi za proizvodnju laserske zrake: laseri s čvrstom jezgrom, plinski laseri, kemijski laseri, laseri s bojilima i laseri sa slobodnim elektronima.

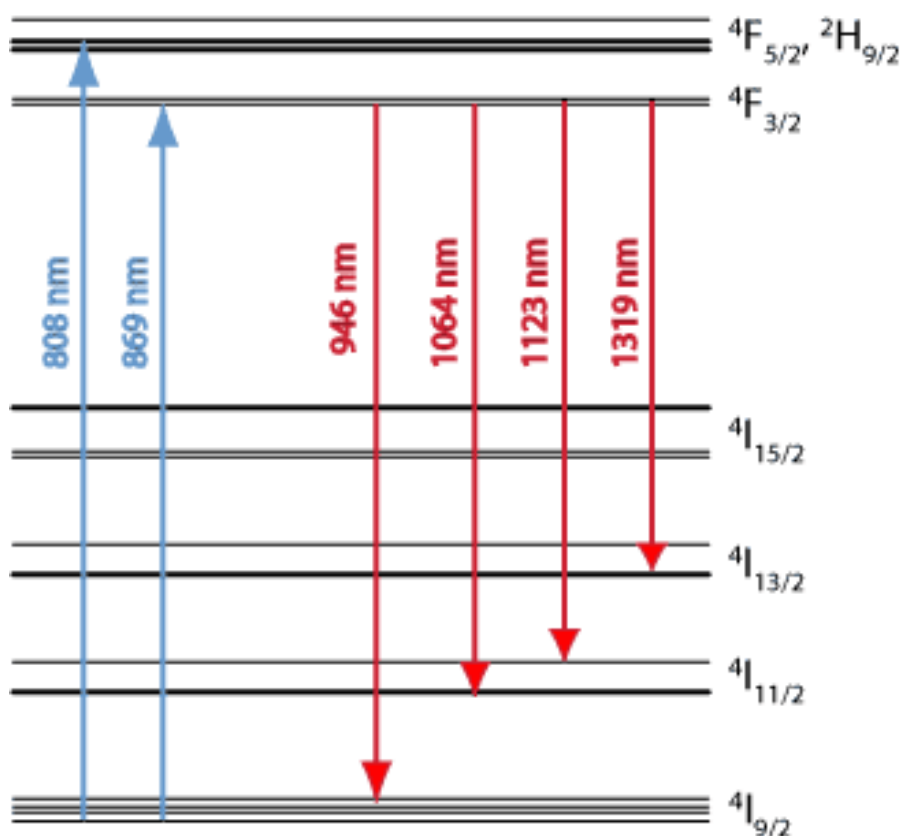
Danas se primjenjuju u gotovo svim područjima ljudskog djelovanja.

Laseri s krutom jezgrom koriste se za rezanje, bušenje i varenje. Laseri se koriste u kirurgiji, zbog velike preciznosti prilikom obrade materijala, npr. u kirurgiji oka, liječenja dalekovidnosti i kratkovidnosti, iskorišteni su i za novu definiciju metra, što je bitno za nastavu fizike. Također, brzina svjetlosti mjeri se pomoću lasera. Koriste se za označavanje položaja, pomoću njih je izmjerena udaljenost od Zemlje do Mjeseca s velikom točnošću, koriste se za pohranu i očitavanje na CD i DVD medijima, u laserskim printerima, spektroskopiji, u vojnoj tehnologiji... Ovo je samo dio primjene lasera pa je stoga i očito koliko su važni i koliko široku primjenu imaju u životu. Zbog svega nabrojanog jasno je da je izrazito važno u nastavi fizike detaljno obraditi lasere, pomoću pokusa pokazati svojstva lasera i to sve proširiti na interferometriju.

2 Nd:YAG LASER

Nd:YAG laser je najčešći tip lasera s čvrstom jezgrom. Stakla i kristali se dopiraju s jedan posto neodimijuma po jedinici mase. Time je koncentracija neodimijuma reda veličine 10^{20} atoma po cm^3 što se smatra optimalnim za rad lasera. Neodimijum se najčešće dopira u itrij aluminij granat. Atomi neodimija su slične veličine kao i atomi itrija, pa ga mogu zamijeniti u strukturi. To je umjetno dobiveni kristal sa strukturom sličnom granatu. Njegova kemijska formula je $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ a svijetu je poznat po akronimu YAG.

Nd:Yag je četverostupanjski laser, koji emitira infracrveno zračenje valne duljine 1064 nm. Može se prilagoditi i valnim duljinama od 940, 1120, 1320, i 1440 nm. Osim toga laserska zraka iz ovog lasera može se usmjeriti u kristal s nelinearnim optičkim svojstvima, čime će se dobiti laserska zraka s fotonima koji imaju dvostruko veću energiju od onih koji su upali u kristal. Tako dobivena valna duljina je: 532 nm, što je zelena svjetlost.



Slika 2-1 Absorbirane i emitirane valne duljine

YAG ima poželjne optičke, mehaničke i toplinske karakteristike. Iako nije idealan laserski materijal, najbolji je za mnoge primjene neodimijuma. Najveća

prednost su mu toplinske karakteristike koje omogućavaju kontinuirani snop dobre kvalitete Nd-YAG laseru, a kojeg većina lasera s čvrstom jezgrom pri sobnoj temperaturi ne mogu postići. Problem sa rastom kristala, uključujući brzinu rasta i ravnomjernost rasta materijala ograničava veličinu YAG-a. YAG raste otprilike 0,5mm/h pa je potrebno nekoliko tjedana za stvaranje kristala 10 do 15 cm duljine. Nd-YAG je ograničen veličinom, dok se stakla dopirana neodimiumom mogu proizvesti puno veća. Osim što mogu biti veća, mogu se dopirati sa većom koncentracijom neodimiuma i mogu pohraniti više energije po volumenu, ali osnovni problem su im loše toplinske karakteristike. Toplinska vodljivost je mnogo manja nego kod YAG-a i toplinski gradijent u staklu smanjuje kvalitetu snopa.

Kristal granata ima veliku toplinsku vodljivost, pa se ovaj laser može upotrebljavati u kontinuiranom modu.

Svojstva Nd:YAG lasera	Vrijednosti
Kemijska formula	$\text{Nd}^{3+};\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$
Kristalna struktura	kubična
Gustoća mase	$4,56\text{g/cm}^3$
Youngov modul	280 GPa
Temperatura taljenja	1970°C
Temperaturni koeficijent rastezanja	$7 - 8 \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$
Indeks loma pri 1064nm	1,82

Tabela 2-1 Neka svojstva Nd:Yag lasera

3 LASERSKI POKAZIVAČI

Laserski pokazivači su prenosivi laseri veličine olovke. Većina laserskih pokazivača imaju toliko malenu energiju da ne oštećuju vid. Sami snop svjetlosti pri prolasku kroz zrak nije vidljiv, tek raspršenjem na česticama prašine možemo vidjeti sam snop.

Koriste se pri edukacijskim i poslovnim prezentacijama, i općenito na mjestima gdje treba nešto pokazati, a nije dostupno ni praktično pokazivanje rukom. Laserski pokazivači vrlo su korisni pri izvođenju eksperimenata u školi.

Njima možemo pokazati najvažnija valna svojstva svjetlosti kao što su ogib, polarizacija i interferencija, možemo objasniti koherentnost, a ujedno i dokazati da je laserska svjetlost polarizirana. Bez daljnjeg nabiranja jasno je koliko laserski pokazivači imaju široku primjenu, cijenom su dostupni i ako se pravilno koriste, ne predstavljaju opasnost niti mogu izazvati oštećenja.

Crveni laserski pokazivač valne duljine 655 nm je najjednostavnija vrsta pokazivača jer su diode dostupne u tim valnim duljinama. To je zapravo dioda koja se napaja baterijama.

Zeleni laser valne duljine 532 nm je opisan u poglavlju Nd-YAG lasera.

Rastavili smo zeleni laser. Prvo smo skinuli gornji zaštitni sloj. Tada smo na vrhu mogli uočiti leću a danji dio je činila ploča na kojoj je gumb pomoću kojeg uključujemo i isključujemo laser. Tada smo otklonili dio s lećom, s tog dijela skinuli leću i proučavali njenu žarišnu daljinu.

Na dijelu s pločom koji je ostao, mogli smo uočiti na vrhu IR filter. Odvojili smo dio s IR filterom i primjetili ispod kristal. Tada smo i njega izolirali i promatrali ga pod mikroskopom.

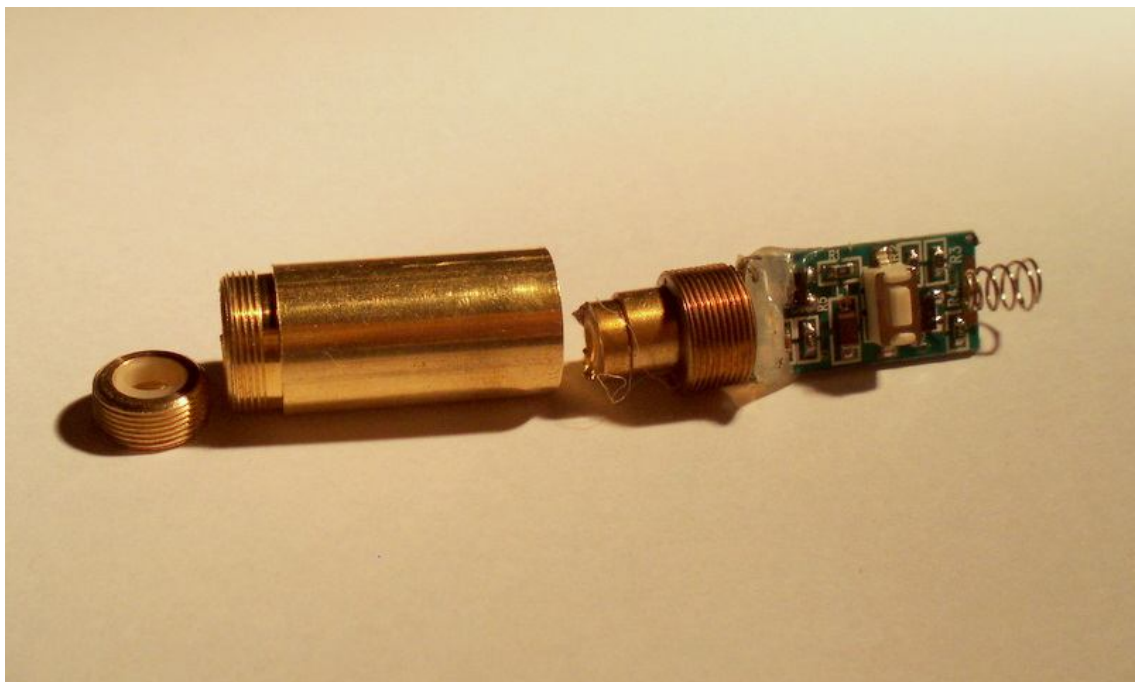
Kristal se sastoji od zelenog dijela koji je zapravo neodimijum itrij aluminij granat, koji daje zelenu svjetlost, i od kristala koji udvostručuje frekvenciju.

Na vrhu dijela koji je ostao uočili smo diodu i proćavali je pod mikroskopom. Radi se o diodi koji emitira svjetlost od 810 nm.

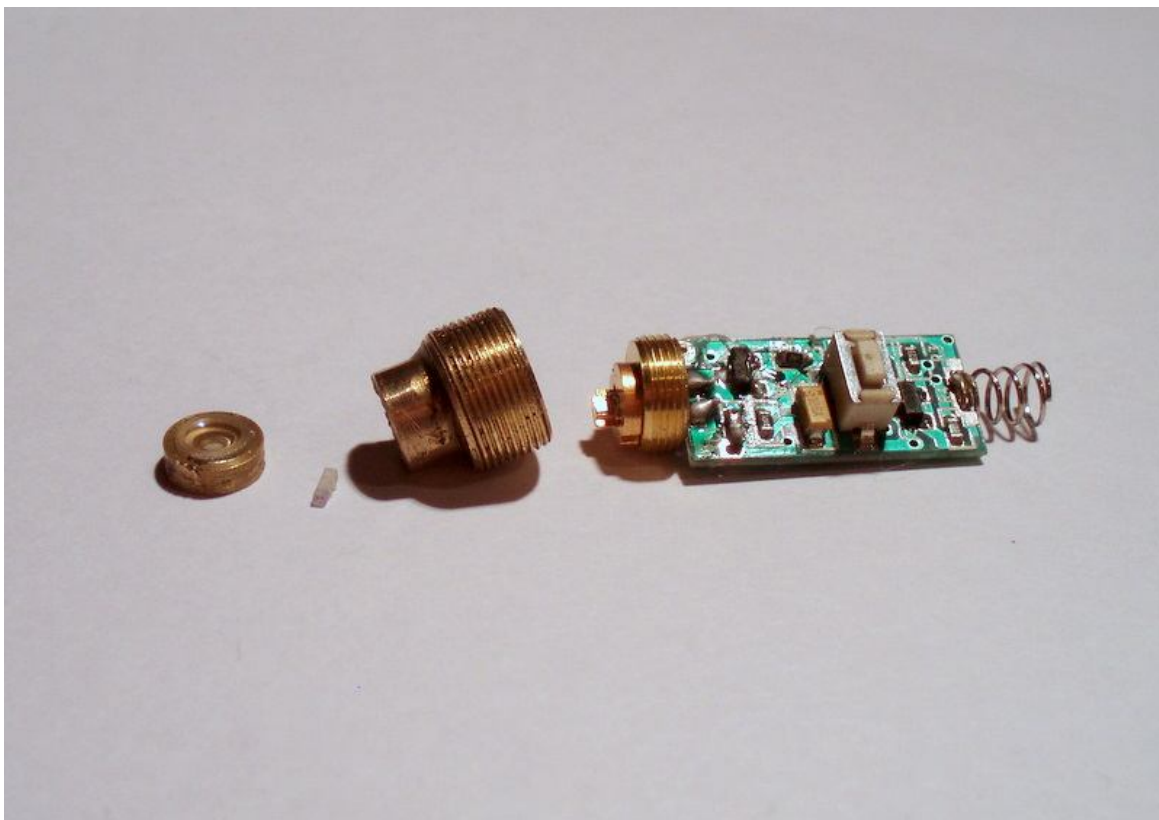
Ovdje ćemo prikazati proces rastavljanja jednog zelenog laserskog pokazivača.



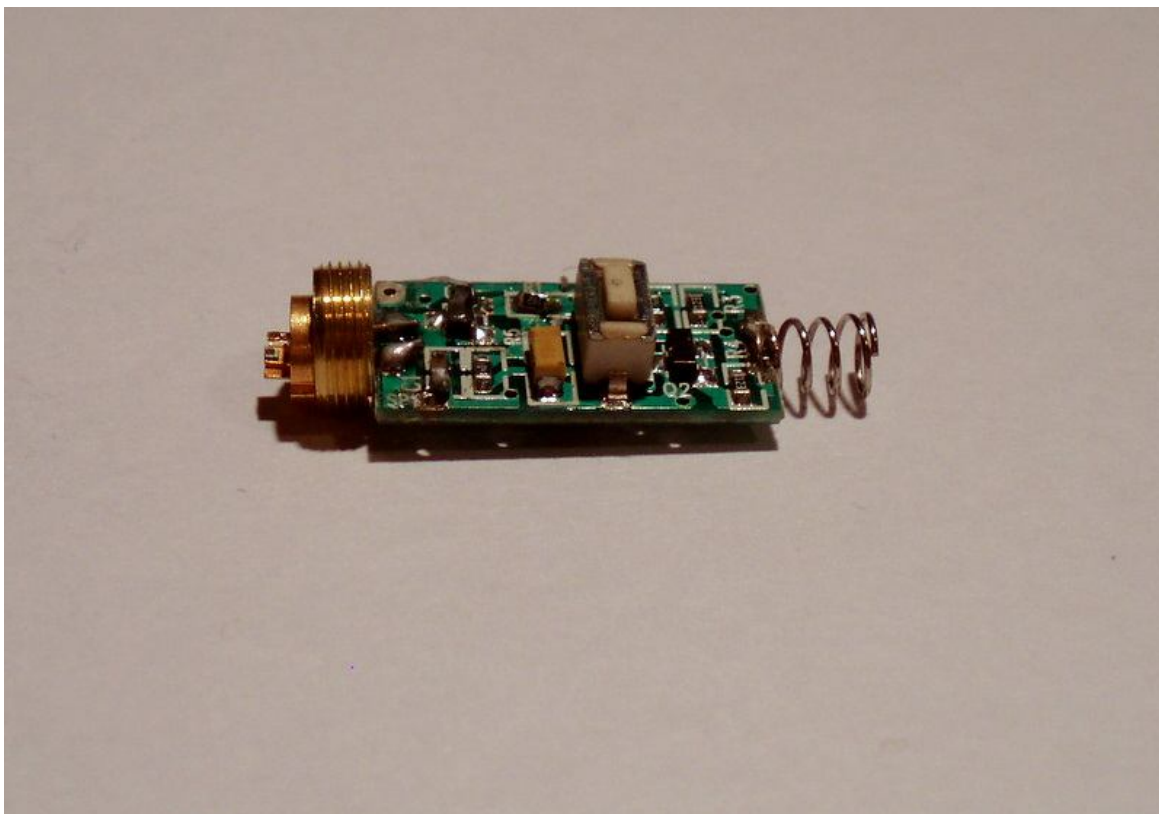
Slika 3-1 Skidanje dijela koji omata laser



Slika 3-2 Rastavljanje na dio s lećom i dio s kristalom i diodom



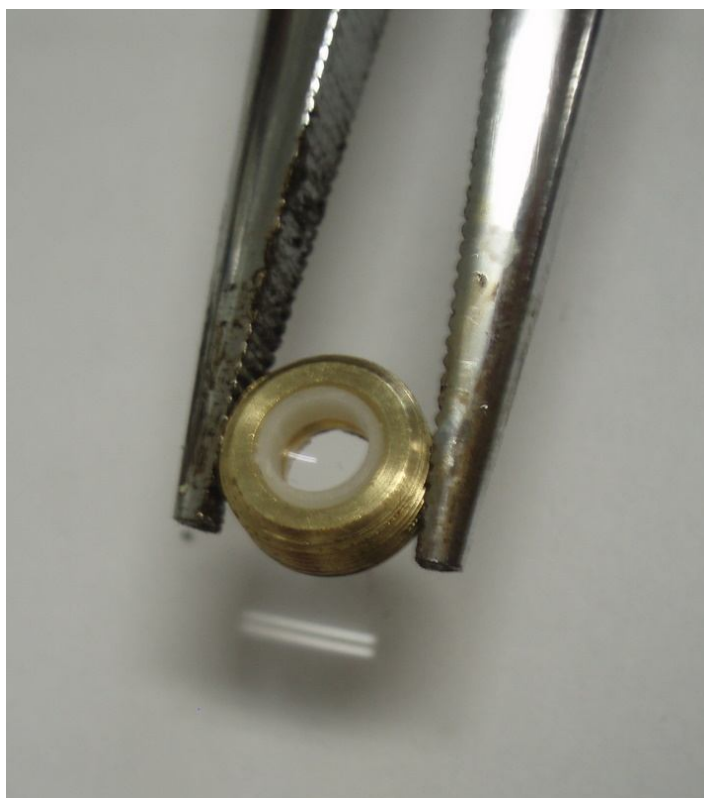
Slika 3-3 Rastavljanje na dio s diodom, nosač kristala, kristal i filter



Slika 3-4 Dioda



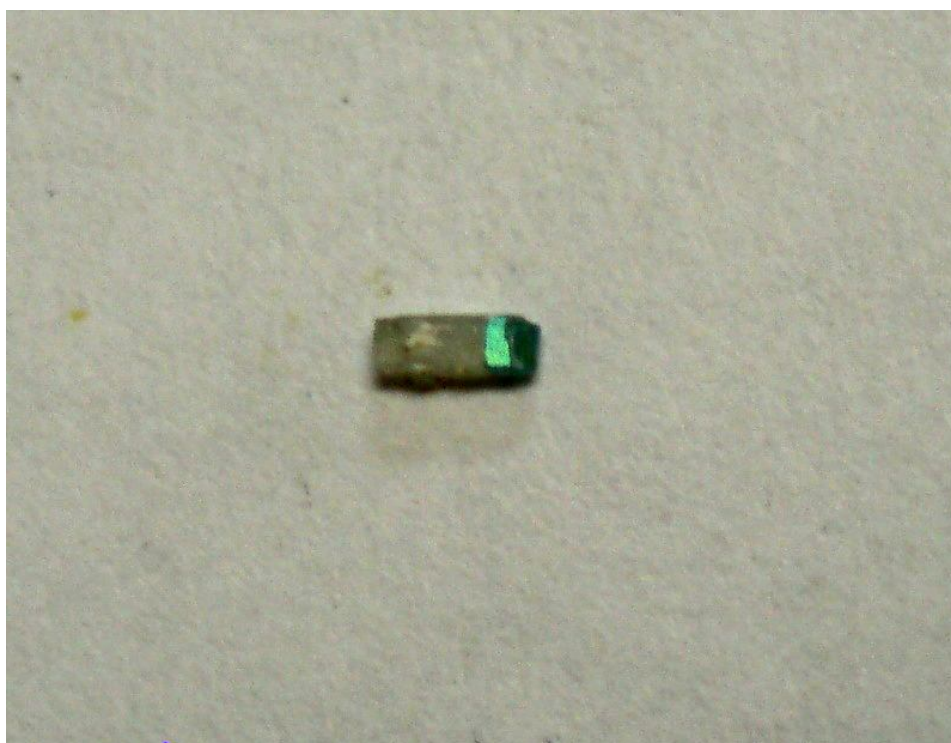
Slika 3-5 Leća koja se nalazi na izlazu laserskog snopa iz lasera



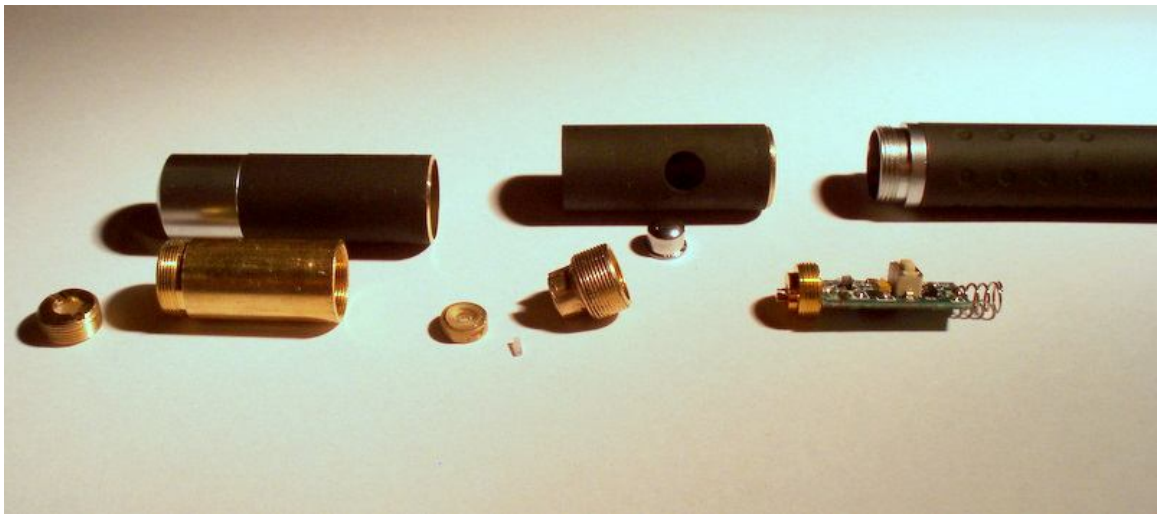
Slika 3-6 Ispitivanje žarišta leće



Slika 3-7 Dio s kristalom u unutrašnjosti i filter



Slika 3-8 Kristal koji se sastoji od Neodimijum itrij aluminij granata (zeleni vrh) i od kristala koji služi kao udvostučivač frekvencije



Slika 3-9 Svi dijelovi rastavljenog lasera

U procesu preciznog rastavljanja lasera, on ne gubi svoju funkcionalnost, te vraćanjem dijelova i dalje emitira svjetlost.



Slika 3-10 Sastavljen laser u funkciji

4 SPEKTROSKOPSKA MJERENJA

4.1 SPEKTROSKOPIJA

Spektroskopija je znanost koja se bavi interakcijom elektromagnetskog zračenja i materije. Koristi je u fizici i kemiji da bi indentificirale tvari preko dijelova spektra koje su apsorbirali ili emitirali. Koristi se i u astronomiji. Dio velikih teleskopa mogu biti i spektrometri kojima tada možemo odrediti kemijski sastav i karakteristike svemirskih objekta.

Spektrometar je uređaj za mjerenje intenziteta komponente elektromagnetskog zračenja određene valne duljine. Sastoji se od izvora zračenja, monokromatora i detektora. On će izmjeriti intenzitet određene valne duljine elektromagnetskog zračenja, koji je uzorak emitirao, apsorbirao, ili reflektirao. Kao detektori elektromagnetskog zračenja služe fotomultiplikatori, fotoosjetljive diode ili CCD čip, u vidljivom i ultraljubičastom području zračenja, te termoosjetljivi otpornici ili bolometri u infracrvenom području.



Slika 4-1 Spektroskop nekad



Slika 4-2 CCDS Spektrometar

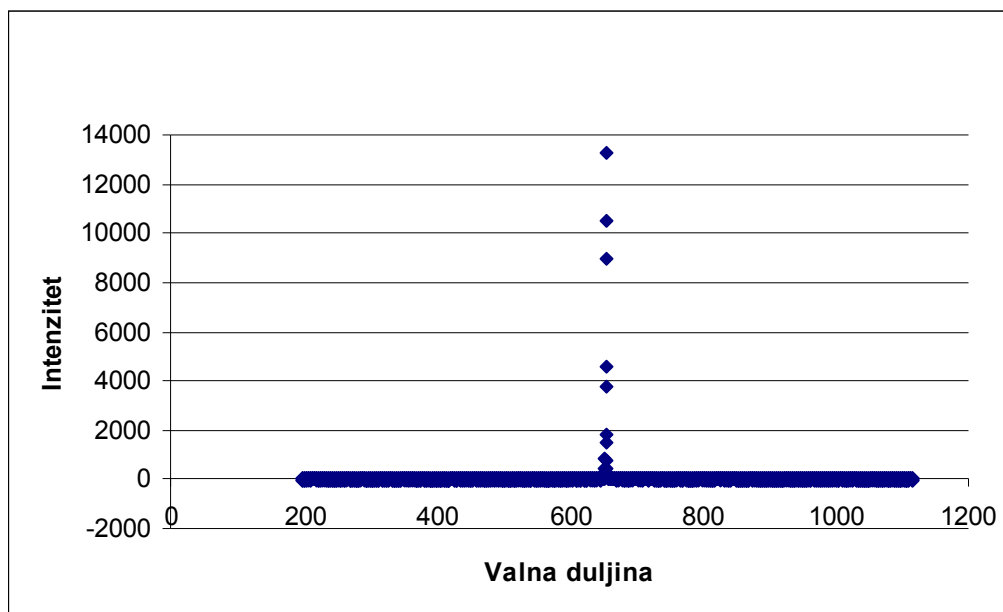
Spektar boja vidljive svjetlosti:

	crveno	640 – 750 nm
	narančasto	590 – 640 nm
	žuto	570 – 590 nm
	zeleno	480 – 570 nm
	plavo	450 – 480 nm
	plavo-ljubičasto	430 – 450 nm
	ljubičasto	400 – 430 nm

4.2 MJERENJA SPEKTRA

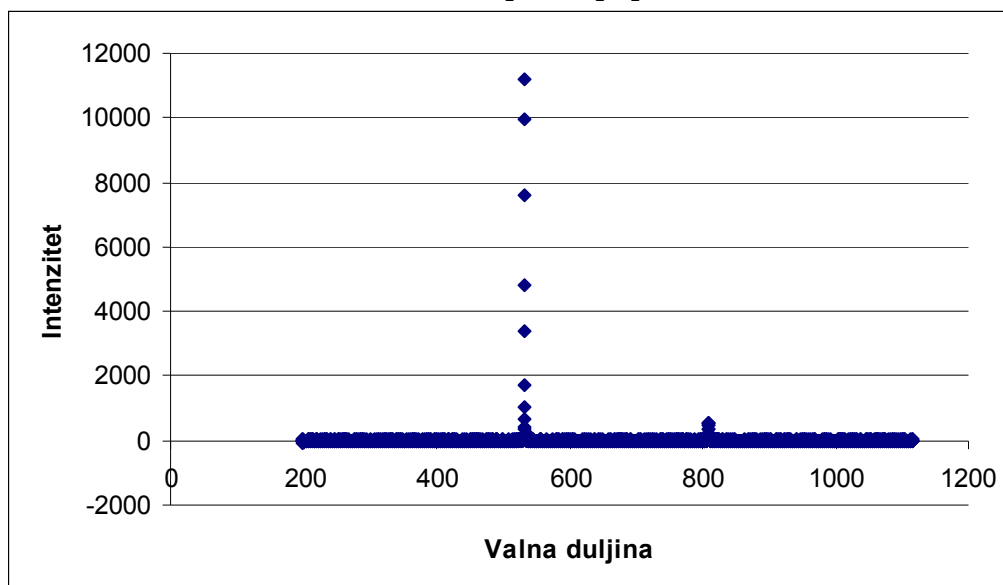
Mjerali smo spektar jednog crvenog i ljubičastog lasera i tri zelena lasera.

Spektar 1. lasera sniman s UV fiberom preko papirića



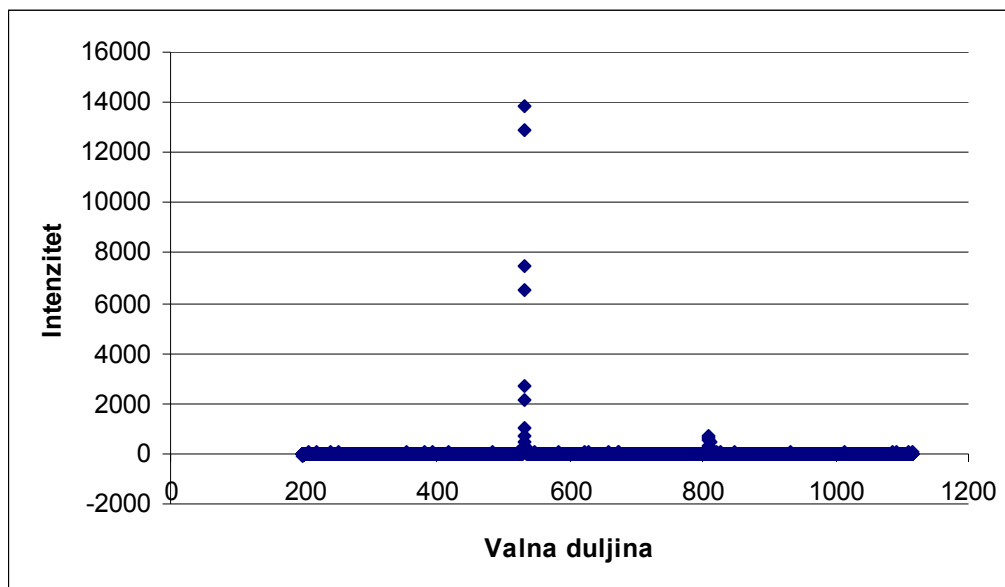
Iz spektra se vidi da u vidljivom području laser emitira valnu duljinu od 655nm što odgovara crvenoj svjetlosti. Crvena laserska svjetlost dobiva se pomoću diode te emitira zbog toga samo jednu valnu duljinu.

Spektar 2. lasera sniman s UV fiberom, preko papirića



Laser u vidljivom području emitira svjetlost valne duljine 532nm, što odgovara zelenoj svjetlosti. Možemo uočiti da emitira i malu količinu svjetlosti valne duljine 809nm. Laser se napaja diodom te valne duljine pa od tuda taj podatak.

Spektar 3. lasera sniman s UV fiberom i papirićem

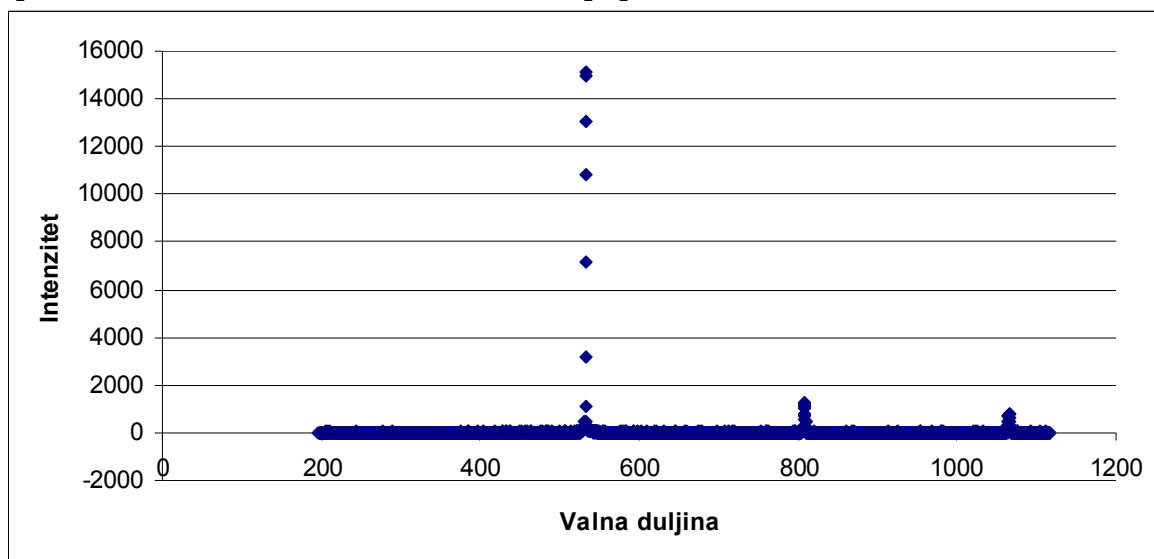


U vidljivom području emitira svjetlost valne duljine 532,4nm, što odgovara zelenoj svjetlosti. Možemo uočiti da emitira i malu količinu svjetlosti valne duljine 810.19nm.



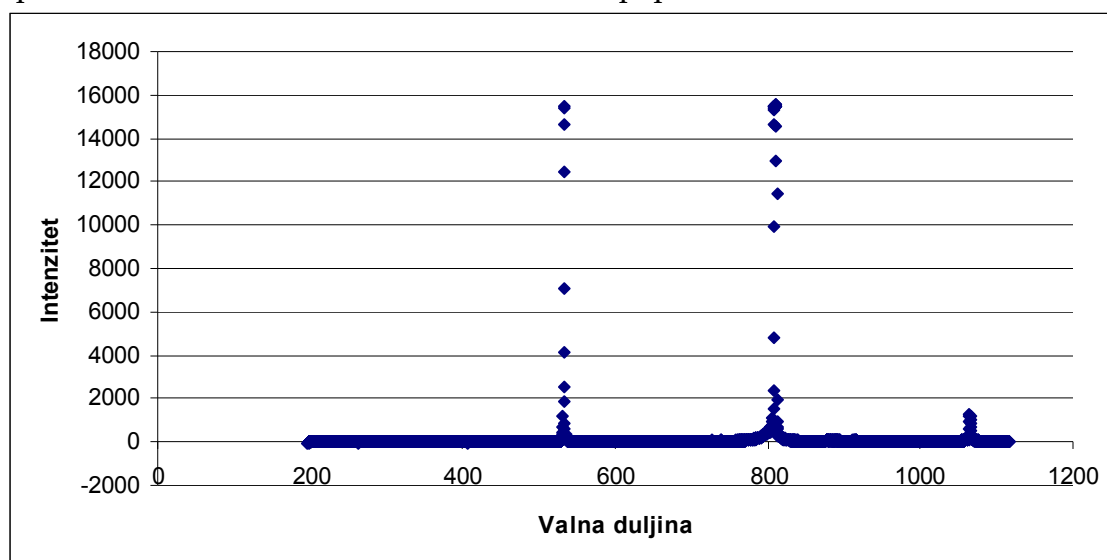
Slika 4-3 Prikaz snimanja spektra preko papirića, bez UV fibera

Spektar 3. lasera sniman bez UV fibera, s papirićem



Spektar lasera izmjenjenog bez UV fibera, pri čemu laser osvjetljava spektrometar preko papirića pokazuje valne duljinu 532nm u vidljivom dijelu spektra, što odgovara zelenoj svjetlosti. Osim te valne duljine sadrži još i valne duljine od 810 nm i 1065 nm. 1065 nm je valna duljina koja dolazi od Nd:Yag kristala, koja se pomoću kristala koja udvostručuje frekvenciju smanjuje. 810 nm dobivamo od diode kao i u slučaju prije.

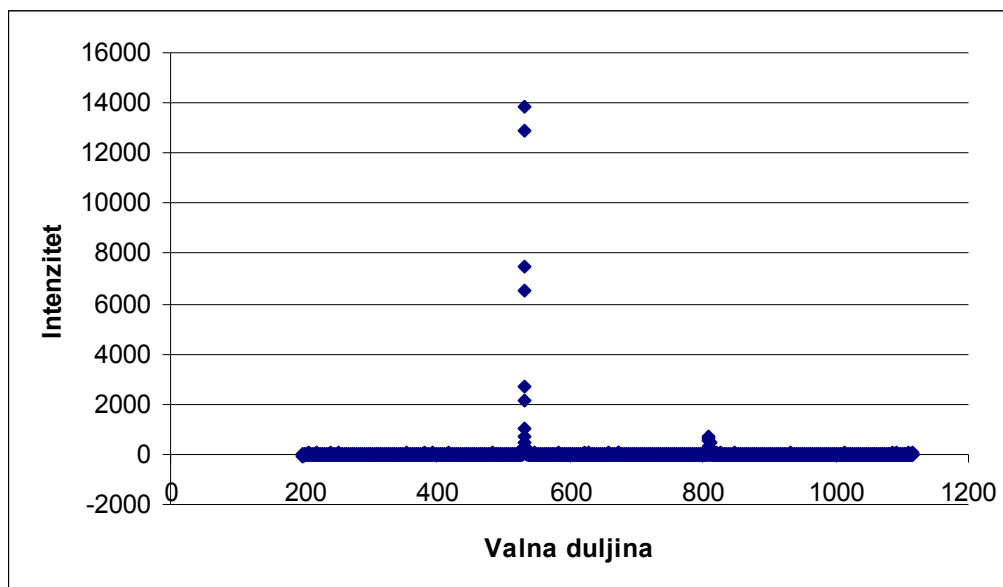
Spektar 3. lasera sniman bez UV fibera, bez papirića



Spektar lasera izmjenjenog bez UV fibera, pri čemu laser direktno osvjetljava spektrometar pokazuje valne duljinu 532nm u vidljivom dijelu spektra, što odgovara zelenoj svjetlosti. Osim te valne duljine sadrži još i valne duljine od 810nm i 1065nm koje su većeg intenziteta nego kod spektra

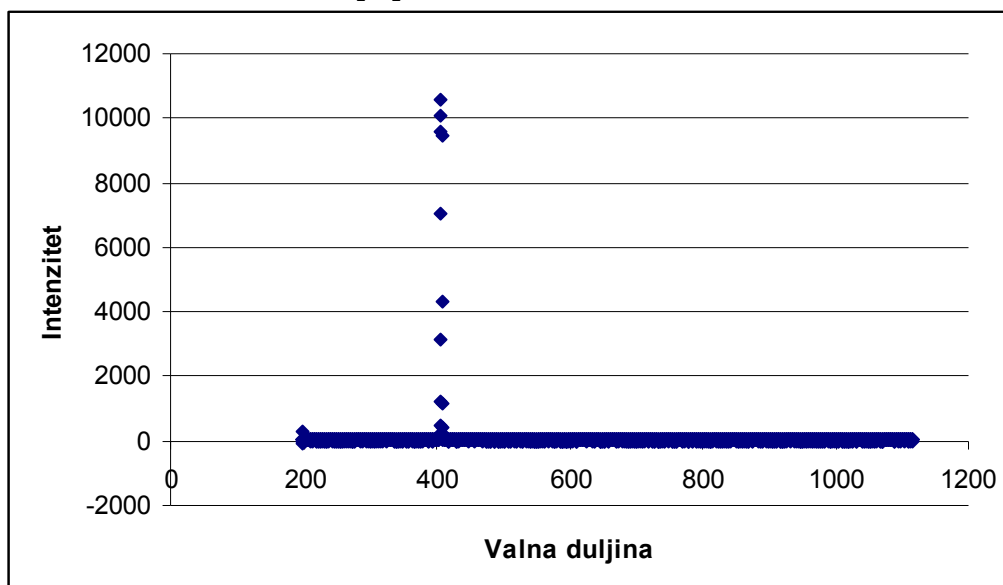
snimljenog preko papirića. Papirić ometa laserski snop pa je intenzitet koji dolazi na spektrometar manji.

Spektar 4. lasera sniman s UV fiberom, s papirićem



Laser u vidljivom području emitira svjetlost valne duljine 532,4nm, što odgovara zelenoj svjetlosti. Možemo uočiti da emitira i malu količinu svjetlosti valne duljine 810.19nm.

Spektar 5. lasera sniman bez papirića, bez UV fibera



Iz spektra vidimo da u vidljivom području laser emitira valnu duljinu od 406,98nm što odgovara ljubičastoj svjetlosti.

5 INTERFEROMETRIJA

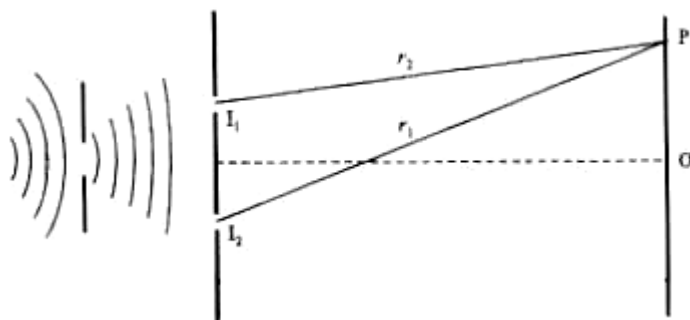
Interferometrija je tehnika dijagnosticiranja svojstva dva ili više vala proučavajući interferenciju koju smo dobili superpozicijom. Instrument koji interferira te valove zove se interferometar. Optička interferometrija kombinira dva ili više svjetlosna vala u optičkom instrumentu na način da dobijemo interferenciju.

Središnji element interferencije je dijelitelj snopova (beam splitter). U prošlosti su se dva koherentna izvora mogla dobiti smo na način da iz jednog izvora načinimo dva. Danas je moguće uskladiti dva laserska izvora te njima izvoditi eksperimente s interferencijom.

Prvi interferometar bio je slavni Youngov pokus s dvije pukotine 1805 godine. Tada su se kao izvori koristili izvor bijele svjetlosti i monokromatska svjetlost iz atomskih izvora. Razvojem lasera postalo je mnogo lakše postići optičku interferenciju što je dovelo do razvoja primjene interferometara u fizici i mnogim drugim područjima.

Young je izveo pokus koristeći postavu s pločom s dvostrukim prorezom za testiranje prirode svjetla.

Ako se svjetlo sastoji od čestica, ono bi pravocrtno putovalo od izvora kroz proreze do zaslona na kraju postava; na zaslonu, bi se pojavile dvije pruge svjetla. Ako je pak svjetlo sastavljeno od valova, ono bi se zračilo prema dva otvora, te ponovno od svakog od tih otvora na svom putovanju prema zaslonu. Na mjestima gdje se svjetlo iz dva otvora preklapa, valovi bi međusobno interferirali. Na zaslonu bi se pojavili nizovi pruga svjetla, predstavljaju interferencijsku mustru karakterističnu za preklapanje simetričnih valova.



Slika 5-1 Youngov pokus

Iz pukotine koja se ponaša kao točkasti izvor izlaze svjetlosni valovi i upadaju na dvije bliske i uske pukotine.

Iz tih pukotina izlaze dva koherentna vala, jednake amplitude, frekvencije i faze. Na zastoru elektromagnetski valovi iz jednog i drugog izvora (pukotine) zbrajaju se i daju interferencijsku sliku – valovi su na pukotinama bili u fazi.

Došavši do točke P jedan od njih je prevalio dulji put od drugog i više nisu u fazi. Razliku $r_2 - r_1$ nazivamo geometrijskom razlikom hoda dvaju valova i označavamo je s δ .

Ako je $\delta = (2k+1)\lambda/2$ jedan će val doći s maksimumom, a drugi s minimumom valovi će se poništiti i u točki P bit će tama – **DESTRUKTIVNA INTERFERENCIJA**

Ako je $\delta = k\lambda$ jedan i drugi val će doći s maksimumom/minimumom valovi će se pojačati i u točki P bit će svijetla pruga interferencije – **KONSTRUKTIVNA INTERFERENCIJA**

U sredini nasuprot pukotinama točka O – razlika puta je 0, i tu su valovi u fazi zbrajaju se konstruktivno i središnja je pruga svijetla. Do nje se na jednu i na drugu stranu nižu tamne i svijetle pruge – za dvije susjedne tamne ili svijetle pruge razlika putova je jednaka valnoj duljini. Razmak među prugama ovisi o razmaku između pukotina (izvora svjetlosti), o udaljenosti pukotina od zastora i o valnoj duljini svjetlosti.

Što je valna duljina svjetlosti veća – razmak između pruga na zastoru je veći mjereći razmak pruga možemo izračunati valnu duljinu svjetlosti.

Što je manja udaljenost među pukotinama – d , a veća udaljenost od zastora – D , razmak između pruga – y je veći. Mjerenjem veličina d , D i y možemo izračunati valnu duljinu svjetlosti

$$\lambda = \frac{y}{D} d$$

Interferometrom možemo, na primjer, izmjeriti mali pomak nekog predmeta. Promatramo sliku preklapljenih valova koji se reflektiraju s površine predmeta i površine mirnog zrcala. Ta dva vala interferiraju i daju na zaslonu naizmjenično tamne i svijetle koncentrične kružnice koje se pomiču kako se miče predmet.

Interferometri se koriste u meteorologiji, ispitivanju površina, mjerenjima mehaničkog naprezanja, mjerenjima brzine, u astronomiji itd.

Vrste interferometara su Michelsonov interferometar, Mach-Zenderov interferometar, Sagnacov interferometar i Fabry-Perotov interferometar.

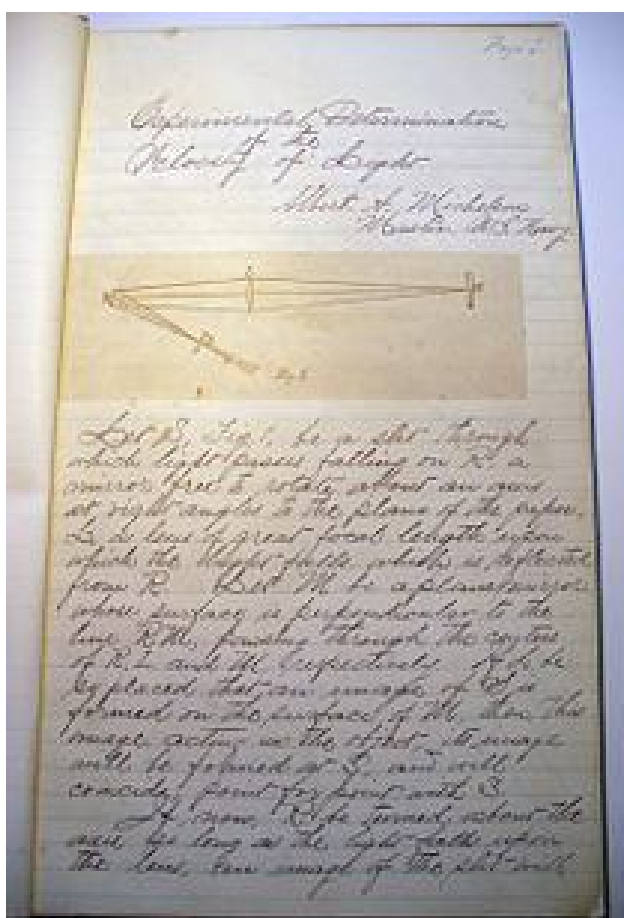
6 MICHELSONOV INTERFEROMETAR

Michelsonov interferometar je najčešći u optičkoj interferometriji. Napravio ga je Albert Abraham Michelson.

Albert A. Michelsona je fascinirala znanost, a posebno problem mjerenja brzine svjetlosti. 1877 godine izveo je svoj prvi pokus kojim je pokušao izmjeriti brzinu svjetlosti. Od tada je pokušavao unaprijediti mjerenja i radio je na svom interferometru.

S Morleyem 1887 godine izveo je Michelson-Morleyev eksperiment kojim su dokazali nepostojanje etera. Dokazali su da se svjetlost u svim inercijskim referentnim sustavima u vakuumu širi istom brzinom, bez obzira u kakvom se međusobnom gibanju oni nalaze. Time su doveli do specijalne teorije relativnosti.

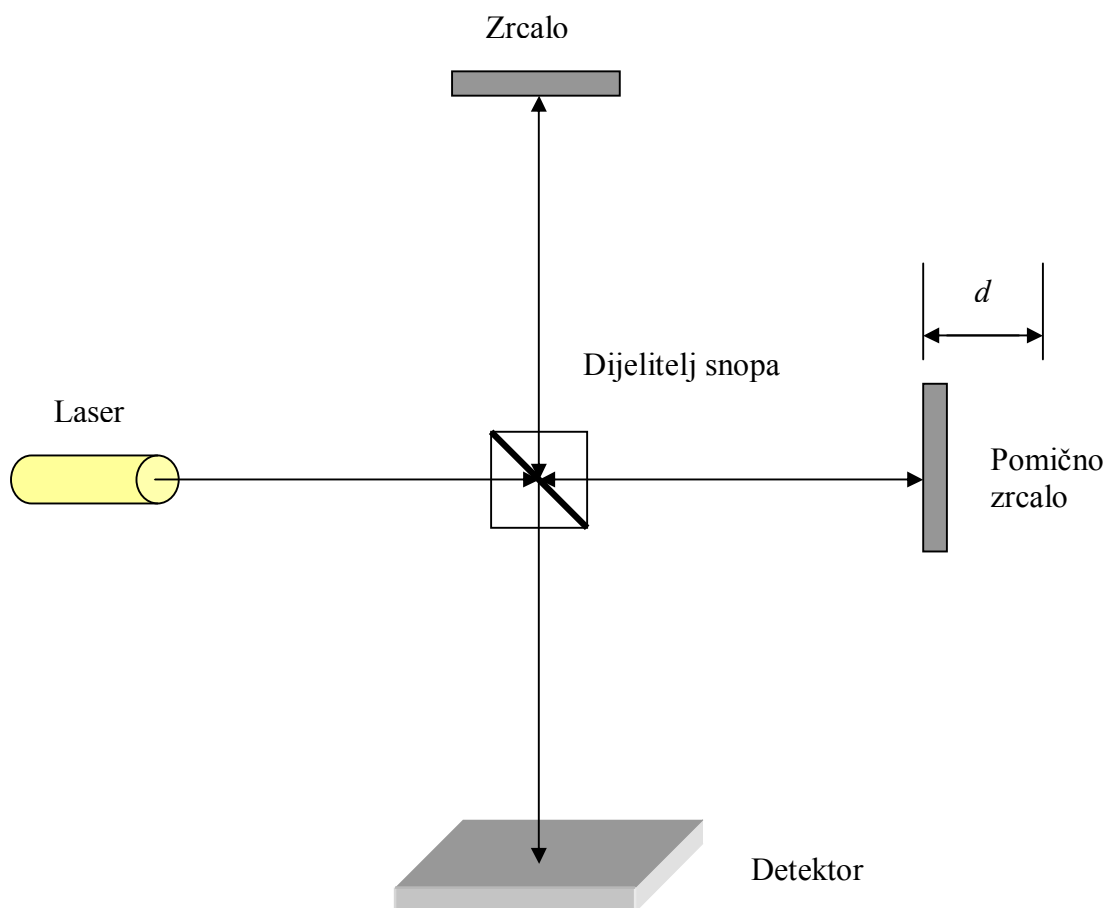
Michelson je radio i na astronomskim interferometrima kojima je mjerio promjere zvijezda. Nobelovu nagradu dobio je 1907. godine za svoje optičke instrumente, te spektroskopska i metrološka istraživanja koja su izvedena uz njegovu pomoć.



Slika 6-1 Michelsonove bilješke mjerenja brzine svjetlosti

Michelsonov interferometar koristi se za detekciju gravitacijskih valova, za određivanje malog pomaka predmeta, za mjerenje indeksa loma nekog sredstva. Može se koristiti i za podešavanje uređaja koji služe za otkrivanje planeta obližnjih zvijezda.

Michelsonov interferometar sastoji se od lasera, djelitelja snopa (beam splitter), koji djelomično propušta, a djelomično reflektira svjetlost koja dolazi iz izvora, od dva zrcala i detektora, koji je u ovom slučaju bio zastor.



Slika 6-2 Shema Michelsonovog interferometra

Prvi snop ide na djelitelj snopova gdje se odbija, ide do prizme koja nam služi kao zrcalo, tamo se reflektira, dolazi ponovno do djelitelja snopa gdje prolazi do zaslona.

Drugi snop prolazi kroz mikroskopsko stakalce, reflektira se na prizmi i dolazi do djelitelja snopa gdje se reflektira na zastor.

Na zastoru dolazi do konstruktivne interferencije kada se putevi jednog i drugog snopa razlikuju za cijelu valnu duljinu. Važno je da putevi koje prevaljuju jedan i drugi snop budu jednaki. Kada se putevi jednog i drugog razlikuju za pola valne duljine tada dolazi do destruktivne interferencije.

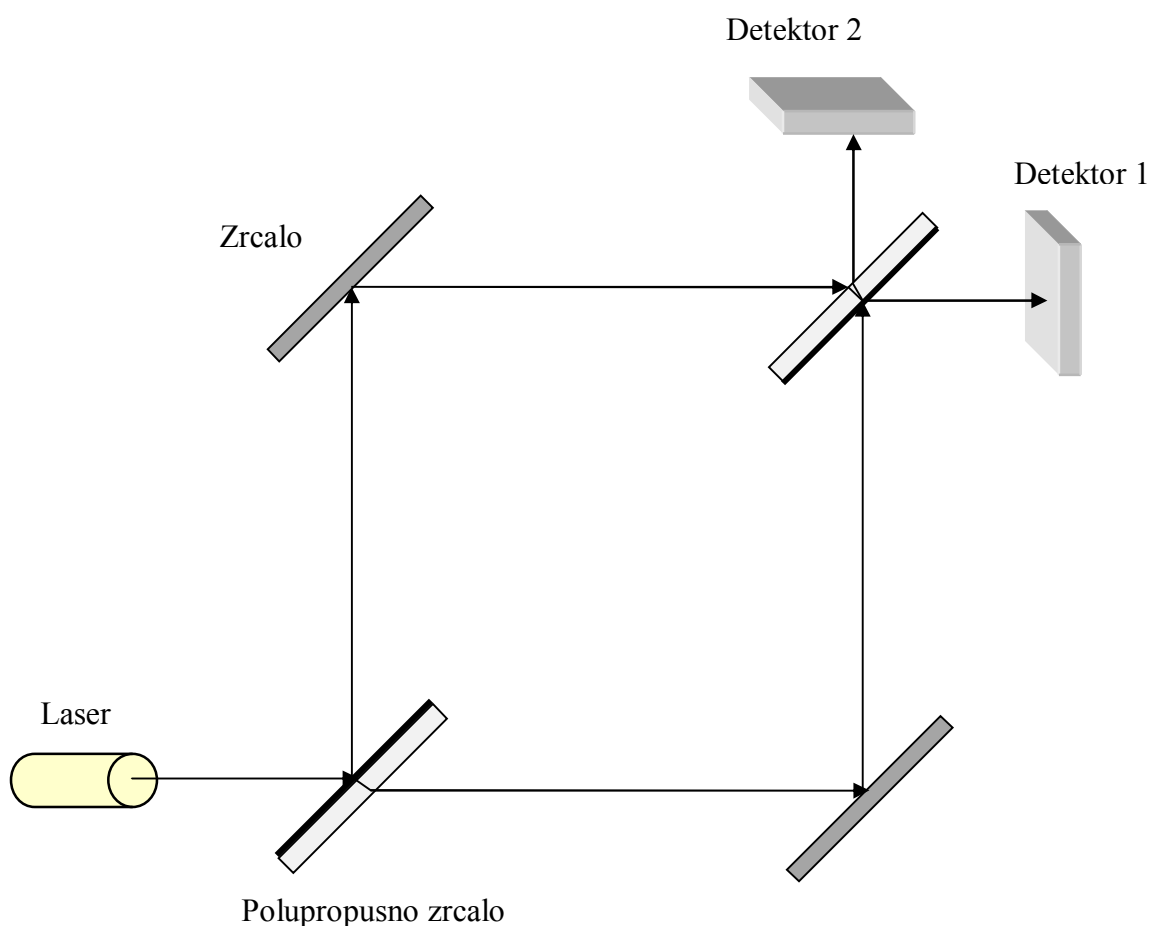
Za različite valne duljine (različite boje) dobivati ćemo različite širine pruge interferencije.

Jedno od zrcala drži se nepomičnim dok se drugo može pomicati pomoću preciznog vijka. Tako se pomicanjem drugog zrcala za četvrtinu valne duljine, put snopa koji se na djelitelju snopa prolazi, mijenja za polovinu valne duljine. To izaziva promjenu interferentne slike tako da su tamni prstenovi interferencije prije pomicanje zamijenjeni sa svjetlim prstenima poslije pomicanja. Brojeći promjene koje se dogode za vrijeme pomicanja zrcala možemo odrediti za koliko se valnih duljina zrcalo pomaknulo.

7 MACH ZEHNDEROV INTERFEROMETAR

Mach Zehnderov interferometar je izveden iz Michelsonovog interferometra. Napravili su ga Ludwig Mach i Ludwig Zehnder. To je uređaj koji se koristi za utvrđivanje pomaka u fazi koji je uzrokovan nekim uzorkom koji se nalazi na putu jedne od dvije koherentne zrake.

Mach Zehnderov interferometar sastoji se od dva djelitelja snopa (za razliku od Michelsonovog koji ima samo jedan) , dva zrcala, dva detektora i lasera.



Slika 7-1 Shema Mach Zehnderovog interferometra

Snop iz lasera dolazi na prvi djelitelj snopova. Snop se dijelom reflektira a dijelom prolazi kroz djelitelj snopa.

Snop koji se reflektira dolazi na zrcalo na kojem se ponovno reflektira, i dolazi na drugi djelitelj snopa. Na tom djelitelju se dijelom reflektira u detektor 2, a dijelom prolazi u detektor 1.

Snop koji prolazi kroz prvi djelitelj snopa se reflektira na zrcalu u drugi djelitelj snopa. On se dijelom reflektira u detektor 1, a dijelom prolazi u detektor 2.

Ponovimo osnove:

- Za indeks loma zrcala možemo reći da je beskonačan pa dolazi do promjene u fazi za pola valne duljine.
- Kada snop svjetlosti dolazi na plohu koja sa svoje druge strane ima manji indeks loma, reflektirana zraka nema promjenu u fazi.
- Kada snop svjetlosti prelazi iz jednog sredstva u drugo, lomi se prema Snellovu zakonu loma, ali ne dolazi do promjene u fazi.
- Kada snop svjetlosti prolazi kroz neko sredstvo, npr. staklenu plohu, dolazi do pomaka u fazi koji ovisi o indeksu loma sredstva i duljini puta kroz to sredstvo.

Ova pravila omogućavaju nam promatranje promjene faze u oba snopa.

Snop koji se reflektira na prvom djelitelju snopa dobiva promjenu u fazi za polovicu valne duljine. Nakon toga dolazi na zrcalo na kojem ponovo ima promjenu u fazi za polovicu valne duljine zbog refleksije. Na drugom djelitelju snopa, snop se lomi na gornjoj plohi stakla. Na donjoj plohi stakla dio koji se reflektira nema promjenu u fazi i taj dio se ponovno lomi na gornjoj plohi djelitelja snopa pa dolazi do dodatne promjene u fazi. Dio koji se prolazi kroz donju plohu djelitelja snopa ima neku promjenu u fazi koja ovisi o indeksu loma stakla.

Snop koji prolazi kroz prvi djelitelj snopa, ima neku promjenu u fazi koja ovisi o indeksu loma stakla. Zatim dolazi do zrcala gdje se reflektira i ima promjenu u fazi za pola valne duljine. Na drugom djelitelju snopa dio snopa koji se reflektira ponovno ima promjenu u fazi za pola valne duljine, a dio koji se prolazi ima promjenu u fazi za neki iznos koji ovisi o indeksu loma stakla.

Ako zbrojimo promjene u fazi prvog i drugog snopa koje dolaze na detektor 2, dobijemo da im se faze razlikuju za pola valne duljine. Ako se faze razlikuju za pola valne duljine doći će do destruktivne interferencije, pa na detektoru 2 neće biti svjetlosti.

Ako zbrojimo promjene u fazi prvog i drugog snopa koji dolaze na detektor 1, dobijemo da imaju istu promjenu u fazi pa će doći do konstruktivne interferencije, odnosno sva će svjetlost otići u detektor 1 i biti će vidljive pruge interferencije.

Sada je jasno zašto Mach Zehnderovim interferometrom možemo mjeriti promjenu u fazi na nekom uzorku. Uzorak stavimo na put jednog ili drugog snopa. Promjena faze na uzorku, uzrokovati će promjenu odnosa faza dva snopa i na detektoru 2 nećemo dobiti potpuno destruktivnu interferenciju. Mjerenjem količine svjetla koja dolazi na detektor 1 i detektor 2 možemo izračunati promjenu faze na uzorku.

8 MJERENJA S INTERFEROMETRIMA

Prije početka postavljanja Michelsonovog i Mach-Zenderovog interferometra treba očistiti sve dijelove koji se koristi u eksperimentu da na prolazak laserske svjetlosti ne bi utjecale nečistoće na lećama, prizmama, stakalcima... Staklene površine čiste se pomoću papira za čišćenje leća i acetona.



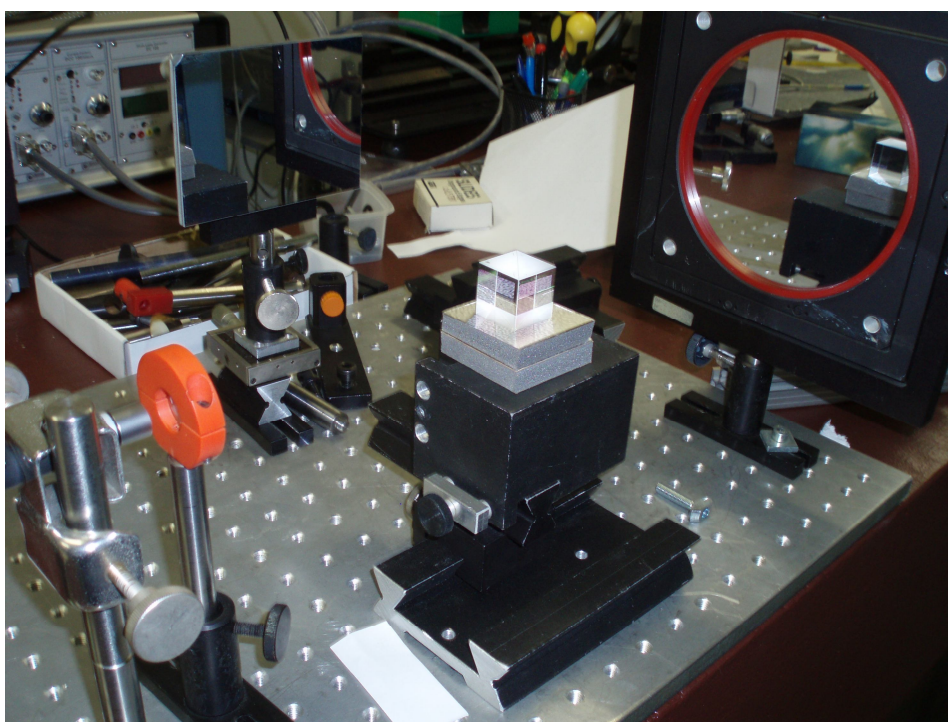
Slika 8-1 Papir za čišćenje leća i očišćeno mikroskopsko stakalce

8.1 MICHELSONOV INTERFEROMETAR

Michelsonov interferometar kojim smo vršili mjerenja sastoji se od dvije prizme slijepljene tako da čine djeliteľ snopa (beam splitter), koji djelomično propušta a djelomično reflektira svjetlost koja dolazi iz izvora, od dva zrcala i detektora, koji je u ovom slučaju bio zastor. U mjerenjima smo koristili crveni, zeleni i plavi laser.

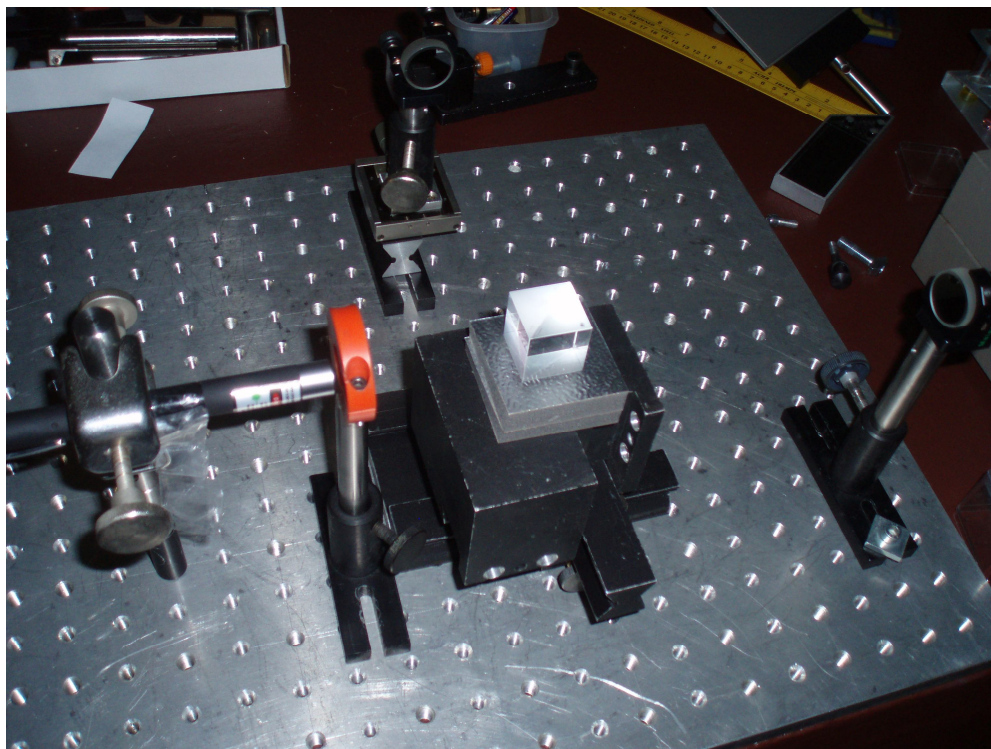


Slika 8-2 Zeleni, crveni i plavi laser



Slika 8-3 Michelsonov interferometar

Velika zrcala u Michelsonovom interferometaru zamijenili smo malim zrcalima kojima preciznije možemo usmjeravati snop laserske svjetlosti i dobiti bolje rezultate interferencije.

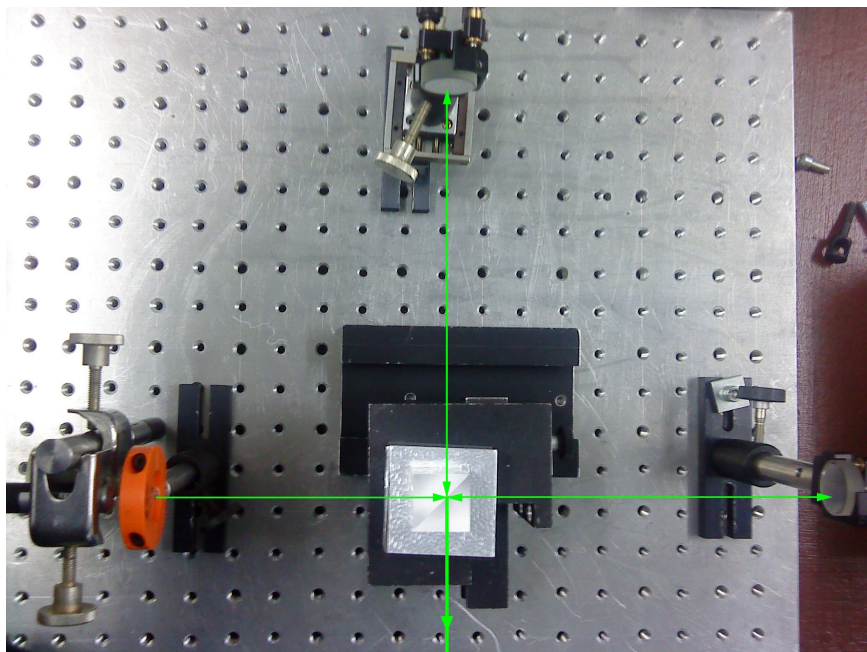


Slika 8-4 Michelsonov interferometar s malim zrcalima

Prvi snop laserske svjetlosti ide na djeliteľ snopova gdje se odbija, dolazi do zrcala, tamo se reflektira, dolazi ponovno do djeliteľja snopa gdje prolazi do zaslona.

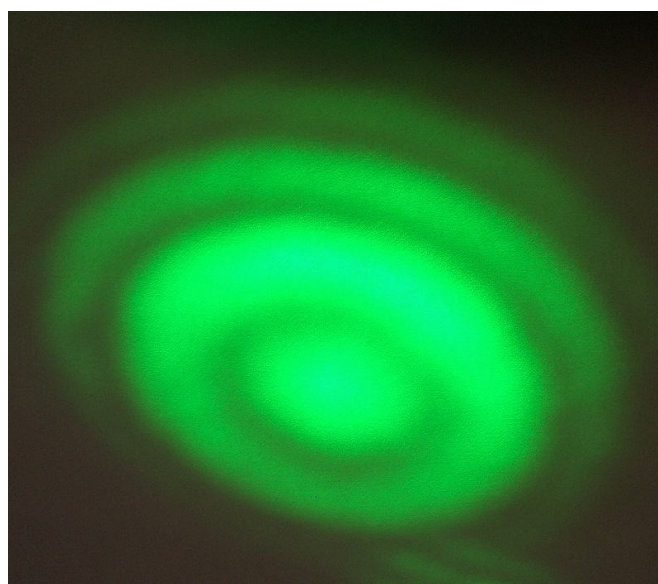
Drugi snop prolazi kroz djeliteľ snopa, reflektira se na zrcalu i dolazi do djeliteľja snopa gdje se reflektira na zastor.

Pri izvođenju eksperimenta morali smo paziti da nam putevi jednog i drugog snopa budu jednaki ili približno jednaki da bi dobili konstruktivnu interferenciju.

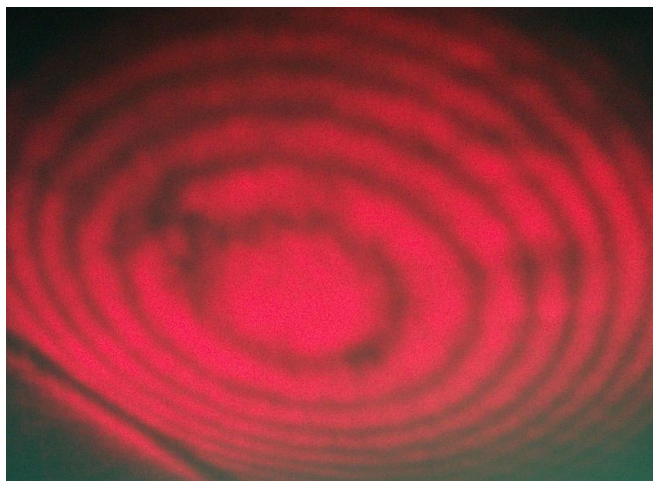


Slika 8-5 Udaljenost djelatila snopa od svakog zrcala je jednaka

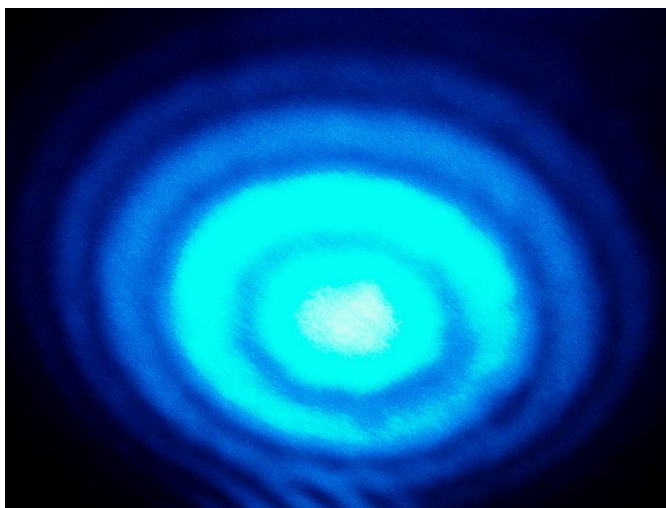
Rezultat interferencije su koncentrične kružnice interferencije.



Slika 8-6 Interferencija na Michelsonovom interferometru pomoću zelenog lasera



Slika 8-7 Interferencija na Michelsonovom interferometru pomoću crvenog lasera

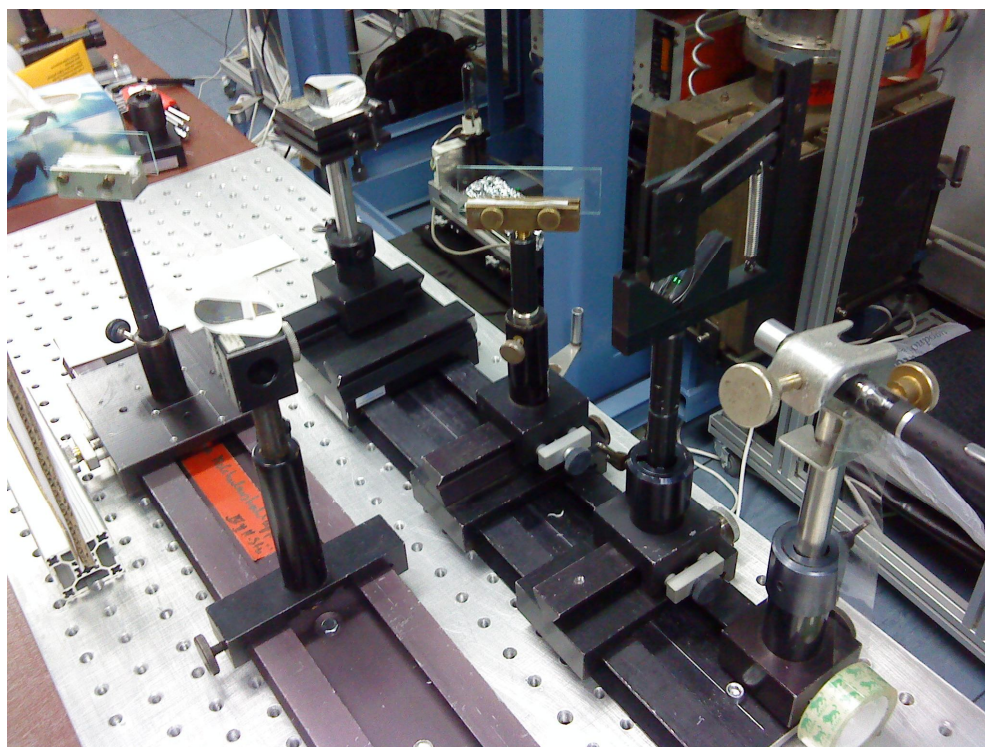


Slika 8-8 Interferencija na Michelsonovom interferometru pomoću plavog lasera

Kada bi jednom od snopova stavili na put prepreku, tako da se snop prekine, interferencijska slika bi nestala. Dobili bi samo sliku snopa kojem put nije prekinut i vidjeli bi da interferencija u tom slučaju ne postoji. To je izravan dokaz da su koncentrične kružnice rezultat interferencije ta dva snopa.

Ovisno o boji, dobili smo različitu širinu pruga interferencije.

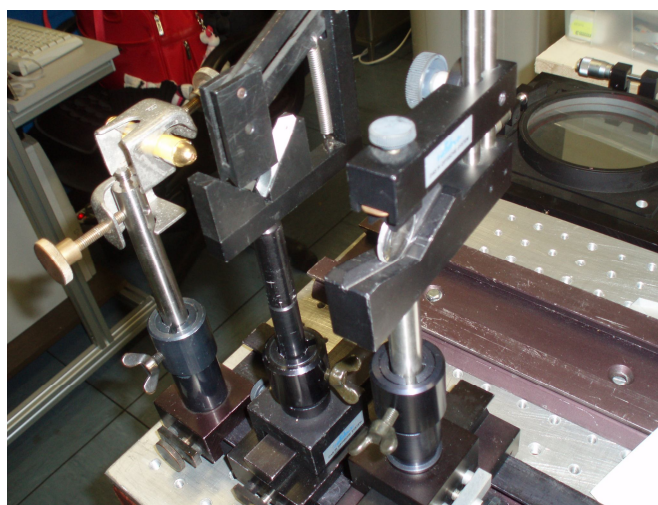
8.2 MACH ZEHNDEROV INTERFEROMETAR



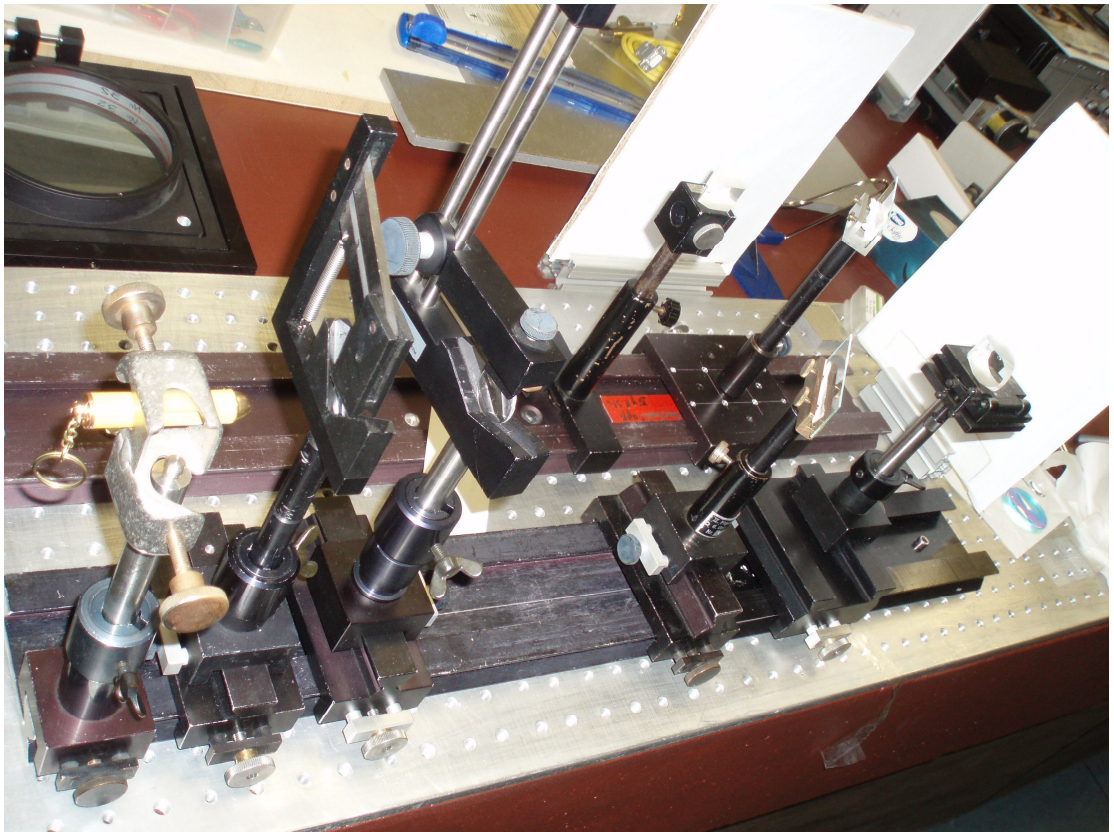
Slika 8-9 Mach Zehnderov interferometar s lećom za širenje snop

Mach Zahnderov interferometar kojim vršimo mjerenja sastoji se od lasera, dva miskoskopska stakalca koji služe kao djelitelji snopova, dvije prizme koje služe kao zrcala za refleksiju svjetlosti, dva zastora koji čine detektor 1 i detektor 2.

U prvim mjerenjima koristili smo leću za širenje snopa, a kasnije smo od sustava dvije leće napravili teleskop da bi još jače proširili snop i jasnije vidjeli interferenciju.

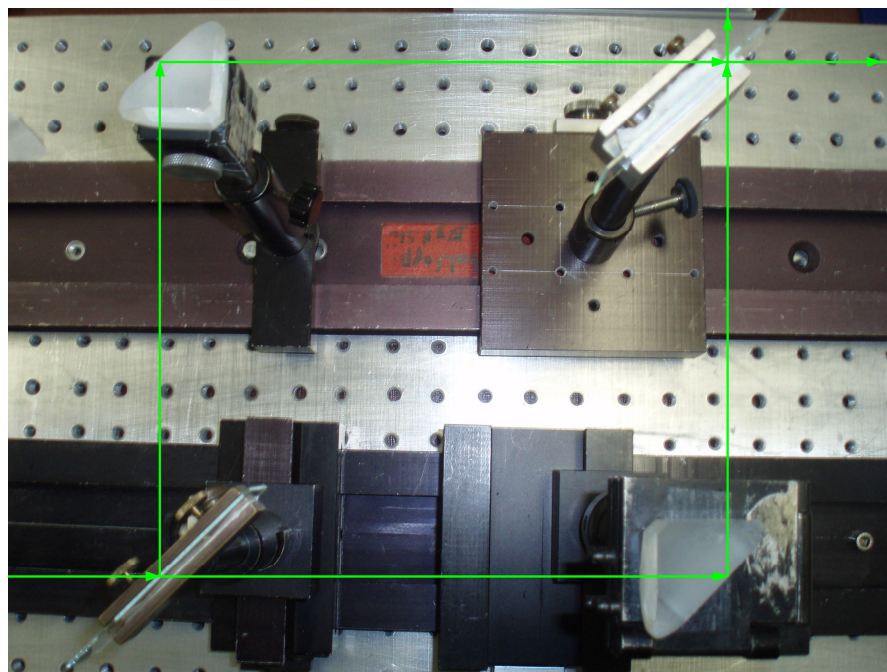


Slika 8-10 Teleskop



Slika 8-11 Mach Zehnderov interferometar kojim vršimo mjerenja

Važno je da putevi koje prelaze svaka od zraka budu jednake. Dakle udaljenost između prvog djelitelja snopa i svake prizme (zrcala) mora biti jednaka.



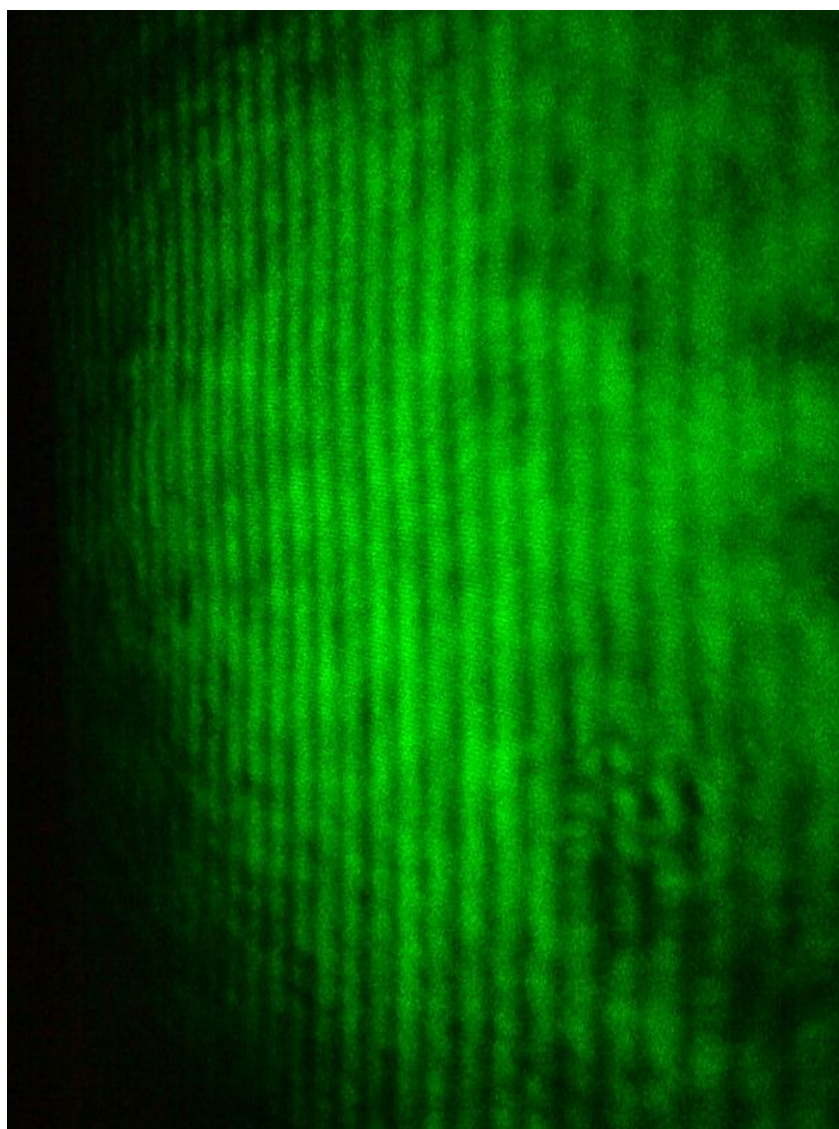
Slika 8-12 Udaljenosti djelitelja snopa i prizme (zrcala) su jednake

Svaki od dolaznih snopova u sebi već ima pruge interferencije zbog mikroskopskog stakalca. Na njemu se zbog njegove određene debljine svjetlost cijelom duljinom odbija i reflektira, tako zvani «walk off».

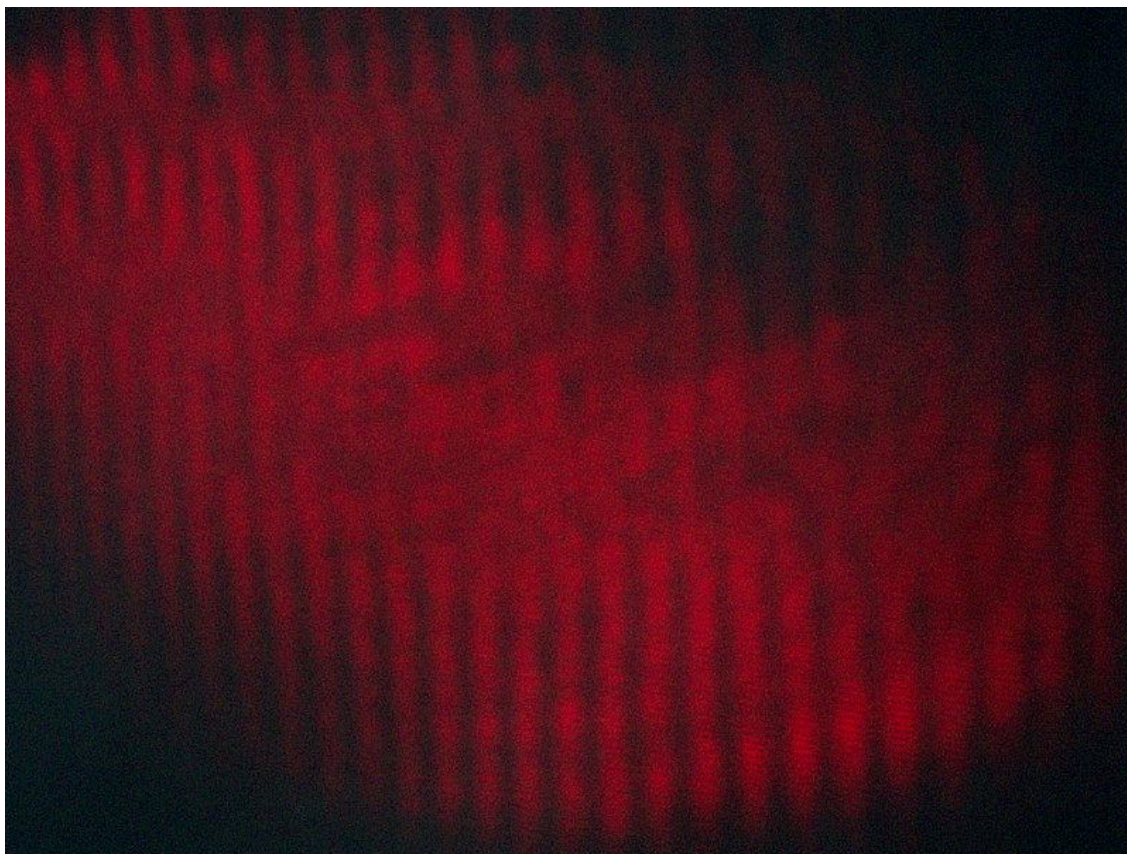
No intefrefencijom takva dva snopa nastaju nove crte interferencije koje su pod nekim kutom u odnosu na pruge koje sadrži svaki od snopova. Kada presječemo put jednom ili drugom snopu te crte nestaju pa znamo da je došlo do interferencije.

Da bi dobili dolazne snopove bez interferencije na mikroskopskom stakalcu, bilo bi bolje mikroskopsko stakalce zamijeniti s nekim djelitelem snopa gdje ne dolazi do interferencije.

Za daljnje usavršavanje Mach Zehnderovog interferometra bilo bi poželjno prizme (koje služe kao zrcala) zamijeniti s pravim zrcalima.



Slika 8-13 Rezultat interferencije Mach Zehnderovog interferometra s zelenim laserom



Slika 8-14 Rezultat interferencije Mach Zehnderovog interferometra s crvenim laserom

9 ZAKLJUČAK

Lasere primjenjujemo u školi u raznim pokusima i demonstraciji nekih svojstava svjetlosti, a nisu skupi ili komplicirani za upotrebu.

Možemo ispitivati zakone geometrijske i valne optike.

Pri proučavanju geometrijske optike, uzmemo li dva lasera na jednostavan način demonstriramo kako se snop iz jednog lasera širi neovisno o snopu drugog lasera. Time smo dokazali zakon nezavisnosti širenja svjetlosnih snopova.

Refleksijom laserskog snopa na zrcalu, lako se uočava ovisnost kuta upada i kuta refleksije. Isto tako, propuštanjem snopa kroz dva sredstva s različitim optičkim indeksom loma, možemo proučavati ovisnost kuta loma o upadnom kutu. Svi pokusi moraju se odvijati u zamračenoj prostoriji da bi rezultati pokusa bili što precizniji i uočljiviji.

Iako u geometrijskoj optici snopove iz dva lasera koristimo da bi dokazali njihovo nezavisno širenje, u valnoj optici pomoću laserske svjetlosti možemo dokazati da svjetlost međudjeluje i to nazivamo interferencijom.

Ovaj Diplomski rad bazirao se upravo se na Michelsonovom i Mach Zehnderovom interferometru. Interferometri općenito nisu u nastavnom programu, ali svakako bi ih trebalo uvrstiti.

Michelson-Morleyev pokus je dokazao da je brzina svjetlosti u vakuumu, bez obzira na smjer širenja, konstantna. Time je dokazano da eter ne postoji, tj. da za širenje svjetlosti nije potrebno nikakvo sredstvo. To je ujedno bio začetak specijalne teorije relativnosti i daljnjeg napretka znanosti te se važnost ne može umanjiti.

Michelsonov i Mach Zehnderov interferometar i danas imaju veliku važnost u širokom spektru mjerenja. Iako se koriste za mjerenja koja djeci neće biti bliska, imaju bitnu ulogu u znanosti.

U okviru nastavnog programa trebala bi se upotrebljavati i ta dva interferometra kao izravan dokaz valne prirode svjetlosti.

Osim što dokazujemo interferenciju, korištenjem više vrsta lasera, pri čemu svaki emitira drugu valnu duljinu svjetlosti (laserske svjetlosti raznih boja) možemo proučavati ovisnost udaljenosti pruga interferencije o valnoj duljini svjetlosti.

Bez obzira na opseg fizike s laserskim pointerima dotaknuli smo se njezinih bitnih dijelova i pokazali važnost Michelsonovog i Mach Zehnderovog pokusa u nastavi fizike.

10 METODIČKI DIO

U ovom dijelu diplomskog rada, govorit će se o primjeni i važnosti Michelsonovog i Mach Zehnderovog interferometra u nastavi.

Teorija Michelsonovog interferometra je zbog njegovog doprinosa razvoju fizike, uvrštena u nastavni plan gimnazija.

Michelsonov i Mach Zehnderov interferometar su doista bitni, ali nisu trivijalni pokusi koji su pogodni za prosječnog učenika. Prijedlog za izvođenje ovih pokusa je u sklopu nastave za nadarene učenike ili projekta za pojedine učenike koji žele znati više. Naravno, takvim učenicima bi se trebala pružiti prilika da svoja dostignuća prezentiraju ostalima, koji su također savladali osnovne pojmove tog područja.

Ciljana skupina učenika pokazuje interes za područje valne optike te fiziku općenito. Osim toga, savladali su osnovne pojmove:

- Što su konstruktivna i destruktivna interferencija
- Kada dolazi do konstruktivne a kada do destruktivne interferencije
- Koherentnost svjetlosti
- Zakon loma
- Zakon refleksije
- Lasersku svjetlost
- Leće
- Zrcala

Iznimno je bitno učenicima unaprijed objasniti koje je znanje potrebno. Učenici moraju imati osnovno predznanje, no s obzirom na težinu gradiva ne mogu znati sve. Glavni cilj izvođenja ovih pokusa je učenje, savladavanje i produbljivanje razumijevanja gradiva kroz raspravu i mjerenja.

Idealna grupa za izvođenje pokusa sastoji se od 2-3 učenika.

Prije početka izvođenja pokusa učenike treba upoznati sa aparaturom koju će koristiti i načinom izvedbe pokusa.

Za Michelsonov interferometar su potrebni:

- djelitelj snopova
- dva ravna zrcala
- zastor

Za Mach Zehnderov interferometar su potrebna:

- dva djelitelja snopa
- dva ravna zrcala
- dva zastora (detektor 1 i 2)

Za izolaciju interferometra od vanjskih utjecaja ispod podloge na kojoj se izvode potrebno je staviti gumene podmetače.

Pokusi se izvode pomoću lasera (po mogućnosti s dvije ili više valnih duljina).

Na prvi pogled se čini da pokusi koji objašnjavaju ovako složene pojave zahtijevaju jednako tako složeni pribor te zbog toga nisu prikladni za izvođenje u školi. U ovom slučaju to nije tako.

Kao djelitelji snopova mogu se upotrijebiti mikroskopska stakalca, do kojih se može vrlo jednostavno doći. Ravna zrcala su ionako dio osnovnog pribora svakog školskog laboratorija.

Mikroskopsko stakalce zbog «walk off» pojave daje interferiranu lasersku svjetlost pa je bolje rješenje za proučavanje rezultata interferencije upotreba dvije slijepljene prizme kao djelitelja snopa. Pojedinačne prizme škole si ne mogu priuštiti, ali su dostupne u drugoj pristupačnijoj varijanti.

U dućanima s jeftinijom robom dalekozori se mogu nabaviti po povoljnoj cijeni, a unutar svakog dalekozora nalaze se četiri prizme koje zadovoljavaju potrebe pokusa. Dvije slijepljene prizme daju dobar djelitelj snopa, a jednu prizmu možemo iskoristiti za refleksiju svjetlosti umjesto ravnog zrcala. U istim dućanima mogu se nabaviti i crveni laserski pokazivači.

Zeleni laseri su danas također dostupni. Može ih se nabaviti vrlo povoljno preko interneta.

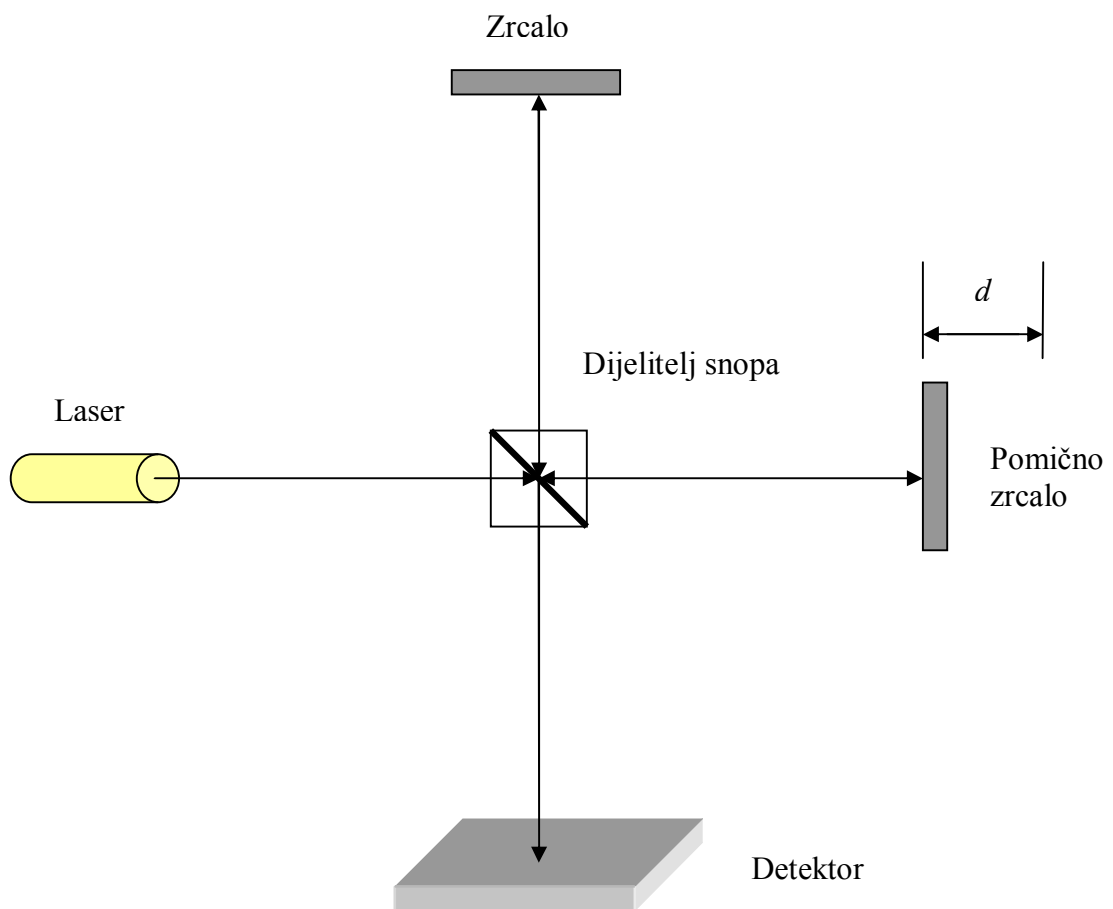
Sve navedeno čini ove pokuse prikladnima za školu.

IZVOĐENJE POKUSA

Pokus se izvodi na jednak način upotrebom mikroskopskih stakalaca i sljepljenih prizmi:

MICHELSONOV INTERFEROMETAR

1. Postaviti dijelove prema shemi.



Slika 10-1 Shema Michelsonovog interferometra

2. Ugađati dijelove dok se ne dobiju pruge interferencije.
3. Proučiti jesu li to pruge interferencije dobivene od reflektiranog i lomljenog snopa.
4. Mjeriti razmak između svijetlih pruga interferencije. Mjerenje ponoviti više puta, odrediti srednju vrijednost, maksimalnu i relativnu pogrešku.

Valna duljina lasera	Broj mjerenja	Razmak između pruga interferencije
	1.	
	2.	
	3.	
	4.	
	5.	

Tabela 10-1 Primjer izgleda tablice za upisivanje rezultata

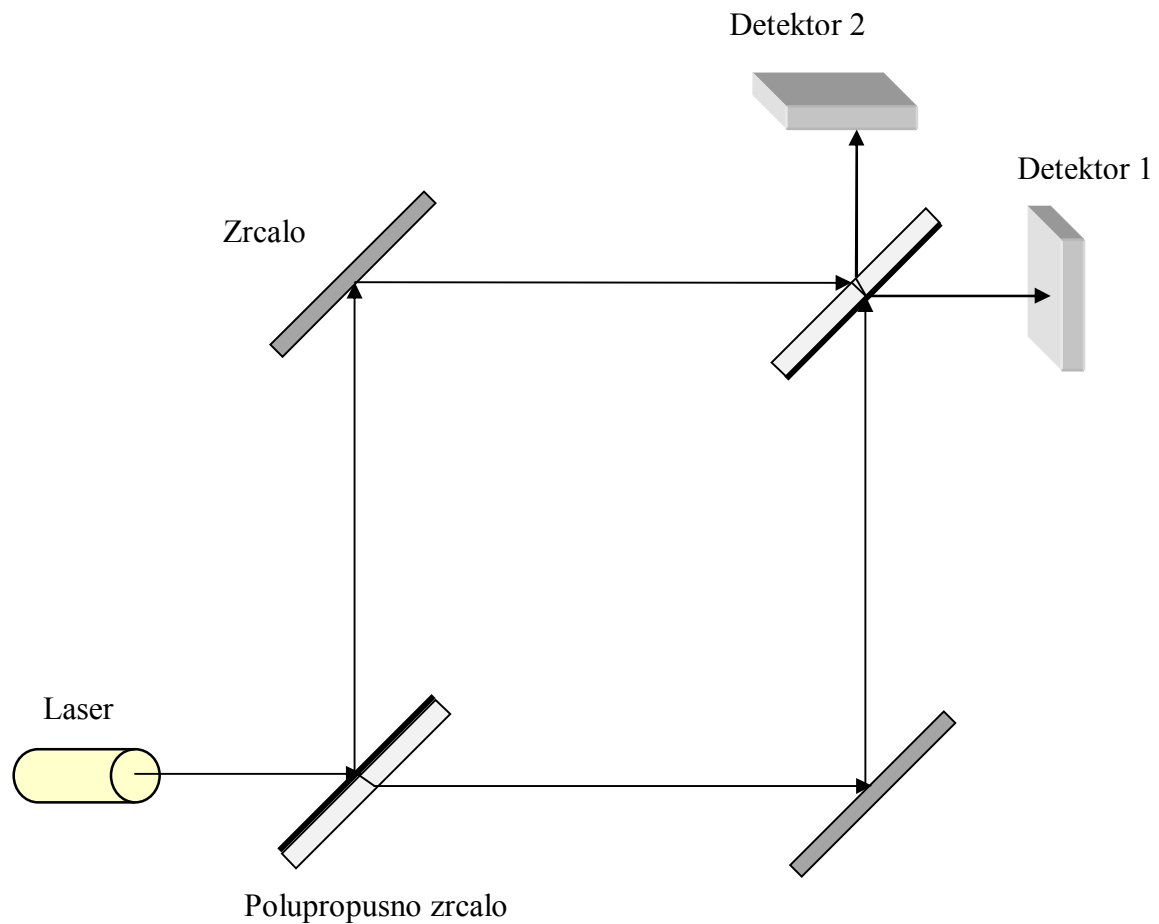
5. Mijenjati položaj pomičnog zrcala promatrati promjene na prugama interferencije.
6. Mjerenja ponoviti s laserskom svjetlošću druge valne duljine.
7. Donijeti zaključke o vezi širine pruga interferencije i valne duljine svjetlosti.

Pokus izvođenja Michelsonovog interferometra je demonstracijski. Cilj je da učenici kroz izradu pokusa i promatranje snopova ponove zakone geometrijske optike te nauče i prodube razumijevanje valne prirode i interferencije svjetlosti. Koriste se dvije boje lasera da bi uočili razliku širina pruga kod laserske svjetlosti različite boje.

Ovaj pokus je demonstracijski, ali otvara put za dalje proučavanje interferometrije, izvođenje mjerenja, računanje valnih duljina svjetlosti, malih pomaka svjetlosti itd.

MACH ZEHNDEROV INTERFEROMETAR

1. Postaviti dijelove prema shemi.



Slika 10-2 Shema Mach Zehnderovog interferometra

2. Ugađati dijelove dok se ne dobiju pruge interferencije.
3. Proučiti jesu li to pruge interferencije dobivene od reflektiranog i lomljenog snopa.
4. Raspraviti i zapisati kako se mijenja faza svakog snopa na djelatlju snopa i zrcalu.
5. Mjeriti razmak između svijetlih pruga interferencije. Mjerenje ponoviti više puta, odrediti srednju vrijednost, maksimalnu i relativnu pogrešku.
Koristi se ista tablica za upisivanje rezultata kao i kod Michelsonovog interferometra.
6. Mjerenja ponoviti s laserskom svjetlošću druge valne duljine.
7. Donijeti zaključke o vezi širine pruga interferencije i valne duljine svjetlosti.

Pokus s Mach Zehnderovim interferometrom je demonstracijski, kao i onaj s Michelsonovim. Učenici kroz izradu Mach Zehnderovog interferometra promatraju promjene faze na svakom djelitelju snopa i zrcalu, za svaki snop. To doprinosi ponavljanju i utvrđivanju gradiva geometrijske optike. Nadalje, proučavanjem kako do interferencije dolazi i promatranjem ovisnosti širina pruga interferencije o valnoj duljini (boji) svjetlosti produbljuju razumijevanje i znanje iz područja valne optike.

Mach Zehnderov pokus u slučaju daljnjeg interesa za ovo područje može koristiti i za mjerenja.

U povijesti fizike interferometri su imali važnu ulogu. Michelsonov interferometar bio je potvrda da se svjetlost u vakuumu uvijek širi istom brzinom i to otkriće je vodilo do specijalne teorije relativnosti. Učenicima ta činjenica može pomoći u kasnijem shvaćanju iste.

Mjerenjima bi učenici trebali shvatiti ovisnost širina pruga interferencije o valnoj duljini laserske svjetlosti što bi im približilo koncept korištenja interferometra za određivanje valne duljine ili indeksa loma sredstva (ako se jednom snopu na put stavi sredstvo čiji indeks želimo odrediti) .

U slučaju da više grupa radi pokus, nakon mjerenja i obrade rezultata, grupe uspoređuju rezultate i diskutiraju.

LITERATURA

Knjige

1. Jeff Hecht, Dick Teresi: Laser, supertool of the 1980s, Ticknor & Fields, New York, 1982.
2. Jeff Hecht: The Laser Guidebook, Second edition, McGraw-Hill, Inc. , United States of America, 1992.
3. Dieter Meschede: Optics, Light and Lasers, WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2004.
4. A.A. Michelson: Studies in Optics, Dover publications, inc., New York, 1995.
5. Nada Brković: Fizika 3, LUK d.o.o., Zagreb, 1994.
6. Tonči Andries, Miro Plavčić, Nikica Simić: FIZIKA 4, PROFIL, Zagreb, 2003.
7. Eugene Hecht: Optics, Addison-Wesley, United States of America, 1998.

Web sites

1. <http://en.wikipedia.org/>
2. http://www.rp-photonics.com/yag_lasers.html
3. <http://eskola.hfd.hr/>
4. <http://susbaza.ifs.hr/onlineverzija/>