

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# ZAVRŠNI RAD

Josip Vuković

Zagreb, 2007

Sveučilište u Zagrebu  
Fakultet strojarstva i brodogradnje

# ZAVRŠNI RAD

Voditelj rada:  
Doc.dr.sc. Josip Stepanić

Josip Vuković

Zagreb, 2007

# **SADRŽAJ:**

<b>1. UVOD</b>	<b>1</b>
<b>2. SVJETLOST</b>	<b>2</b>
Općenito o svjetlosti i zračenju	2
Brzina svjetlosti	3
Izvori svjetlosti	4
Priroda svjetlosti	4
Korpuskularna teorija	4
Valna (undulatorna) teorija	4
Osnovna obilježja vala	5
Fotoni	7
Monokromatska svjetlost	8
Laserska svjetlost	9
Stimulirana emisija	9
Princip rada lasera	10
Karakteristike laserskog svjetla	11
<b>3. GEOMETRIJSKA OPTIKA</b>	<b>12</b>
Zakon širenja svjetlosti	12
Zakon refleksije svjetlosti	13
Zakon refrakcije ili loma svjetlosti	13
Zakon nezavisnosti snopa svjetlosti	14
Načelo povratne putanje svjetlosti	14
<b>4. VALNE I DRUGE SVJETLOSNE POJAVE</b>	<b>15</b>
Interferencija svjetlosti	15
Interferencija dva vala	17
Opći izvod interferencije	22
Konstrukcije pokusa interferencije	23

Ovisnost interferencije o frekvencijama izvora	24
Ovisnost interferencije o razmaku između pukotina	24
Ovisnost interferencije o širini pukotina	25
Polarizacija svjetlosti	26
Disperzija svjetlosti	27
Apsorpcija svjetlosti	27
<b>5. YOUNGOV POKUS</b>	29
Opis pokusa	29
Konstrukcija pokusa	30
<b>6. ZAKLJUČAK</b>	34
<b>7. LITERATURA</b>	35

## POPIS SLIKA

*Slika 2.1.* Spektar vidljive svjetlosti

*Slika 2.2.* Grafički prikaz vala

*Slika 2.3.* Dva vala u fazi, istih frekvencija i valnih duljina

*Slika 2.4.* Dva vala u protufazi, istih frekvencija i valnih duljina

*Slika 2.5.* Stimulirana emisija

*Slika 3.1.* Refleksija zrake svjetlosti

*Slika 3.2.* Lom zrake svjetlosti

*Slika 4.1.* Zbrajanje valova načelom superpozicije (slučaj konstruktivne interferencije)

*Slika 4.2.* Konstruktivna i destruktivna interferencija

*Slika 4.3.* Nekoherentna svjetlost

*Slika 4.4.* Koherentna svjetlost

*Slika 4.5.* Fazorski dijagram superpozicije dva vala inteziteta  $I_1$  i  $I_2$  fazne razlike

$$\varphi = \varphi_2 - \varphi_1.$$

*Slika 4.6.* Konstruktivna i destruktivna interferencija dva vala istog inteziteta

*Slika 4.7.* Ovisnost inteziteta o faznom kutu

*Slika 4.8.* Intezitet kao funkcija razlike putova dva vala

*Slika 4.9.* Dobivanje pruga interferencije

*Slika 4.10.* Izgled pruga interferencije za dvije različite frekvencije izvora

*Slika 4.11.* Izgled pruga interferencije ovisan o razmaku između pukotina

*Slika 4.12.* Izgled pruga interferencije ovisan o širini pukotina

*Slika 4.13.* Disperzija bijele svjetlosti nakon prolaska kroz optičku prizmu

*Slika 5.1.* Youngov pokus

*Slika 5.2* Laser na stalku

*Slika 5.3.* Stalak sa dvije pukotine

*Slika 5.4.* Konstrukcija Youngovog pokusa

*Slika 5.5.* Dobivene pruge interferencije

*Slika 5.6.* Dobivene pruge interferencije

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA

Oznaka	Veličina	Jedinica
$A$	- amplituda vala	m
$c$	- brzina svjetlosti u vakumu	m/s
$D$	- udaljenost izvora od zastora	m
$d$	- udaljenost dva izvora svjetlosti	m
$E$	- energija	J
$E(x,t)$	- jakost električnog polja ravnog elektromagnetskog vala u smjeru osi x	J
$E_0$	- kompleksna amplituda jakosti električnog polja	J
$h$	- Planckova konstanta	Js
$I$	- intezitet vala	mm
$I_0$	- intezitet vala	mm
$I_1$	- intezitet prvog vala	mm
$I_2$	- intezitet drugog vala	mm
$n$	- indeks loma	-
$n_i$	- imaginarna komponenta indeksa loma	-
$n_r$	- realna komponenta indeksa loma	-
$n_1$	- indeks loma sredstva 1	-
$n_2$	- indeks loma sredstva 2	-
$n_{2,1}$	- relativni indeks loma sredstva 2 prema sredstvu 1	-
$P$	- snaga laserskog snopa	W
$P_0$	- početna snaga laserskog snopa	W
$S$	- udaljenost dvije susjedne svijetle ili tamne pruge	mm
$S_n$	- udaljenost n-te od središnje pruge	mm
$S_{n-1}$	- udaljenost n-1. od središnje pruge	mm
$S_{o\check{c}}$	- očitana udaljenost dvije susjedne pruge	mm
$S_3$	- širina pruga interferencije na udaljenosti 3m izvora od zastora	mm
$S_4$	- širina pruga interferencije na udaljenosti 4m izvora od zastora	mm
$S_5$	- širina pruga interferencije na udaljenosti 5m izvora od zastora	mm
$S_6$	- širina pruga interferencije na udaljenosti 6m izvora od zastora	mm
$T$	- period	s
$t$	- vrijeme	s

$u(r)$	- ukupna elongacija dvaju valova	mm
$u_1$	- amplituda prvog vala	mm
$u_2$	- amplituda drugog vala	mm
$u_1(r)$	- elongacija prvog vala u ovisnosti o položaju	mm
$u_2(r)$	- elongacija drugog vala u ovisnosti o položaju	mm
$v$	- brzina širenja vala	m/s
$v_1$	- brzina širenja svjetlosti u optičkom sredstvu 1	m/s
$v_2$	- brzina širenja svjetlosti u optičkom sredstvu 2	m/s
$x$	- razlika puteva dva vala	mm
$x_1$	- put prvog vala	mm
$x_2$	- put drugog vala	mm
$y$	- ukupna elongacija dvaju valova	mm
$y_0$	- amplituda vala	mm
$y_1$	- elongacija prvog vala	mm
$y_2$	- elongacija drugog vala	mm
$z$	- smjer širenja vala	mm
$\alpha$	- kut upadne i reflektirane zrake svjetlosti	°
$\alpha_A$	- koeficijent apsorpcije	°
$\alpha_g$	- granični kut za totalnu refleksiju	°
$\delta$	- razlika hoda	mm
$\emptyset$	- razlika faza	°
$\theta$	- kut	°
$\theta_1$	- kut upadne zrake	°
$\theta_2$	- kut lomljene zrake	°
$\varphi$	- fazna razlika	°
$\varphi_1$	- relativna faza prvog vala	°
$\varphi_2$	- relativna faza drugog vala	°
$\lambda$	- valna duljina	m
$\omega$	- frekvencija elektromagnetskog vala	Hz
$\nu$	- frekvencija	Hz

## ***1. UVOD***

Na području preciznog mjerenja dužina sve se češće koriste optičke metode temeljene na poznavanju valne duljine laserske svjetlosti. Mjerni uređaji konstruirani su tako da koriste valnu prirodu svjetlosti za dobivanje interferentnih pruga, a mali se pomaci detektiraju na temelju promjene interferentne slike.

U okviru ovog rada opisat će se svojstva svjetlosti, njena valna priroda, te laserska svjetlost kao posebna zbog svojih svojstava koji olakšavaju dobivanje interferentne slike. U radu je opisana interferencija svjetlosti, posebno Youngov eksperiment za dobivanje pruga interferencije i njegova primjena u preciznom mjerenju dužina. Odgovarajući pokus je teoretski obrazložen i odgovarajuća oprema konstruirana.

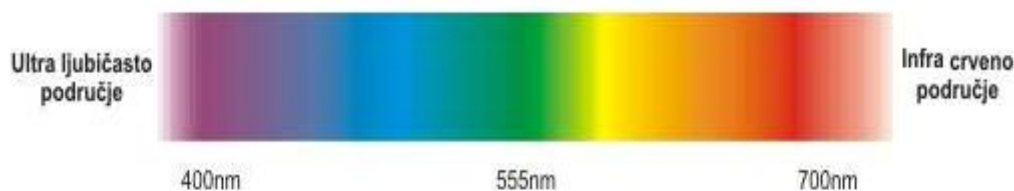


## 2.SVJETLOST

### 2.1 Općenito o svjetlosti i zračenju

Nauka o svjetlosnim pojavama ili optika javlja se u 17. stoljeću. Još od 1888. godine, kada je njemački fizičar Heinrich R. Hertz nizom sistematskih i vrlo pažljivih pokusa dokazao postojanje elektromagnetskih valova, neprestano traje proučavanje elektromagnetskih valova, njihovih svojstava i njihove moguće primjene. Valne duljine opaženih elektromagnetskih valova protežu se od sitnih  $10^{-13}$  metara pa sve do  $10^5$  metara. U tom širokom valnom području, svoje je mjesto našla i svjetlost.

Svjetlost je elektromagnetski val, odnosno dio elektromagnetskog spektra u području valnih duljina od 380 nm do 780 nm (slika 2.1). Svjetlost je zračenje koje djeluje na mrežnicu oka, i izaziva osjet vida. Ostale vrste elektromagnetskih zračenja (toplinsko, ultraljubičasto, mikrovalove, radiovalove) naše tijelo registrira na drugi način. Valna duljina svjetla određuje boju svjetla (slika 2.1). Vidljiva svjetlost nalazi se između ultraljubičastog zračenja i infracrvenog zračenja, a frekvencije vidljive svjetlosti kreću se između  $7,5 \cdot 10^{14}$  Hz (za 400 nm) i  $3,95 \cdot 10^{14}$  Hz (za 760 nm). Vidljivoj svjetlosti prilagođene su naše oči i sve objekte na nebu (sunce, zvijezde, itd) vidimo u vidljivom dijelu elektromagnetskog spektra, dok su nam za proučavanje objekata u ostalim dijelovima elektromagnetskog dijela spektra potrebni posebni uređaji.



Slika 2.1: Spektar vidljive svjetlosti

Elektromagnetsko zračenje je jedna od mnogih formi koje energija može zauzeti. Kako ime pokazuje, ta energija ima dvije komponente: električnu i magnetsku. Komponente kao takve su nevidljive, one naime postoje u obliku električnih i

magnetskih polja. Ta dva polja su međusobno povezana. Pobuđuju jedno drugo, zračeći ili putujući kroz prostor, a njihova polja variraju. Pri najjačem električnom polju, najjače je i magnetsko, a kad električno slabi

magnetsko polje također slabi. Kada se dvije osnovne ideje, kretanje i oscilacija, iskombiniraju, dobije se upravo definicija vala. Postoje i druge vrste valova kao što su valovi zvuka i vodeni valovi, ali oni su zapravo vibracije fluida (voda, zrak) umjesto vibracija električnog i magnetskog polja. Oscilacija polja se dešava u pravilnim razmacima, poznatijim kao period, a broj perioda u jedinici vremena je frekvencija. Prostorno ponavljanje određeno je valnom duljinom vala.

Elektromagnetsko zračenje koje zrači sa Sunca je zapravo oluja (praćena „tučom“) fotona.

X-zrake tada su najveći komadi tuče, jaki ali rijetki. Radio fotoni su najmanji komadi tuče, sitni i rijetki. Dok su fotoni vidljivog svjetla kao komadi tuče prosječne veličine, nisu ni previše jaki ni slabi, ali su svakako najčešći. Drugim riječima sunce emitira najviše vidljivog zračenja na Zemlju dok ostala emitira sve slabije zavisno od njihove udaljenosti od vidljivog spektra. Zračenja velikih valnih duljina, malih frekvencija i male energije (radio valovi) neopasna su za čovjeka, dok su zračenja malih valnih duljina, velikih frekvencija i velikih energija (X-zrake) vrlo opasna za život čovjeka.

### 2.1.1 Brzina svjetlosti

Elektromagnetski valovi od kojih se sastoji i svjetlo kreću se brzinom  $c=299\,792\,458$  m/s u vakumu, dok npr. zvuk ne može putovati bez medija, u svemiru (vakumu) nema zvukova.

Zapravo, svjetlost se u svakom sredstvu, bio to zrak, staklo, voda, itd., giba brzinom koja je manja od  $c$ . Točnije, giba se brzinom  $c/n$ , gdje je  $n$  indeks loma tog sredstva. Međutim, materijali s velikim indeksom loma imaju i veliku reflektivnost.

Brzina širenja vala povezana je s frekvencijom, i valnom duljinom vala te se jednostavno izračunava izrazom:  $v=\lambda \cdot \nu$ .

Ako pomnožimo valnu duljinu nekog dijela elektromagnetskog spektra (svjetlosti) sa njenom frekvencijom uvijek dobijemo isti broj, to jest dobijemo brzinu širenja svjetlosti u vakumu

(299 792 458 m/s).

Brzina  $v$  se naziva faznom jer je to brzina kojom se faza vala širi prostorom. Međutim u mnogo fizikalnijoj situaciji, jedan val se sastoji od više frekvencija. Takav val je tada dan zbrajanjem sinusoidalnih funkcija. Zbroj monokromatskih valova koji imaju bliske frekvencije dovodi do stvaranja niza grupa. Gibanje envelope tih grupa, određeno je grupnom brzinom,  $v_g$ . Energija vala se (najčešće) prenosi upravo grupnom brzinom što znači da ona ima veći fizikalni značaj. Grupna brzina je jednaka faznoj brzini kada su fazne brzine za svaki monokromatski val različitih frekvencija međusobno jednake. Međutim, u slučaju da su fazne brzine različite za različite kružne frekvencije, tada se fazna i grupna brzina razlikuju. Pojava da se valovi različitih frekvencija šire različitim brzinama naziva se disperzija i sasvim je uobičajena pojava pri prolasku svjetlosti kroz sredstvo.

### 2.1.2 Izvori svjetlosti

U praksi se susrećemo sa dva glavna izvora svjetlosti:

1. PRIMARNI IZVORI: sunce, razna rasvjetna tijela, svjetleće reklame, TV i monitori, iskrenja, električni luk, ....
2. SEKUNDARNI IZVORI: svi objekti koji ne generiraju svjetlo nego ga samo reflektiraju. Zgrade, stijene, biljke, životinje...

## 2.2 Priroda svjetlosti

Tumačenje svjetlosti kakvo poznaje moderna fizika rezultat je stoljetnih radova znanstvenika tijekom kojih su redom stvarane i obarane teorije mnogih istaknutih znanstvenika toga doba.

### 2.2.1 Korpuskularna teorija

Isaac Newton je 1666. godine u svom radu *Optica* detaljno opisao svoje eksperimente sa svjetlošću te zaključke do kojih je došao o prirodi svjetlosti. Prema Newtonu svjetlost se ponaša kao da se sastoji od bestjelesnih čestica koje putuju brzinom svjetlosti. Postoje razne vrste čestica koje odgovaraju različitim bojama u spektru, i sve se gibaju u praznom prostoru. Opisao je razlaganje bijele svjetlosti na boje

pomoću prizme, i zaključio da se pri razlaganju bijele svjetlosti javljaju posebne boje koje se uvijek prostiru od plave na jednom kraju do crvene na drugom.

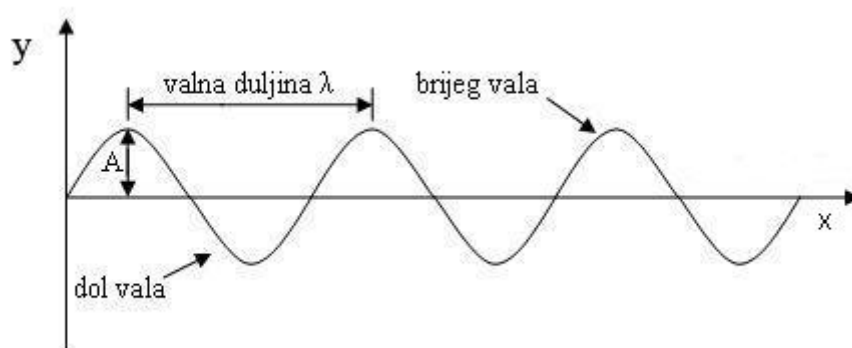
### 2.2.2 Valna (undulatorna) teorija

Iako je Newton opisao i pojavu Newtonovih prstenova koja može poslužiti kao dobar primjer valne prirode svjetlosti, tvrdoglavo je ustrajao na tvrdnji o korpuskularnoj prirodi svjetlosti. Drugo razmišljanje o prirodi svjetlosti zastupao je Christian Huygens koji je svjetlost shvaćao kao valove. Huygens je smatrao kako je svjetlost impuls koji se širi kroz neko elastično sredstvo, te tako utemeljio valnu (undulatornu) teoriju. Potvrdu valne teorije pružili su u 19. stoljeću eksperimenti Thomasa Younga, koji je opazio interferenciju svjetlosti i objasnio ju valnom teorijom. Radovi Fresnela (matematički opisao svjetlost kao val) i Jamesa C. Maxwella (u svojoj teoriji elektromagnetizma promatra svjetlost kao val) dodatno su doprinjeli uvjerenju da je svjetlost valne prirode.

Fizika 20. stoljeća pokazala je da su i Newton i Huygens bili u pravu. Albert Einstein pretpostavio je da se svjetlost sastoji od kvantata svjetlosti (fotona) koji imaju i valna i čestična svojstva. Tako za svjetlost danas kažemo kako ima dualnu (dvojnu) prirodu.

### 2.2.3 Osnovna obilježja vala

Ako promatramo jedan mali dio vala i nacrtamo ga na papir dobit ćemo sljedeću sliku:



Slika 2.2: Grafički prikaz vala

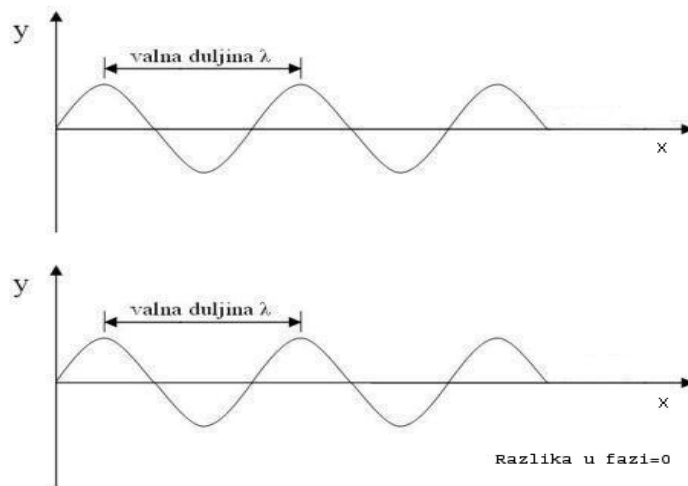
Smjestimo početak vala u ishodište koordinatnog sustava, kao što je prikazano slikom 2.2. Analiziramo li sliku vidio da smo dobili graf ovisnosti elongacije (udaljenosti čestica vala od početnog, ravnotežnog položaja) o vremenu. Svaki dio vala koji ima pozitivnu elongaciju naziva se brijeg vala, a svaki dio vala s negativnom elongacijom nazivamo dolom vala. Maksimalna elongacija naziva se amplituda vala ( $A$ ). Valna duljina ( $\lambda$ ) je udaljenost između vrhova dvaju susjednih valnih brijegova.

Ako u istom trenutku promatramo dva vala koji utječu jedan na drugoga, kažemo da valovi interferiraju. Ukupni val koji tada dobijemo zavisi o razlici hoda između dva vala.

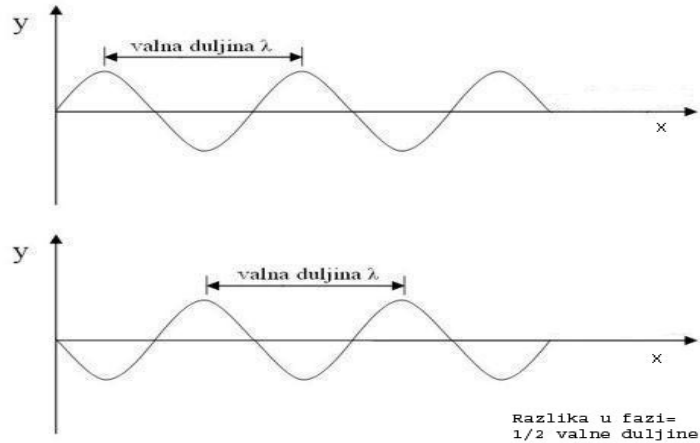
Razlika hoda ( $\delta$ ) između dva vala jednake valne duljine je zapravo udaljenost za koji jedan val ide ispred drugog vala.

Razlika hoda može se izraziti pomoću fazne razlike ( $\varphi$ ):

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta$$



Slika 2.3: Dva vala u fazi, istih frekvencija i valnih duljina



Slika 2.4: Dva vala u protufazi, istih frekvencija i valnih duljina

Slike 2.3 i 2.4 prikazuje dva vala istih frekvencija i valnih duljina.

-kad je razlika u fazi jednaka  $0, 2\pi, 4\pi, 6\pi, \dots$  valovi su u fazi

-kad je razlika u fazi jednaka  $\pi, 3\pi, 5\pi, \dots$  valovi su u protufazi.

Pravilo superpozicije (zbrajanja) valova vrijedi za sve vrste valova, valove na vodi, svjetlosne valove, radiovalove, itd. U trenutku kada se valovi preklapaju u nekoj točki prostora, ukupna elongacija u toj točki jednaka je zbroju elongacija pojedinih valova. Pri širenju vala čestice sredstava ostaju na svojim mjestima i titraju oko ravnotežnog položaja, širi se samo stanje titranja odnosno prenosi se energija širenja vala.

S obzirom na način titranja imamo dva tipa valova:

- transversalni val: čestice sredstva titraju okomito na smjer širenja vala (npr. kod svjetlosti)
- longitudinalni val: čestice titraju u smjeru širenja vala (npr. kod zvuka)

Valovi nastaju u izvoru vala, a titranje se određenom brzinom proširi kroz sredstvo. U elastičnim su tvarima susjedne čestice međusobo povezane elastičnim silama te pomak jedne čestice iz ravnotežnog stanja uzrokuje i pomak susjednih čestica. Poremećaj ravnotežnog stanja se zbog inercije ne prenosi trenutno nego nekom konačnom brzinom. Pritom kroz sredstvo ne putuju čestice nego sam poremećaj. Zato je važno razlikovati brzinu titranja čestica oko ravnotežnog položaja od brzine širenje vala. Brzina vala ovisi o osobinama (elastičnosti i gustoći) sredstava kroz koje val prolazi.

Kada val prelazi iz jednog sredstva u drugo ili se prostire kroz nehomogeno sredstvo, brzina i valna duljina mu se mijenjaju, a frekvencija ostaje ista.

#### 2.2.4 Fotoni

Zagrijano tijelo emitira elektromagnetsko zračenje (ova emisija je temelj svjetlosti koju dobivamo iz žarne niti ili sa sunca). Na visokim temperaturama znatni dio ovog zračenja se pojavljuje u vidljivom dijelu spektra i što je viša temperatura tijela koje zrači veći je udio plavog dijela spektra u ukupnom zračenju. Bijelu svjetlost opažamo kad se povećao udio plave svjetlosti pri grijanju pa se dobiva vizualni utisak bijeloga. Ova pojava je opisana Wienovim zakonom pomaka koji kaže da se s porastom temperature spektralno područje na kojem se nalazi maksimum zračenja pomiče prema kraćim valnim duljinama.

Zračenje crnog tijela je pokušano biti objašnjeno kao zračenje beskonačno mnogo elektromagnetskih oscilatora koji zrače na svim mogućim frekvencijama. Njemački fizičar Max Planck je 1900. uspio dobiti zakon koji je opisivao zračenje crnog tijela. U tome je uspio postulirajući dvije pretpostavke:

1. Energija elektromagnetskih oscilatora može se mijenjati samo za određeni, diskretni iznos, odnosno u kvantima energije
2. Energija oscilatora s frekvencijom  $\nu$  može se mijenjati samo za cjelobrojni iznos umnoška frekvencije i konstante  $h$ ,  $\Delta E = nh\nu$ , gdje je  $n$  cijeli broj.

Planckova kvantizacija elektromagnetskog oscilatora dovela je do alternativnog gledanja na zračenje. Zračenje određene frekvencije  $\nu$ , promatra se kao skupina čestica s energijama  $h\nu$ . Ove čestice je kemičar G.N. Lewis prvi nazvao fotonima. Einstein je 1905. uspješno objasnio fotoelektrični efekt pomoću koncepta fotona. Ako svjetlost zamislimo kao val ne možemo objasniti fotoelektrični efekt, ako je zamislimo kao pljusak fotona energije  $h\nu$ , sve se slaže. Međutim Einstein nije odbacio i valnu sliku svjetlosti. Suština njegovog pogleda je tome da se neke svjetlosne pojave mogu objasniti pomoću valne slike, ali neke druge pojave se objašnjavaju pomoću čestične slike.

### 2.3 Monokromatska svjetlost

Svjetlost odnosno zračenje sastavljeno od samo jedne valne duljine (jedne boje) nazivamo monokromatska svjetlost, a svjetlost sastavljenu od valova više valnih duljina nazivamo (više boja) nazivamo polikromatska svjetlost. Monokromatska svjetlost ima vlastite, nepromjenjive karakteristike. Ona ostaje, u svojim svojstvima, identična sama sebi sve dok nije razorena ili dok se ne nalazi u pomičnom sustavu.

Monokromatska svjetlost je element zračenja, a monokromatski elementi zračenja tvore kontinuirani, neprekinuti skup, i ima ih beskonačno mnogo.

Zbog relacija  $c = \lambda \cdot \nu$  monokromatsko zračenje je ujedno monofrekventno.

Strogo monokromatsko odnosno monofrekventno zračenje nije moguće ostvariti. Monokromatske spektralne linije sastoje se uvijek iz nekog intervala,  $\Delta\lambda$ , dužina vala odnosno frekvencija,  $\Delta\nu$ . Monokromatsko zračenje je u optici korisna idealizacija.

Svjetlosne pojave bit će osobito jednostavne ako se zbivaju s idealiziranom monokromatskom svjetlošću. Najčešće ćemo zato proučavati zakonitosti koje se odnose na takvu monokromatsku svjetlost.

## **2.4 Laserska svjetlost**

### **2.4.1 Stimulirana emisija**

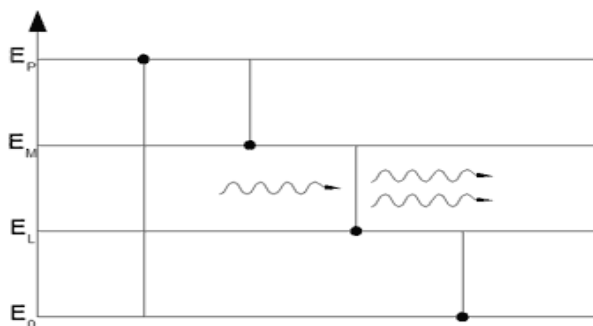
Proširujući kvantnu teoriju na strukturu materije, Bohr je predložio model atoma u kojemu su elektroni u atomu raspoređeni po nizu diskretnih energetske stanja. Prijelaz elektrona iz jednog stanja u drugo može biti praćen emisijom ili apsorpcijom fotona. Pri tome energija fotona odgovara energijskoj razlici ta dva stanja. Bohrov model predviđa samo proces spontane emisije, odnosno, atom u pobuđenom stanju, nakon nekog vremena, zračenjem fotona prelazi u niže energetske stanje. Einstein je u svom članku o kvantnoj teoriji zračenja uveo pretpostavku o mogućnosti stimulirane emisije. Stimulirana emisija je proces kada atom iz pobuđenog stanja prelazi u niže energetske stanje potaknut nazočnošću fotona koji ima upravo energiju jednaku razlici dva atomska stanja između kojih se događa prijelaz. Pri tome atom emitira foton iste energije kao što je i upadni foton i istog pravca.

Stimulirana emisija je rijedak događaj iste termodinamičke činjenice zbog koje je spontana emisija moguća: svaki sustav teži da zauzme stanje minimuma energije. U



normalnoj situaciji, tj. termodinamičkoj ravnoteži naseljenost viših stanja opada s porastom energije stanja. To znači da će nadolazeći foton vjerovatnije biti apsorbiran od donjeg stanja nego što će stimulirati atom u gornjem stanju da izrači foton. Pod ovakvim uvjetima spontana emisija dominira nad stimuliranom.

Da bi se dogodila stimulirana emisija potrebna je inverzija naseljenosti: naseljenost gornjeg nivoa određenog prijelaza mora biti veća od naseljenosti donjeg nivoa. Tada je vjerovatnost da će nadolazeći foton inducirati stimuliranu emisiju biti veća od vjerovatnosti da će biti apsorbiran (slika 2.5). Rezultat će biti pojačanje u svjetlosti, odnosno povećani broj fotona s energijom prijelaza. Na ovoj ideji se zasniva rad lasera. Laser je akronim za pojačanje svjetlosti pomoću stimulirane energije zračenja. (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission **R**adiation).



Slika 2.5: Stimulirana emisija

## 2.4.2 Princip rada lasera

Svaki laser se sastoji od tri glavna dijela: Optičkog pojačala, optičkog rezonatora i energetske pobude sustava.

Optičko pojačalo je zapravo medij u kojem se pojačava laserska svjetlost pri svakom prolazu. U aktivnom mediju pumpanjem iz vanjskog izvora energije postiže se inverzija naseljenosti između gornjeg i donjeg nivoa čiji prijelaz daje laserski snop. Postoje mnogi rasporedi energetske nivoa koji mogu osigurati lasersko djelovanje.

Drugi glavni dio svakog lasera je optički rezonator. Tipično se laserski rezonator sastoji od dva paralelna skoro ravna zrcala. Jedno od zrcala ima reflektivnost što bliže 100% za lasersku svjetlost, dok je reflektivnost drugoga nešto manja od 100% kako bi dio svjetlosti izišao van i tako tvorio laserski snop. Samo ona svjetlost koja putuje skoro okomito na zrcalnu ravninu ostaje unutar rezonatora i ima priliku da bude pojačana. Da bi takva svjetlost konstruktivno interferirala mora biti zadovoljen uvjet da je duljina rezonatora jednaka cjelobrojnom umnošku polovice valne duljine svjetlosti. Za različite vrijednosti cijelog broja  $m$  dobivaju se različite valne duljine,

odnosno frekvencije pojedinih *modova* laserskog rezonatora. Zbog toga spektar laserskog svjetla izgleda kao serija uskih vršaka koji su međusobno razmaknuti za  $c/2L$  na frekventnom spektru, gdje je  $c$  brzina svjetlosti, a  $L$  razmak između zrcala.

Kao energetska pobuda medija može poslužiti apsorpcija fotona, sudari između elektrona ili iona i aktivnih molekula odnosno atoma koji emitiraju lasersko svjetlo, sudari između samih aktivnih atoma odnosno molekula, rekombinacija slobodnih elektrona, rekombinacija nositelja naboja u poluvodiču, kemijska reakcija koja stvara pobuđene molekule ili atome.

Na kraju, možemo ponoviti kako dolazi do laserskog svjetla. Vanjska pobuda dovede do inverzije naseljenosti u aktivnom mediju. Ovi atomi spontano emitiraju fotone koji zatim induciraju stimuliranom emisijom dodatne fotone. Neki od ovih fotona se vraćaju u medij djelovanjem rezonatora i stvaraju lavinu fotona u istom pravcu. Konačno se stvara stacionarno stanje u kojemu veliki broj fotona putuje naprijed-natrag u rezonatorskoj šupljini po osi, dok mali dio fotona izlazi kroz zrcalo i daje laserski snop.

### 2.4.3 Karakteristike laserskog svjetla

Laseri su korisni zbog svojih jedinstvenih karakteristika, monokromatičnosti, usmjerenosti, velikog sjaja i velike koherencije.

Dok je spektralna širina zračenja dobivena spontanom emisijom s jednog prijelaza reda veličine  $10^{-12} - 10^{-10}$  m, kod laserskog svjetla širina može biti i tek  $10^{-20}$  m. Ovakva mala širina je posljedica činjenice da laserski rezonator može osigurati da skoro sva svjetlost dolazi stimuliranom emisijom koja potječe od svega nekoliko početnih, sličnih fotona.

Budući da je skoro sva laserska svjetlost rezultat fotona koji putuju po pravcu paralelnom s osi rezonatora u osnovi bi laserski snop trebao biti savršeno kolimiran. Međutim, snop se širi zbog difrakcije jer je transverzalna dimenzija rezonatora

konačna. Tipični kutovi divergencije laserskog snopa su manji od 1 miliradiana odnosno  $0,05^\circ$ .

Spektralni sjaj je optičko svojstvo koje je ujedno mjera monokromatičnosti i usmjerenosti izvora svjetlosti. Spektralni sjaj je definiran kao svjetlosna snaga izračena u jedinični prostorni kut u jedinični valni interval po jediničnoj površini. Možemo usporediti spektralni sjaj sunca i tipičnog He-Ne lasera. Na tipičnoj vidljivoj valnoj duljini od 500 nm, spektralni sjaj sunca iznosi  $7 \cdot 10^{12} \text{ Wm}^{-3}\text{sterad}^{-1}$ . Spektralni sjaj 1mW He-Ne lasera na valnoj duljini 632,8 nm koji daje snop promjera 0,5 mm iznosi  $5 \cdot 10^{23} \text{ Wm}^{-3}\text{sterad}^{-1}$ , znači 10 milijardi više od sunčevog.

Koherencija se definira kao mjera korelacije faza između različitih točaka vala. Iako je to osobina putujućeg vala, koherencija je direktno vezana uz osobine izvora vala.

Žarulja sa žarnom niti je vrlo nekoherentan izvor svjetla. Od nje možemo načiniti koherentniji izvor stavljajući prostorni i kromatski filter. Međutim, na taj način odbacujemo veoma veliki dio svjetla. Kao mjera prostorne koherencije služi koherentna duljina. Koherentna duljina je maksimalna udaljenost između dvije točke po pravcu prostiranja snopa, za koju su te dvije točke u konstantnom faznom odnosu. Duljina koherencije za He-Ne laser može iznositi od

10 cm do 100 m, dok je duljina koherencije tipičnog termalnog izvora oko 1 mikrometra.

### ***3.GEOMETRIJSKA OPTIKA***

Geometrijska optika je dio optike kojim aproksimativno objašnjavamo ponašanje svjetlosti jer zanemarujemo njenu prirodu, a promatramo samo pravac kretanja. Svrha geometrijske optike je pronalaženje zakonitosti koje se odnose na stvaranje slika pomoću optičkih sistema.

Osnovni zakoni o kojima se radi odnose se na vladanje svjetlosti kad se ona :

- širi u prostoru
- pada na pravilnu glatku materijalnu plogu i od nje se odbija ili reflektira
- prolazi kroz pravilnu, glatku, graničnu plogu, između dva prozirnna sredstva i na njoj se lomi ili reefraktira

Ponašanje svjetlosti u navedenim prilikama obuhvaćeno je zakonima:

1. širenja svjetlosti;
2. refleksije;
3. refrakcije;
4. nezavisnosti snopova svjetlosti.

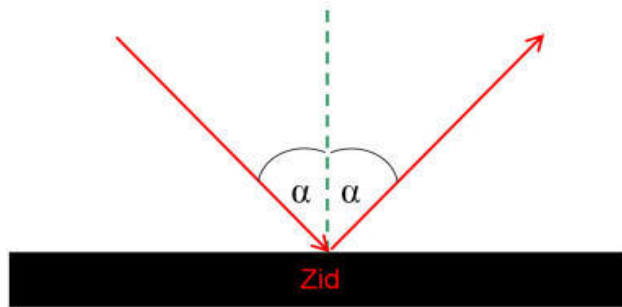
### **3.1 Zakon širenja svjetlosti**

U optičkom homogenom sredstvu zraka svjetlosti širi se po pravcu. Iako su podobnija istraživanja pokazala da zakon nije u potpunosti točan, on zadovoljava za svakodnevnu upotrebu i matematička objašnjenja pojava u optičkim sustavima. Poznavajući ovaj zakon možemo konstruirati jednostavne klopke za svjetlo. Kako svjetlo ne može skrenuti iza ugla dovoljan je već „L“ profil da zaustavi njegov neželjeni prodor.

Pravocrtno širenje svjetlosti ipak je najočitije kod osvjetljavanja. Znamo da ako ispred svjetlosnog snopa postavimo neku prepreku, stvaramo sjenu. To je zato jer svjetlo ne može zaobići prepreku te ne prodire iza nje.

### **3.2 Zakon refleksije svjetlosti**

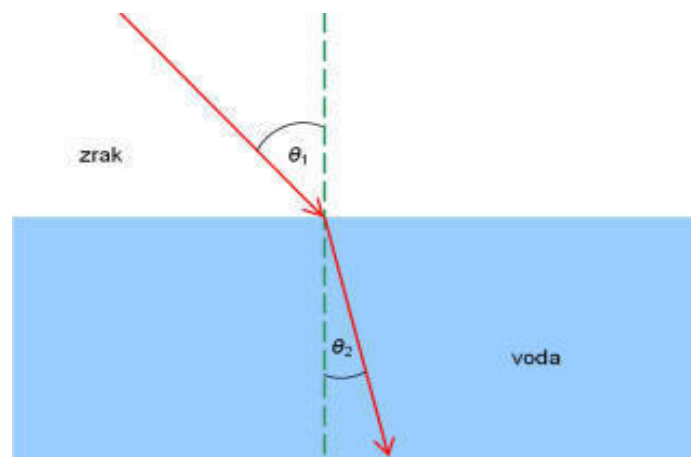
Zakon refleksije glasi: ako zraka svjetlosti upada na neku reflektirajuću plogu, kut upada jednak je kutu odraza, a upadna i reflektirajuća zraka u istoj su ravnini okomitoj na ravninu refleksije (slika 3.1).



Slika 3.1: Refleksija zrake svjetlosti

### 3.3 Zakon refrakcije ili loma svjetlosti

Zakon loma svjetlosti glasi: zraka svjetlosti koja upada pod nekim kutem na granicu prozirnog sredstva lomi se (slika 3.2). Upadajuća i lomljena zraka leže u istoj ravnini, a omjer sinusa upadnog kuta i sinusa kuta loma jest konstantan broj za točno definirane medije kroz koje zraka prolazi. Taj broj definira relativni indeks loma tih dvaju sredstava, a ako je prvo sredstvo vakum onda je taj broj apsolutni indeks loma.



Slika 3.2: Lom zrake svjetlosti

Matematička formulacija glasi:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad \text{ili} \quad \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2} ,$$

gdje je:

$n_{2,1}$  - relativni indeks loma sredstva 2 prema sredstvu 1.

$v_1$  – brzina širenja svjetlosti u optičkom sredstvu 1

$v_2$  – brzina širenja svjetlosti u optičkom sredstvu 2.

Ako je  $n_2 > n_1$  tada kažemo da je sredstvo 2 optički gušće od sredstva 1.

Apsolutni indeks loma definiran je izrazom:

$$n = \frac{c}{v},$$

gdje je :

$c$  – brzina svjetlosti u vakumu,

$v$  – brzina širenja svjetlosti u sredstvu.

Ako promatramo širenje svjetlosti iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo, pri određenom kutu upada, svjetlost više ne upada u optički rjeđe sredstvo. Taj se kut naziva granični kut za totalnu refleksiju i obilježen je sa  $\alpha_g$ . ( $\alpha_g = \arcsin(n_2/n_1)$ ).

### **3.4 Zakon nezavisnosti snopova svjetlosti**

Ovaj zakon govori o međusobnom utjecaju zraka svjetlosti, i on glasi: ako jedan snop zraka svjetlosti prolazi kroz drugi snop, jedan na drugoga ne utječu.

### **3.5 Načelo povratne putanje svjetlosti**

Ako iz točkastog izvora A izlazi zraka svjetlosti i dolazi u neku točku B prostora po bilo kakvom putu, pretrpjevši putem bilo koji broj refleksija i refrakcija. Postane li točka B izvor svjetlosti promjenimo na zraci smjer širenja i primjenimo zakone geometrijske optike, uvjerit ćemo se da će zraka pošla iz B, stići u A po istoj putanji po kojoj je došla

iz točke A u točku B.

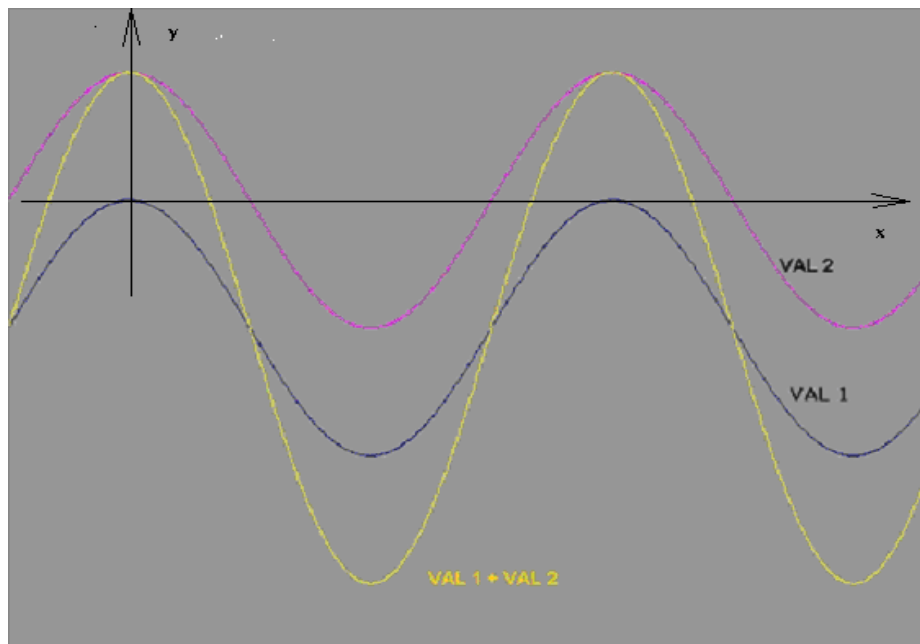
## **4. VALNE I DRUGE SVJETLOSNE POJAVE**

Kao što je prije spomenuto svjetlost ima dvojnju prirodu. Pojave koje ukazuju da je svjetlost val su:

- interferencija,
- difrakcija,
- polarizacija.

## 4.1 Interferencija svjetlosti

Jedan od zakona geometrijske optike kaže da ako se dva svjetlosna snopa sijeku u nekoj točki prostora, ne utječu jedan na drugoga te nastavljaju svoja gibanja. Međutim u posebnim uvjetima možemo opaziti interferenciju dvaju svjetlosnih snopova, to jest njihovo poništavanje ili pojačavanje (slika 4.1).



Slika 4.1: Zbrajanje valova načelom superpozicije (slučaj konstruktivne interferencije)

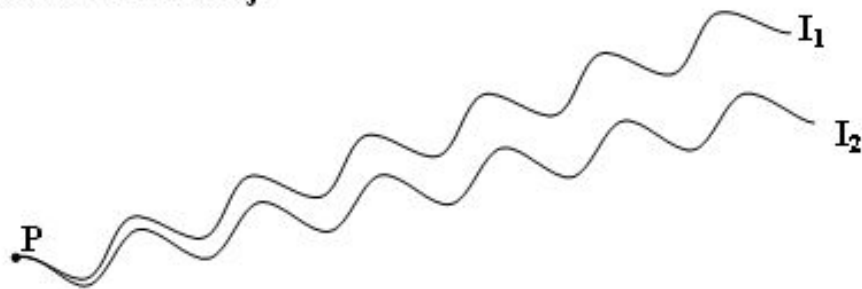
Valna funkcija resultantnog vala jednaka je zbroju pojedinačnih valnih funkcija. Taj princip superpozicije dva vala proizlazi iz linearnosti sustava, a nazivamo ga interferencija valova. Ona predstavlja promjenu inteziteta dobivenu superpozicijom

na mjestu presjecanja valova. Kažemo da nastaje konstruktivna i destruktivna interferencija (slika 4.2).

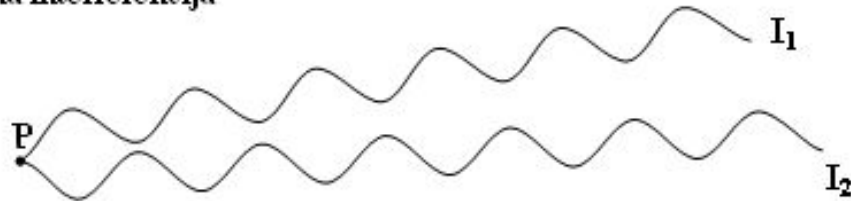
Dva vala će se pojačati ako su u fazi, tj. ako se maksimum jednog i maksimum drugog vala poklapaju u nekoj točki prostora (konstruktivna interferencija).

Valovi će se poništiti ako se maksimum jednog i minimum drugog vala poklapaju u nekoj točki prostora (destruktivna interferencija).

#### Konstruktivna interferencija



#### Destruktivna interferencija

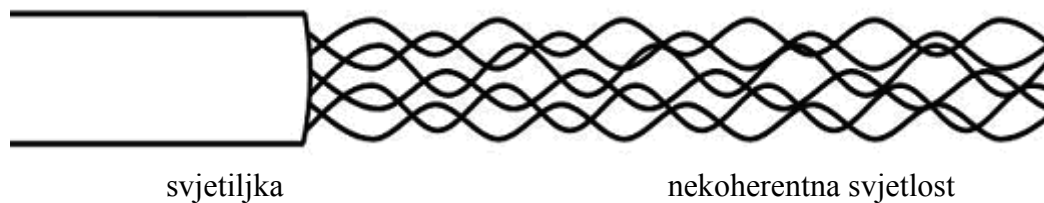


Slika 4.2: Konstruktivna i destruktivna interferencija

Da bi došlo do interferencije svjetlosti, valovi moraju biti koherentni. Svjetlosne valove emitiraju pojedini atomi ili molekule u tvari (npr. atomi u volframovoj niti žarulje). Svjetlosni val nastaje kada pobuđeni atom emitira višak energije u obliku svjetlosti.

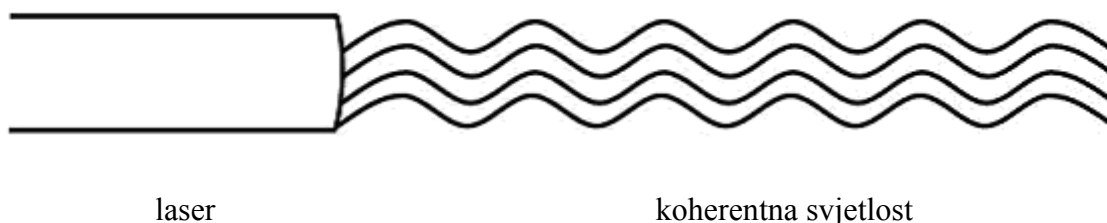
Taj proces traje vrlo kratko (oko  $10^{-8}$  sekundi), stoga izvor svjetlosti emitira veliki broj pojedinačnih valova. Takva svjetlost nema pravilne razlike u fazi između valova od kojih se sastoji te kažemo da je takva svjetlost nekoherentna (slika 4.3). Izvore takve svjetlosti zovemo nekoherentnim izvorima. Takvi su izvori gotovo svi koje poznajemo iz svakodnevnog života.





Slika 4.3: Nekoherentna svjetlost

Analogno, ako je razlika u fazi između valova svjetlosti konstantna, kažemo da je svjetlost koherentna, a izvore takve svjetlosti nazivamo koherentnim izvorima (slika 4.4). Primjeri takvih izvora su laseri.



Slika 4.4: Koherentna svjetlost

#### 4.1.1 Interferencija dva vala

Ukupan intezitet dvaju ili više superponiranih valova nije nužno jednak zbroju njihovih pojedinačnih inteziteta. Objašnjenje te razlike objasniti ćemo na primjeru interferencije dvaju monokromatskih valova jednake frekvencije.

Razmotrit ćemo interferenciju dvaju monokromatskih ravnih valova konstantnih amplituda i jednakih frekvencija prikazanih kompleksnim funkcijama  $u_1(r)$  i  $u_2(r)$ . Radi jednostavnije računanja valove prikazujemo samo u ovisnosti o položaju.

$$u_1(r) = u_1 e^{j\varphi_1} \quad (1)$$

$$u_2(r) = u_2 e^{j\varphi_2} \quad (2),$$

pri čemu su  $\varphi_1$  i  $\varphi_2$  fazna razlika dvaju valova.

Superpozicija tih valova daje monokromatski val jedne frekvencije i kompleksne amplitude:

$$u(r) = u_1(r) + u_2(r). \quad (3)$$

Uzmemo li:

$$I_1 = |u_1|^2 \quad (4)$$

$$I_2 = |u_2|^2 \quad (5),$$

kao pojedinačne intezitete dvaju valova ukupni intezitet je jednak:

$$I = |u|^2 = |u_1 + u_2|^2 \quad (6)$$

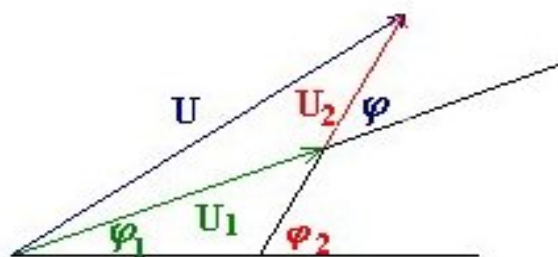
što uz (1), (2), (3), (4), (5) konačno daje:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos\varphi \dots \dots \dots \text{INTERFERENCIJSKA JEDNADŽBA (7)}$$

gdje je  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$  relativna faza između dva vala.

Iz interferencijske jednadžbe vidljivo je da ukupan intezitet nije proporcionalan samo zbroju inteziteta pojedinih valova već i faznom kutu među njima.

Na slici 4.5 prikazan je fazorski dijagram superpozicije dvaju valova.

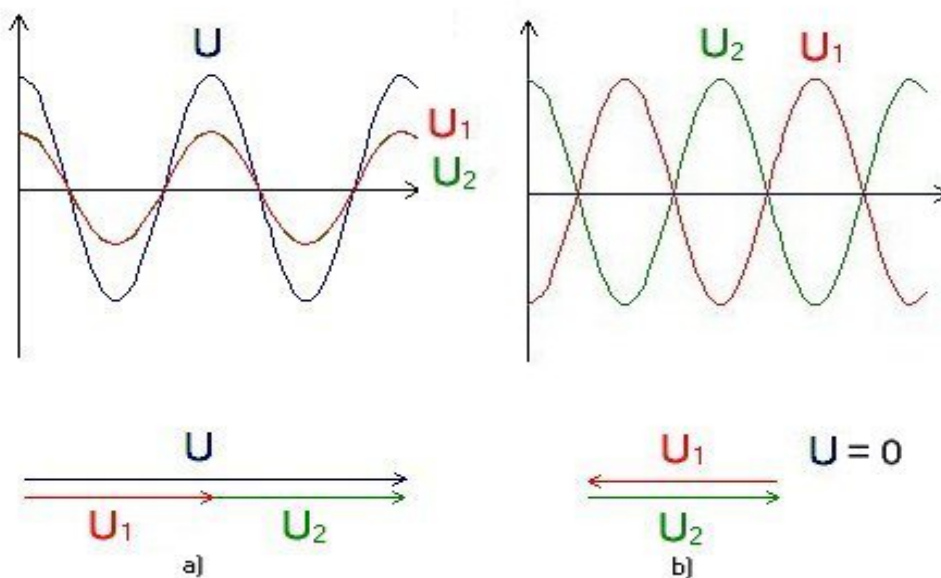


Slika 4.5: Fazorski dijagram superpozicije dva vala inteziteta  $I_1$  i  $I_2$  fazne razlike  $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ .

Rezultanta dva vala ovisna je o amplitudama dva vala, ali i o kutu između njih.

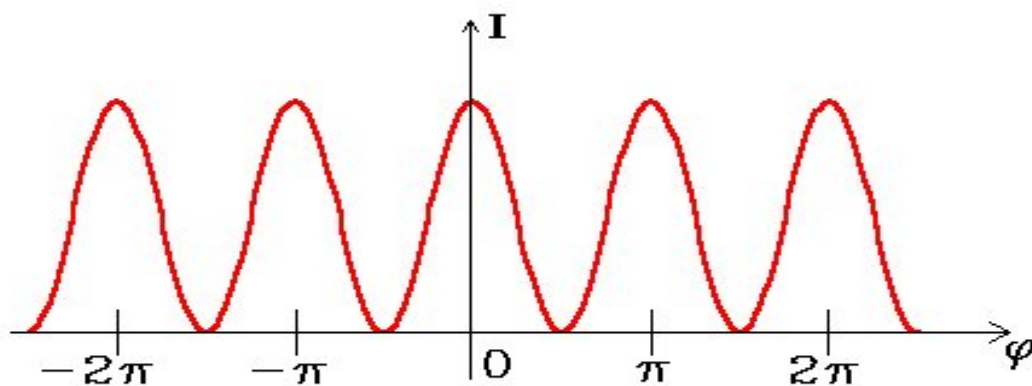
Konstruktivna interferencija nastaje kada su dva vala u fazi te se međusobno pojačavaju

(slika 4.6a). Kod destruktivne interferencije dva vala su fazno pomaknuta za kut  $\pi$  te se pri tome brijeg jednog vala poklapa sa dolom drugog vala te se oni poništavaju (slika 4.6b).



Slika 4.6: Konstruktivna i destruktivna interferencija dva vala istog inteziteta

Na slici 4.6 prikazana su dva krajnja slučaja faznih odnosa između dva vala. Realno se taj fazni kut mijenja u intervalu između 0 i  $2\pi$  tako da ukupni intezitet, uz uvjet  $I_1 = I_2 = I_0$ , ovisi o kutu  $\varphi$  prema jednadžbi (7).



Slika 4.7: Ovisnost inteziteta o faznom kutu

Uz takvu jaku ovisnost inteziteta o faznoj razlici moguće je mjeriti vrlo male fazne razlike detektirajući intezitet svjetlosti. Još korisnije jest mogućnost mjerenja vrlo malih pomaka detekcijom inteziteta. Promatramo dva vala koji su potekli iz istog izvora, svaki inteziteta  $I_0$ , koji se šire u smjeru  $z$ , pretpostavimo da jedan val prevaljuje dulji put u odnosu na drugi za udaljenost  $d$ .

Možemo napisati jednadžbe za ta dva vala:

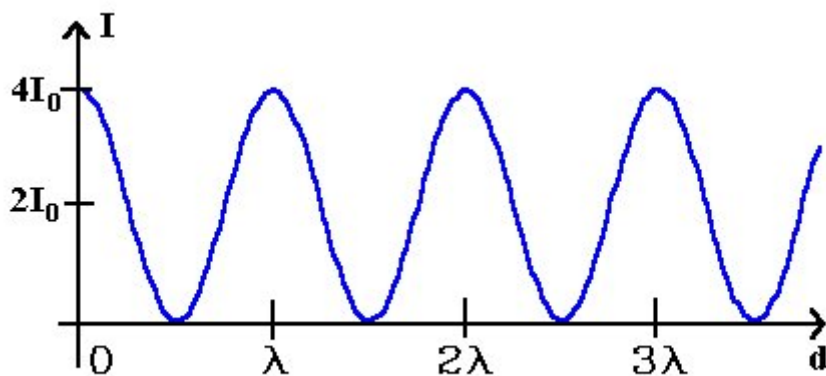
$$u_1 = \sqrt{I_0} e^{jkz},$$

$$u_2 = \sqrt{I_0} e^{-jk(z-d)},$$

$$\varphi = kd = 2\pi d/\lambda.$$

Uvrštavanjem tih jednadžbi u interferencijsku jednadžbu dobivamo:

$I = 2I_0 [1 + \cos(2\pi d/\lambda)]$ .....ovisnost inteziteta o razlici puta između dva vala (slika 4.7)



Slika 4.8: Intezitet kao funkcija razlike putova dva vala

Na slici 4.8 vidimo da ukoliko je  $d$  jednak parnom višekratniku  $\lambda/2$  nastaje konstruktivna interferencija, dok je uz  $d$  koji je neparni višekratnik  $\lambda/2$  nastaje destruktivna interferencija.

Optički uređaj kojime detekcijom inteziteta resultantnog vala možemo mjeriti fazne razlike između dva upada vala naziva se Michelsonov interferometar.

INTERFERENCIJSKA JEDNADŽBA U REALNOM (TRIGONOMETRIJSKOM) OBLIKU:

$$y_1 = y_0 \sin(2\pi t/T - 2\pi x_1/\lambda);$$

$$y_2 = y_0 \sin(2\pi t/T - 2\pi x_2/\lambda);$$

$$y = y_1 + y_2;$$

$$y = y_0 \sin(2\pi t/T - 2\pi x_1/\lambda) + y_0 \sin(2\pi t/T - 2\pi x_2/\lambda);$$

$$y = 2y_0 \sin[(2\pi t/T - 2\pi x_1/\lambda + 2\pi t/T - 2\pi x_2/\lambda)/2] \cos[(2\pi t/T - 2\pi x_1/\lambda - 2\pi t/T + 2\pi x_2/\lambda)/2];$$

$$y = 2y_0 \sin[2\pi t/T - \pi(x_1 + x_2)/\lambda] \cos[\pi(x_2 - x_1)/\lambda];$$

$$y = 2y_0 \cos[\pi(x_2 - x_1)/\lambda] \sin[2\pi t/T - \pi(x_1 + x_2)/\lambda];$$

$$\varnothing = \varphi_1 - \varphi_2 = 2\pi t/T - 2\pi x_1/\lambda - 2\pi t/T + 2\pi x_2/\lambda = 2\pi(x_2 - x_1)/\lambda \dots \text{razlika faza}$$

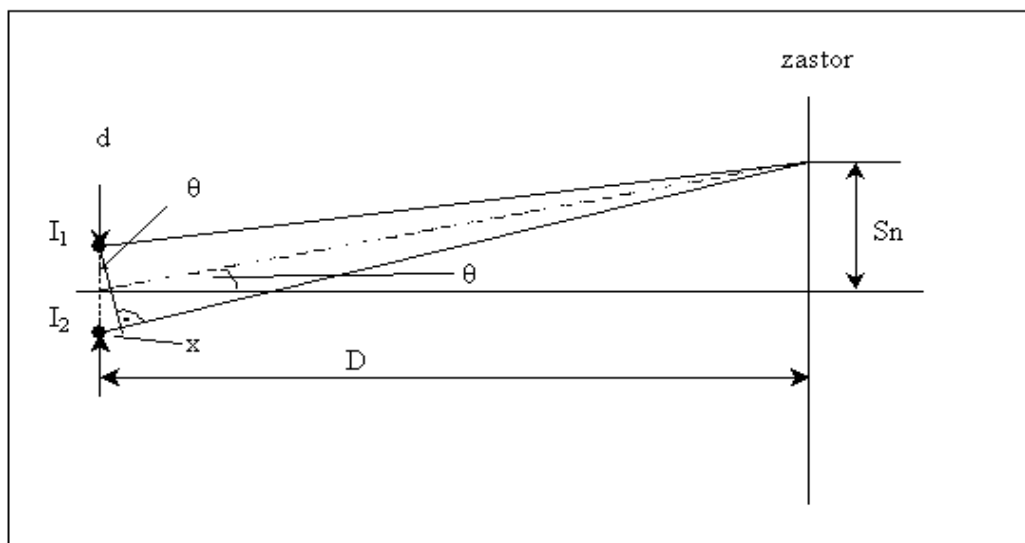
$$x_2 - x_1 = \delta \dots \text{razlika hoda}$$

$$y = 2y_0 \cos(\varnothing/2) \sin[2\pi t/T - \pi(x_1 + x_2)/\lambda];$$

$$A = 2y_0 \cos(\varnothing/2) \dots \text{amplituda vala}$$

- Ako dva vala zaostaju jedan za drugim za  $k\lambda$  doći će do konstruktivne interferencije, a ako dva vala zaostaju jedan za drugim za  $(2k+1)\lambda/2$  doći će do destruktivne interferencije.

#### 4.1.2 Opći izvod interferencije



Slika 4.9: Dobivanje pruga interferencije

Ako promatramo put svjetlosti iz dva približno ista točkasta izvora do neke točke na zastoru moći ćemo izvući neke zaključke o udaljenostima tamnih i svijetlih pruga na zastoru u ovisnosti o udaljenostima između izvora, valnoj duljini svjetlosti izvora i udaljenosti izvora od zastora (slika 4.9).

Ako uzmemo:

-  $D \sim 1000d$ ;

- izvori koherentni (iste valne duljine) ;

$$\varphi/2\pi = x/\lambda;$$

$$\operatorname{tg}\theta = S_n/D;$$

$$\sin\theta = x/d;$$

- za male kuteve vrijedi:  $\text{tg}\theta \sim \sin\theta \sim \theta$ ;

$$x/d = S_n/D ;$$

$$x = S_n \cdot d/D ;$$

$$x = \frac{d}{D} \cdot S_n ;$$

**Svijetla točka (ista faza):**

$$\frac{x}{\lambda} = \frac{2\pi n}{2\pi} ;$$

$$x = n\lambda ;$$

**Udaljenost dviju svjetlih točaka:**

$$x = n\lambda = \frac{d}{D} \cdot S_n ;$$

$$S = S_n - S_{n-1} ;$$

$$S = \frac{D}{d} \lambda ;$$

$$\lambda = \frac{dS}{D} ;$$

Koristeći ovu formulu možemo lako izračunati valnu duljinu bilo koje svjetlosti, samo ako dobro izmjerimo udaljenost dviju susjednih (svjetlih ili tamnih) pruga na zastoru. Kako svjetlost ima relativno vrlo male valne duljine (par stotina nanometara) moguće je mjeriti tako male pomake pomoću mjerenja udaljenosti pruga interferencije (red veličine par milimetara).

#### 4.1.3 Konstrukcije pokusa interferencije

Za dobivanje pruga interferencije i dokazivanje valne prirode svjetlost znanstvenici su izvodili mnoge eksperimente, a najpoznatiji od njih su:

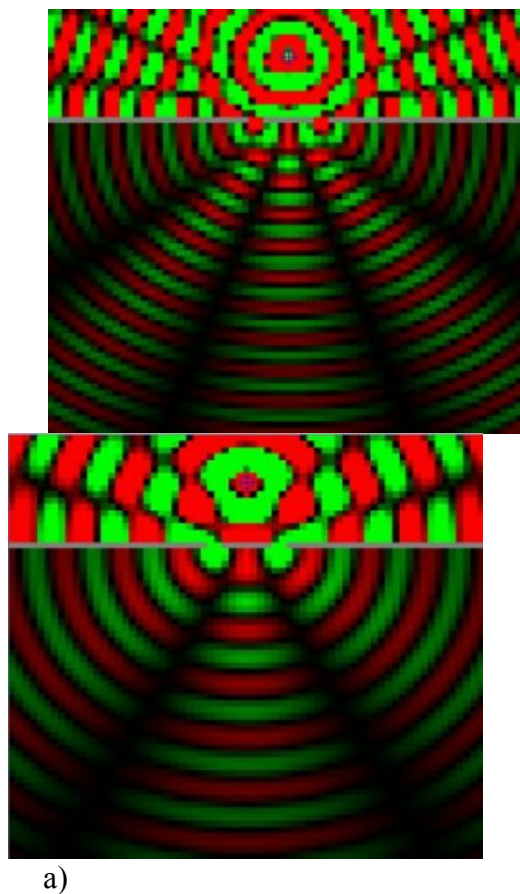
- Youngove pukotine
- Fresnelova zrcala
- Lloydovo zrcalo
- Pohllov eksperiment

- Haidingerov pokus
- Fizeauov klin
- Newtonovi kolobari
- .....

#### 4.1.4 Ovisnost interferencije o frekvencijama izvora

Promatramo ovisnost interferencije o različitim frekvencijama točkastog izvora koji se nalazi ispred prepreke. Na slici 4.10a prikazan je izvor veće frekvencije, a na slici 4.10b manje.

Potrebno je napomenuti da je zelenom bojom prikazan maksimum vala (brijeg), crvenom bojom minimum (dol), a crnom bojom obilježeni su čvorovi (mjesto gdje je valna funkcija jednaka nuli).



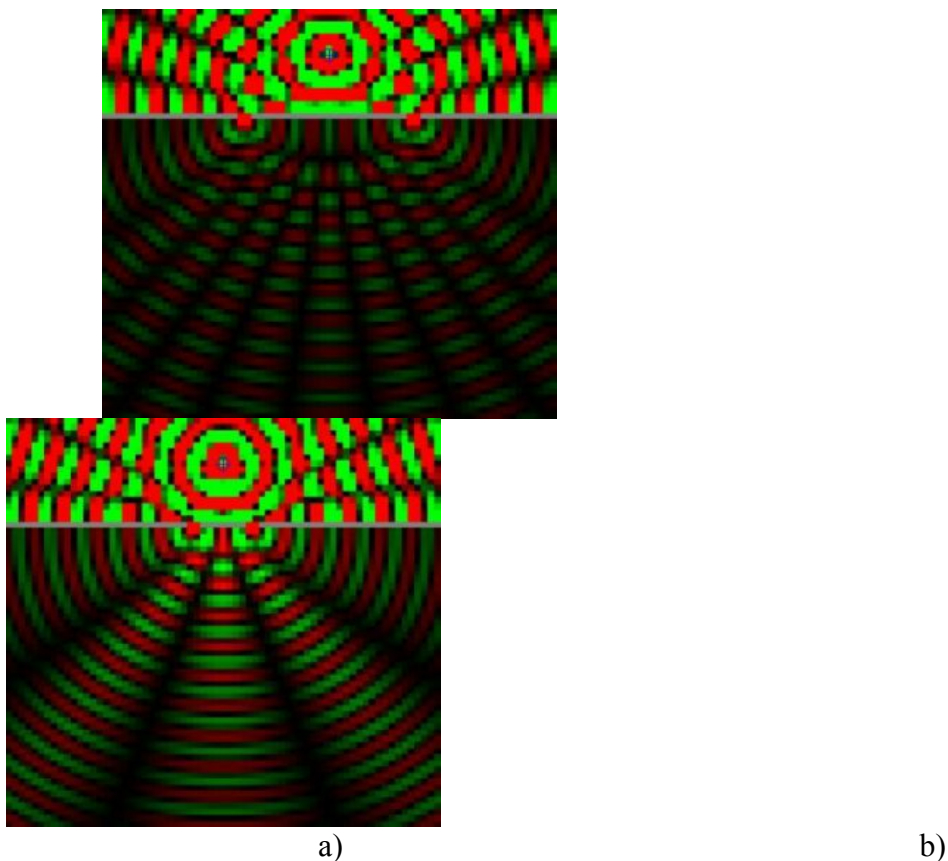


Slika 4.10 : Izgled pruga interferencije za dvije različite frekvencije izvora

Vidimo da u slučaju kada se mijenja frekvencija izvora, kod izvora veće frekvencije (manje valne duljine) postoji gušći raspored interferencijskih pruga i veći broj maksimuma i minimuma.

#### 4.1.5 Ovisnost interferencije o razmaku između pukotina

U ovom slučaju frekvenciju i širinu pukotina ćemo smatrati konstantama, a promatrat ćemo interferencijsku sliku pri različitim razmacima između pukotina. Na slici 4.11a prikazan je slučaj većeg razmaka, a na slici 4.11b manjeg.

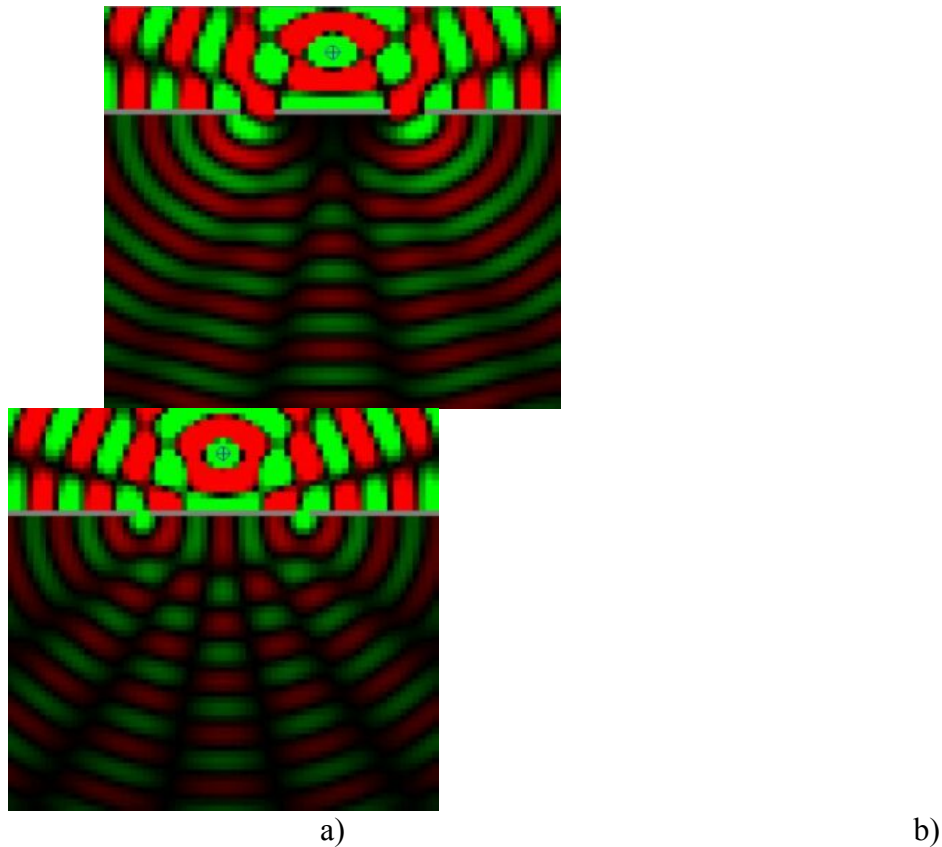


Slika 4.11: Izgled pruga interferencije ovisan o razmaku između pukotina

Veći broj maksimuma i minimuma, odnosno gušći raspored interferencijskih pruga pojavljuje u slučaju kada su pukotine razmaknute na većim razmacima.

#### 4.1.6 Ovisnost interferencije o širini pukotina

U ovom slučaju promatrat ćemo kako izgleda interferencija ako mijenjamo širinu pukotina. Na slici 4.12a prikazan je slučaj kada su pukotine veće širine, a na slici 4.12b uže.



Slika 4.12: Izgled pruga interferencije ovisan o širini pukotina

Primjećujemo da su interferencijske pruge i pravilnije raspoređene kada su pukotine uže (slika 4.12b). Pri nailasku valne fronte na pukotinu interferencija će biti jasnije izražena ako je pukotina reda veličine valne duljine izvora. Tada se ona ponaša kao izvor novog vala, dok što je širina pukotine veća, na interferencijsku sliku nakon prepreke dolazi do znatnijeg utjecaja izvornog vala koji prolazi između rubova pukotine. Tako u slučaju kada su pukotine veće (slika 4.12a) ima manje interferencijskih pruga u području s lijeve strane lijeve pukotine i desne strane desne pukotine.

## 4.2 Polarizacija svjetlosti

Polarizacija svjetlosti je ograničenje titranja valova svjetlosti na neku određenu ravninu, tj. isključivanje svih titranja koja nisu u toj ravnini. Svjetlost se rasprostire u transversalnim valovima u svim ravninama okomitim na smjer rasprostiranja. Na primjer, kad zrake svjetlosti padaju na zrcalo točno određenog materijala tako da su okomicom na ravninu zrcala zatvaraju kut od  $56^\circ$ , onda su zrake reflektirane svjetlosti linearno polarizirane, tj. valovi svjetlosti titraju u jednoj ravnini. Ovako nastalo polarizirano svjetlo na prvi se pogled ničim ne razlikuje od običnog svjetla prije izvršene polarizacije. Međutim, ako se tako polarizirano svjetlo pusti da pod istim kutem ( $56^\circ$ ) pada na drugo zrcalo, paralelno s prvim, pa ako se ovo drugo zrcalo zaokreće tako da nagib prema horizontalnoj ravnini ostaje isti, ali da se promjeni međusobni položaj obliha zrcala, opaža se da intenzitet u drugom zrcalu reflektiranog svjetla

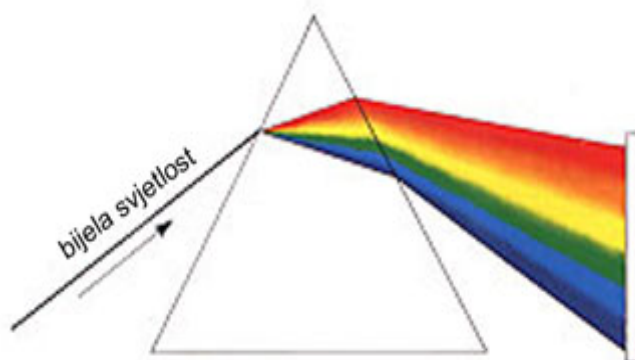
(tj. polariziranog) postaje sve slabiji, dok potpuno ne iščezne. To će biti, kada ravnine obliha zrcala postignu međusobno okomit položaj. U tom ukrštenom položaju zrcala, drugo zrcalo ne može više svjetlosti reflektirati pa to upućuje na zaključak, da se sa svjetlošću na prvom zrcalu dogodila neka promjena, tj. da je polarizirano. Prvo zrcalo naziva se polarizator, a drugo analizator jer se pomoću njega dokazuje polarizacija.

Eksperimenti pokazuju da se svjetlost refleksijom od glatkih ploha nekog tijela samo onda potpuno polarizira, kada kut između reflektirane i lomljene zrake iznosi  $90^\circ$ . Taj uslov je ispunjen, kad je kut upadanja upravo toliki da je tangens tog kuta jednak indeksu loma dotične tvari. Taj kut upada zove se kut polarizacije i kod refleksije na staklu iznosi od

$55^\circ - 64^\circ$  (indeks loma stakla je između 1,4 i 2).

### 4.3 Disperzija svjetlosti

Disperzija je rasap složene (npr. bijele) svjetlosti koji nastaje prilikom loma, ogiba ili totalne refleksije. Zračenje veće valne duljine (crveno) lomi se slabije od onoga manje valne duljine (ljubičasto) jer je indeks loma obrnuto proporcionalan s valnom duljinom. Zato se bijela (sunčeva) svjetlost loma kroz optičku prizmu rastavlja na spektar boja od kojih je sastavljena (slika 4.13). Razlika između indeksa loma ljubičastog i crvenog zračenja zove se koeficijent disperzije.



Slika 4.13: Disperzija bijele svjetlosti nakon prolaska kroz optičku prizmu

### 4.4 Apsorpcija svjetlosti

Kako se snop laserske svjetlosti širi nekim sredstvom dolazi do raspršenja snopa i do apsorpcije energije zračenja. Kada razmatranje ograničimo na sredstva u kojima je raspršenje zanemarivo u usporedbi s apsorpcijom, jednostavnu fizikalnu sliku pruža Lorentzov model atoma. Jakost električnog polja ravnog elektromagnetskog vala frekvencije  $\omega$ , odnosno valne duljine  $\lambda = 2\pi c / \omega$  u vakumu, koji se širi sredstvom indeksa loma  $n$  u smjeru osi  $x$ , opisujemo izrazom:

$$E(x,t) = E_0 e^{i\omega(nx/c - t)}$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti, a  $E_0$  je općenito kompleksna amplituda. U Lorentzovom modelu atoma, indeks loma je kompleksan broj:

$$n = n_r + in_i,$$

gdje su  $n_r$  i  $n_i$  realna i imaginarna komponenta indeksa loma.

Uvrštavanjem kompleksnog indeksa loma u izraz za električno polje dobit ćemo:

$$E(x,t) = E_0 e^{-\alpha_i x/c} \cdot e^{i\omega(n_r x/c - t)}.$$

Imaginarna komponenta indeksa loma pojavljuje se u prvom eksponencijalnom faktoru koji opisuje atenuaciju elektromagnetskog vala u sredstvu. Realna komponenta indeksa loma pojavljuje se u drugom eksponencijalnom izrazu koji opisuje titranje i određuje brzinu širenja  $c/n_r$ , te valnu duljinu  $\lambda' = \lambda/n_r$ , elektromagnetskog vala u sredstvu.

Intezitet elektromagnetskog zračenja razmjernan je u vremenu srednjem kvadratu amplitude električnog polja.

$$I(x) \propto |E(x,t)|^2 = |E_0|^2 e^{-2\alpha_i x/c},$$

odnosno:

$$I(x) = I_0 e^{-2\alpha_i x/c} = I_0 \cdot e^{-\alpha_A x},$$

gdje smo uveli koeficijent apsorpcije  $\alpha_A$ . Intezitet zračenja eksponencijalno opada s udaljenošću u sredstvu. Ukupna snaga laserskog snopa jest integral inteziteta zračenja preko površine poprečnog presjeka snopa. Stoga i ukupna snaga laserskog snopa eksponencijalno opada s udaljenošću:

$$P(x) = P_0 \cdot e^{-\alpha_A x}.$$

Relacija koja povezuje imaginarnu komponentu indeksa loma  $n_i$  i koeficijent apsorpcije  $\alpha_A$  je :

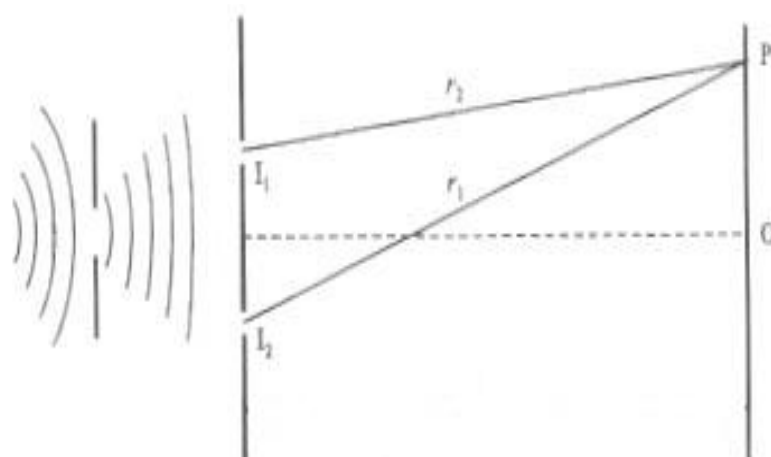
$$n_i = \frac{\alpha_A c}{2\omega} = \frac{\alpha_A \lambda}{4\pi},$$

gdje su  $\omega$  i  $\lambda$  frekvencija i valna duljina elektromagnetskog vala u vakumu. Koeficijent apsorpcije ovisi o vrsti materijala.

## 5. YOUNGOV POKUS

### 5.1 Opis pokusa

Engleski fizičar Thomas Young opazio je 1803. godine interferenciju svjetlosti iz dvije pukotine koje su osvijetljene točkastim izvorom svjetlosti. (slika5.1).



Slika 5.1: Youngov pokus

Sunčeva svjetlost obasjava jednu usku pukotinu. Iz pukotine izlaze svjetlosni valovi koji upadaju na dvije uske i bliske pukotine ( $I_1$  i  $I_2$ ). Ako koristimo koherentni izvor svjetlosti kao što je laser, pukotina koja se nalazi ispred  $I_1$  i  $I_2$  nije potrebna. Iz tih pukotina izlaze dva koherentna vala. (Koherentni valovi su valovi kod kojih je razlika u fazi konstantna). U točki P na zastoru valovi jednog i drugog izvora (to jest valovi od jedne i druge pukotine) zbrajaju se i daju interferentnu sliku. Došavši do točke P jeda je val prevalio dulji put od drugog, te valovi više nisu u fazi. Ovisno o razlici u fazi koju će valovi imati u određenoj točki zastora, nastat će svjetla pruga (za konstruktivnu interferenciju) ili tamna pruga (za destruktivnu interferenciju). To je bio prvi pokus koji je ukazao na valnu prirodu svjetlosti.

Pomoću izvedene formule:

$$\lambda = \frac{dS}{D},$$

mjerenjem razmaka između tamnih i svjetlih pruga, mjerenjem udaljenosti pukotina od zastora, te mjerenjem udaljenosti pukotina možemo izračunati valnu duljinu svjetlosti koja dolazi do pukotina.

## 5.2 Konstrukcija pokusa

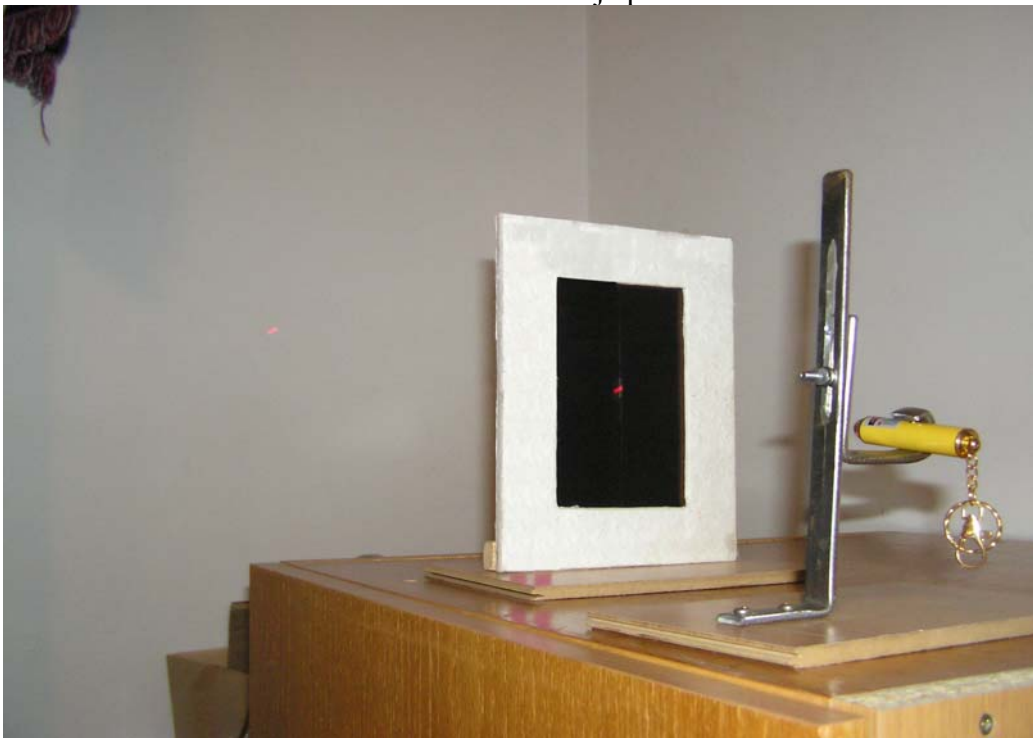
Youngov eksperiment može se izvesti i izvan laboratorija bez uporabe posebne opreme. Trebamo samo laser (kao izvor monokromatske svjetlosti), držač lasera (slika 5.2), te dvije uske pukotine koje služe kao izvori dva koherentna snopa svjetlosti (slika 5.3). Razmak između pukotina mora biti dovoljno uzak da zraka laserske svjetlosti uspije "obasjati" jednu i drugu pukotinu.



Slika 5.2: Laser na stalku



Slika 5.3: Stalak sa dvije pukotine



Slika 5.4: Konstrukcija Youngovog pokusa

Što je udaljenost pukotina manja pruge interferencije bolje se vide. U ovom slučaju to je oko 1mm. Pruge interferencije jasno se vide na udaljenosti pukotina oko 5m od zastora (zida). Stalak sa laserom udaljen je od samih pukotina oko 1 m. Valna duljina laserske svjetlosti je 650nm (točnije 630nm-680nm).



Slika 5.5 i 5.6 prikazuju pruge interferencije dobivene ovim pokusom.

Središnja (centralna) pruga uvijek je svjetla točka jer do nje zrake koje izlaze iz jedne i druge pukotine prelaza jednake puteve, ostaju u fazi i dobivamo konstruktivnu interferenciju.

Variranjem udaljenosti  $D$  pukotina od zastora (znamo da je  $d=1\text{mm}$  i  $\lambda=650\text{nm}$ ) mjenjamo širinu pruga interferencije. Tako za udaljenost pukotina  $5\text{m}$  od zastora širina pruga interferencije prema formuli

$$\lambda = \frac{dS}{D}, \quad \text{odnosno: } S = D * \lambda / d,$$

trebala bi biti  $3,2\text{ mm}$ , što je dobiveno.

$$S_5 = 5 * 10^3 \text{mm} * 650 * 10^{-6} \text{mm} / 1 \text{mm} = 3,2 \text{mm};$$

Ako pukotine postavimo na različite udaljenosti od zastora dobivamo i različite udaljenosti pruga interferencije, na primjer ako uzmemo:

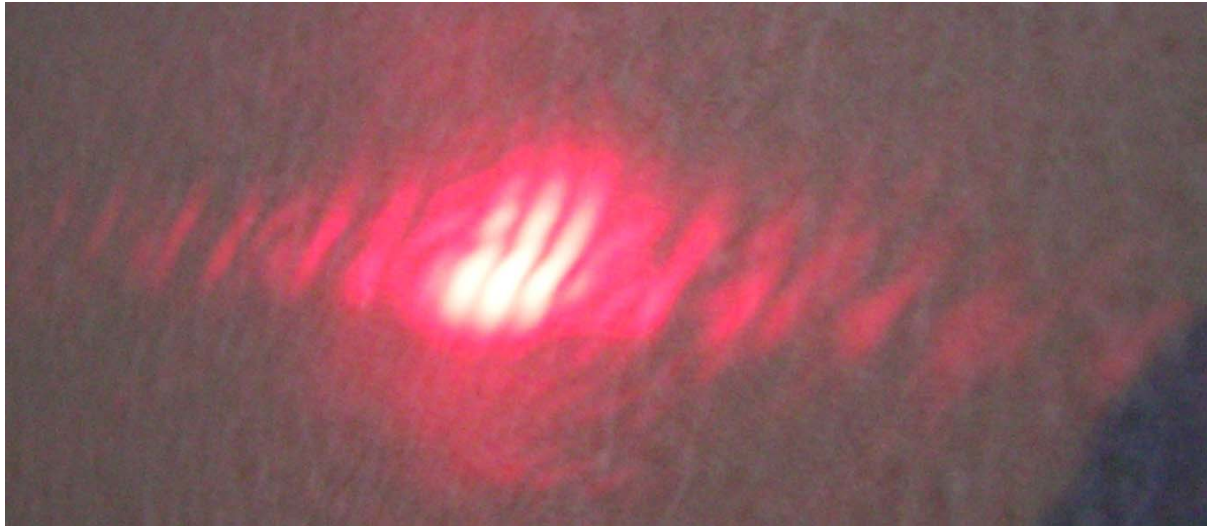
-  $D = 3\text{m}$ ;  $S_3 = 3 * 10^3 \text{mm} * 650 * 10^{-6} \text{mm} / 1 \text{mm} = 1,95 \text{mm}$ ,  
očitana vrijednost je  $S_{o\check{c}} = 2\text{mm}$ .

-  $D = 4\text{m}$ ;  $S_4 = 4 * 10^3 \text{mm} * 650 * 10^{-6} \text{mm} / 1 \text{mm} = 2,6 \text{mm}$ ,  
očitana vrijednost je  $S_{o\check{c}} = 2,7 \text{mm}$ .

-  $D = 6\text{m}$ ;  $S_6 = 6 * 10^3 \text{mm} * 650 * 10^{-6} \text{mm} / 1 \text{mm} = 3,9 \text{mm}$ ,  
očitana vrijednost je  $S_{o\check{c}} = 4,1 \text{mm}$ .

Razlike očitane vrijednosti i vrijednosti dobivene putem formule nastaju zbog:

- nemogućnosti vrlo preciznog očitavanja,
- nepoznavanja točne valne duljine laserske svjetlosti ( $630 \text{ nm} - 680 \text{ nm}$ ),
- nedovoljno točnog pozicioniranja udaljenosti pukotina od zastora,



Slika 5.5: Dobivene pruge interferencije



Slika 5.6: Dobivene pruge interferencije

## **6. ZAKLJUČAK**

U sklopu rada proveden je Youngov pokus. Kao izvor svjetlosti korišten je He-Ne laser, zbog svojstava laserske svjetlosti, monokromatičnosti, usmjerenosti i koherencije. Pukotine na koje je laserska zraka nailazila udaljene su 1 mm i predstavljale su dva koherentna izvora svjetlosti. Promjenom udaljenosti pukotina od zastora ( $D$ ), pokazano je kako se pruge interferencije sužavaju odnosno povećavaju. Postupak primjene udaljenosti između pruga interferentne slike koristi se kod mjernih uređaja za precizno mjerenje vrlo malih pomaka i duljina.

## **7. LITERATURA**

1. M. Paić: Osnove fizike, IV DIO, Zagreb, 1983.
2. [http://astro.fdst.hr/Optika teleskopi/O\\_prirodi\\_svietlosti.php](http://astro.fdst.hr/Optika%20teleskopi/O_prirodi_svietlosti.php)
3. <http://student.fizika.org/>
4. <http://www.hfd.hr/ljskola/99/skenderovic/skenderovic.html>
5. <http://hr.wikipedia.org/wiki/Laser>
6. <http://www.rc.fer.hr/nastava/oes/interferencija.html>
7. V.Paar: Fizika 3, Školska knjiga, Zagreb. 2000.
8. <http://dominis.phy.hr/~kvurnek/URUN/U2004/INTERAK/interakt.html>
9. <http://sirius.phy.hr/~dpaar/SAMP/seminari/linos/Seminar2b.html>
10. <http://magister2.org>
11. <http://zlatarna.com/kamenje/disperzija.htm>