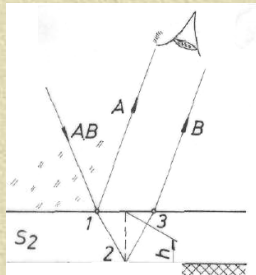


## 6. INTERFERENTNA MERNA TEHNIKA

### 6.1. MERNE METODE

Merenje dužina pomoću interferencije svetlosti predstavlja najtačniju dosad poznatu metodu merenja. Merenje se vrši pomoću talasne dužine svetlosti, koja je za određenu vrstu svetlosti, pritisak, temperaturu i vlažnost uvek ista. Svetlosni zrak jedne određene svetlosti ima, osim konstantne talasne dužine, i nepromenjenu amplitudu i nazivamo je intenzitetom svetla. Za dnevnu svetlost ili normalno osvetljenje,  $\lambda/2$  iznosi  $0,3 \mu\text{m}$ .

### 6.1. MERNE METODE

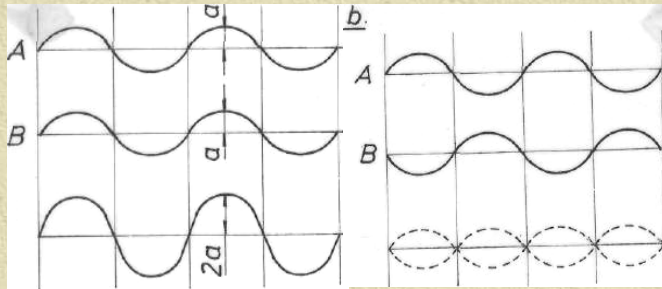


Posmatračemo dva svetlosna zraka (A) i (B) (slika), iste monohromatske svetlosti, koja prolaze kroz stakleni sloj ( $S_1$ ). Zrak (A) prolazi kroz stakleni sloj, pada u tačku (1), odbija se i dolazi do oka posmatrača. Zrak (B) izlazi iz sredine ( $S_1$ ) (tačka 1), prelama se u vazdušnom sloju ( $S_2$ ), odbija od donje površine ravnog ogledala (tačka 2), pada u tačku (3), a odatle takodje dospeva u posmatračevo oko, koje deluje kao sočivo.

Vidimo odmah da zrak (B) ima duži put od zraka (A). Odnosno zrak (B) ima duži optički put, koji je ravan proizvodu iz geometrijskog puta i indeksa prelamanja za tu sredinu. Usled razlike u veličini optičkog puta dva posmatrana zraka koja dospevaju u oko, nastaje fazna razlika između zraka (A) i (B), što izaziva interferenciju (sлагanje) svetlosti.

## 6.1. MERNE METODE

Prilikom interferencije svetlosnih zraka imamo dva granična slučaja: potiranje i superpoziciju talasa, zavisno od debljine vazdušnog sloja  $h$ . Na slici je prikazana interferencija talasa dva zraka koherentne svetlosti, jednakih amplituda i talasnih dužina, ali pomereni za višestruku parnu vrednost  $\lambda/2$ . Rezultujući talas biće dvostruke veličine amplitude  $2A$ . U oku posmatrača stvoriće se, tada, utisak pojačane svetlosti.

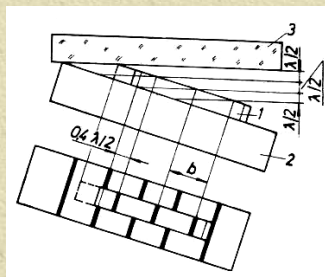


Potiranje talasa nastaje u slučaju kada je jedan zrak u odnosu na drugi pomeren za višestruku neparnu vrednost  $\lambda/2$ , pa će se u oku stvoriti utisak tame (slika b).

## 6.1. MERNE METODE

Za slučaj da je  $h \neq \text{const}$ , odnosno da je vazdušni sloj u obliku klina, imaćemo interferentne svetle i tamne pruge. Korišćenjem monohromatske svetlosti dobiće se jasne crne i bele pruge, a u slučaju da se koristi dnevna svetlost, pruge će biti u vidu spektralnih boja.

S obzirom da pri nejednakoj debijini vazdušnog sloja imamo različitu veličinu zazora u svakoj tački, to će na svim mestima gde je rastojanje jednako neparnom broju polutalasa biti tamne pruge. Svaka tamna pruga povezuje sve tačke na mernoj površini, koje se nalaze na istom odstojanju  $h$  od staklene ploče. Interferentne pruge, znači, možemo uporediti sa linijama na topografskim kartama, gde svaka linija povezuje tačke površine, koje se nalaze na istoj nadmorskoj visini.



## 6.1. MERNE METODE

Kada snop zraka presečemo kosom ravni, dobićemo paralelne pruge kao paralelne H-nije na razmaku od  $\lambda/2$  jedna od druge. Ako imamo propuštanje bele svetlosti, onda se rastojanje od jedne do druge pruge meri od sredine pruge iste boje (sl.6.3).

Širina interferentnih traka zavisi, međutim, od veličine ugla vazdušnog klina i od talasne dužine primenjene svetlosti i njihov međusobni odnos je dat izrazom:

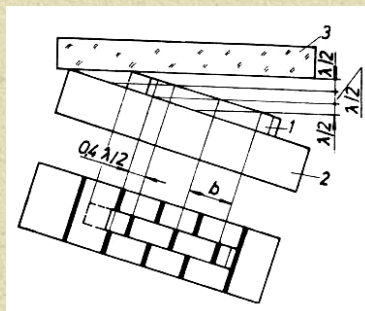
$$b = \frac{\lambda}{2\alpha}$$

gde je:

- b - širina trake,
- $\lambda$  - talasna dužina klina
- $\alpha$  - ugao klina

## 6.1. MERNE METODE

Merenje dužine pomoću interferencije svetlosti može se vršiti kao apsolutno merenje ili kao uporedno. Ako želimo da izvršimo apsolutno merenje, postavimo na jednu ravnu naslonu površinu (kvarcna ploča 2) (slika) graničnu merku (1), a preko njih planparalelnu staklenu ploču (3), s tim da sto bude malo zakošen u odnosu na staklenu ploču, kako bi se stvorio vazdušni klin. Propustićemo, tada, snop svetla, paralelan sa planparalelnom pločom, tako da će doći do presecanja tamnih interferentnih površina sa merkom i stolom, pa ćemo u vidnom polju okulara videti tamne pruge na merci, koje su u odnosu na pruge stola pomaknute za određeni deo vrednosti  $\lambda/2$ .



## 6.1. MERNE METODE

S obzirom da je nemoguće prebrojati celokupan broj polovina talasnih dužina, koje su sadržane u dužini jedne merke, jer je vrlo veliki, to će se izmeriti veličina pomeranja pruge merke u odnosu na prugu na stolu.

Samo merenje se vrši na taj način, što se merka prethodno izmeri (sa tačnošću od približno  $3\mu\text{m}$ ) i iz tabele izvadi tačan broj  $A/2$  za određenu dužinu, a zatim se određuje veličina međusobnog pomeranja pruga merke i stola.

$$l = x_i \frac{\lambda_i}{2} + n_i \frac{\lambda_i}{2}$$

gde je:

$x_i$  - ceo broj pruga za određenu boju,

$n_i$  - razlomak, deo talasne dužine

$\lambda_i$  - talasna dužina određene boje

## 6.2. MERENJE PRIMENOM PLAN-PARALELNIH PLOČICA

Metodom interferencije svetlosti vrši se provera uravnjenosti malih, preciznih površina merki i mernih instrumenata: graničnih merila, pipaka mikrometara, stola mernih uređaja i drugo.

Plan-paralelne pločice izrađuju se od optičkog stakla velike tačnosti (slika).



One se naslanjaju na ispitivanu površinu i osvetle dnevnom ili monohromatskom svetlošću. Ukoliko naslanjanje na površinu zbog neuravnjenosti nije potpuno, stvoriće se vazdušni klin, koji omogućuje pojavu interferentnih pruga. Prema obliku i broju ovih pruga, može se doneti sud o uravnjenosti kontrolisane površine. Dozvoljeno odstupanje uravnjenosti planparalelnih stakala iznosi  $0.1\mu\text{m}$ . Firma Zeiss ih izrađuje u 4 veličine.

Američka firma Do All izrađuje planparalelne ploče prečnika 10" i 20" za kontrolu uravnjenosti većnih površina.

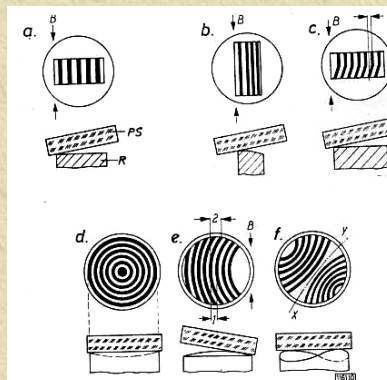
## 6.2. MERENJE PRIMENOM PLAN-PARALELNIH PLOČICA

Na slici prikazan je izgled, odnosno oblik i raspored interferentnih pruga, za različite slučajeve neuravnjenosti ispitivane površine.

Planparalelno staklo (PS) nagnuto je prema radnom predmetu (R). Posmatranje se vrši upravno odozdo ili koso. Za slučaj da je posmatrana površina ravna, videće se slika pravih interferentnih pruga, na jednakom međusobnom rastojanju (slika).

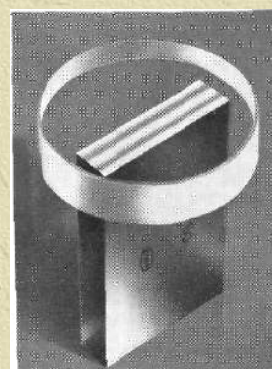
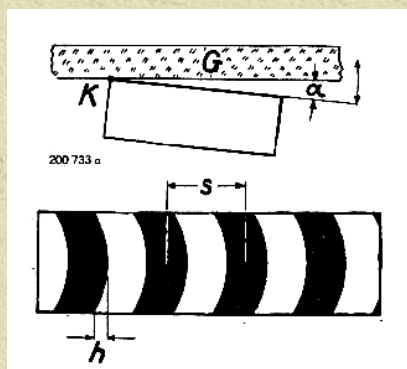
Delimično ravna, a delimično zaobljena površina daće sliku pravih pruga, sa neravnomernim međusobnim rastojanjem (slika b).

Ako merni predmet ima bočno zakošenje, stvoriće se kose pruge (slika c). Sferne površine, konveksne, konkavne i kombinovane daće kružni tok pruga, odnosno nastaju koncentrični krugovi ili delovi takvih krugova (slike d,e,f).



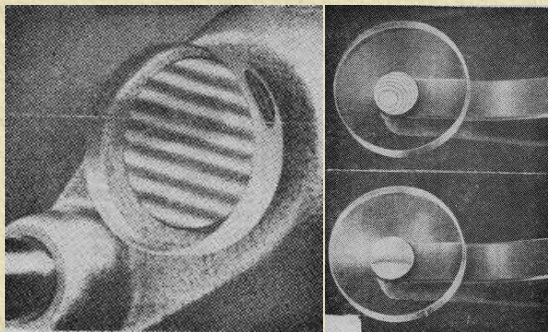
## 6.2. MERENJE PRIMENOM PLAN-PARALELNIH PLOČICA

Odstojanju pruga  $S$  tj. odstojanju sredine dveju susjednih, istobojnih interferentnih pruga, odgovara visinska razlika nivojskih površina na površini mernog predmeta, koja je ravna  $\lambda/2$ . Neuravnjenost se, tada, dobija sabiranjem interferentnih pruga i množenjem toga zbira sa polovinom talasne dužine svetlosti sa kojom vršimo merenje. Visinska razlika na mernoj površini, prema tome, iznosi  $(p + k) \cdot \lambda/2$ , a neuravnjenost  $\pm(p + k) \lambda/4$ , pri čemu je  $p$  - broj celih odstojanja pruga, a  $k$  - ostatak procenjenog dela širine pruge (slika)



## 6.2. MERENJE PRIMENOM PLAN-PARALELNIH PLOČICA

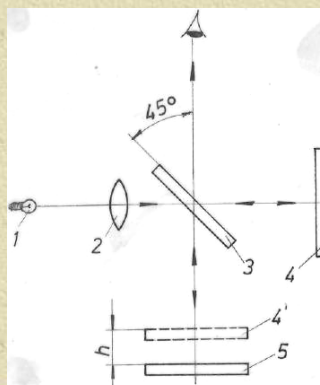
Na levoj slici dat je primer jednog postolja mernog uređaja. Desna slika prikazuje kontrolu uravnjenosti mernog pipka micrometra, gde prva slika predstavlja dobru mernu površinu, sa jednom interferentnom prugom. Pri dnevnom svetlu ( $\lambda/2$  0,3  $\mu\text{m}$ ) neuravnjenost, iznosi  $\pm 0,15 \mu\text{m}$ . (Monohromatska svetlost emitovana iz talijum lampe ima talasnu dužinu  $\sim 0,27 \mu\text{m}$ ) Druga slika daje izgled i broj pruga pri kontroli jedne neupotrebljive merne površine. Imamo šest interferentnih, kružno savijenih pruga, sa pet međusobnih odstojanja, pa je visinska razlika:  $5\lambda/2 = 1,5 \mu\text{m}$ , odnosno neuravnjenost  $\pm 0,75 \mu\text{m}$ , što prevazilazi dozvoljenu grešku (prema DIN 863).



## 6.3. INTERFEROMETRI

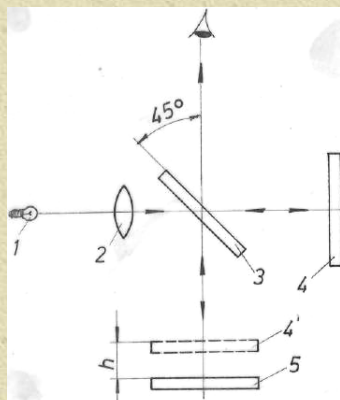
Interferometri za merenje dužina koriste optičku šemu Michelson-a, koji je prvi primenio interferenciju svetlosti za merenje dužina. Prosta šema Michelson-ovog interferometra data je na slici.

Svetlosni zraci iz sijalice (1) prolaze kroz sočivo (2) i padaju na poluprovodnu ploču (3), koja je presvučena vrlo tankim slojem srebra i nagnuta pod uglom od  $45^\circ$ . Jedan deo zraka prolazi kroz sočivo, pada na ogledalo (4), vraća se do ploče (3), odbija se od njene donje strane i dospeva u oko.



### 6.3. INTERFEROMETRI

Drugi deo zraka se odbija od ploče (3) i pada na ogledalo (5), vraća, prolazi kroz poluprovodnu ploču i, takodje, dolazi do oka posmatrača. Pošto su rastojanja od ploče (3) do ogledala (5) odnosno (4) različita, to je optički put, koji prelaze ove dve grupe zraka različit, pa nastaje interferencija. Isto dejstvo bismo imali i kad bi se zraci odbijali od ogledala (5) i zamišljene ploče (4'), postavljene na udaljenju  $h$ , koje predstavlja debljinu vazdušnog sloja između dveju paralelnih ploča. Naginjanjem jedne ploče dobijamo vazdušni klin.

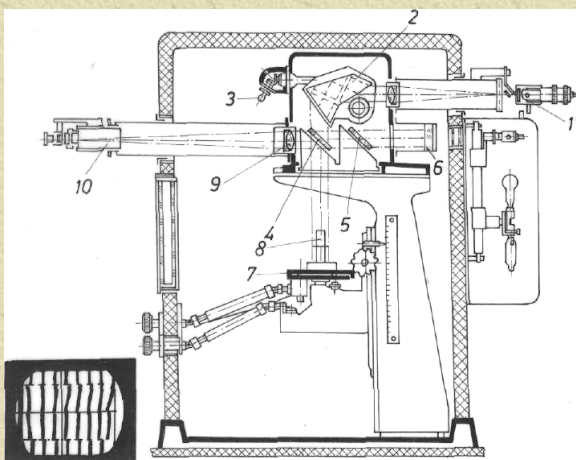


Ako postavimo, sada, sto sa radnim predmetom umesto ogledala (4), sa čije se površine, kao sa ogledala, odbijaju svetlosni zraci, moći ćemo, tada, vršiti apsolutna ili uporedna merenja.

### 6.3. INTERFEROMETRI

Firma Zeiss proizvodi interferentni komparator, konstrukcije Koster-a (sl. 6.12). Svetlost helijuma ili kriptona iz Gajslorove cevi (1) pada na prizmu (2), čije zakretanje pomoću vijka (3) omogućuje korišćenje željene boje. Jedan deo zraka po izlazu iz prizme pada na ogledalo (4), odbija se od njega i prolazi kroz ploču (5), pa se odbija od ogledala (6) i dospeva u oko.

Drugi deo zraka prolazi kroz poluprovodno ogledalo (4) i pada na sto (7) sa merkom (8), vraća se i odbija od donje strane poluprovodne ploče, prolazi kroz sočivo (9) i kroz okular (10) dospeva u oko, zajedno sa prvom grupom zraka.



### 6.3. INTERFEROMETRI

Pri malom naginjanju stola dobićemo interferentne pruge, koje će se pojaviti na kvarcnoj ploči i mernom predmetu, međusobno pomerene, jedne u odnosu na druge. Iz veličine ovog pomeranja, kao što smo videli (stvarne veličine  $n_s$ ) i iz poznatih teorijskih vrednosti dužina, dobićemo stvarnu meru merke.

Tačnost kod apsolutnog merenja iznosi:

$$\pm \left( 0.02 + \frac{L_{mm}}{1500} \right) \mu m$$

Kod uporedne metode merenja, merka se kontroliše upoređivanjem sa poznatom veličinom merke. Tačnost merenja iznosi:

$$\pm \left( 0.05 + \frac{L_{mm}}{1000} \right) \mu m$$

### 6.4. LASERSKI INTERFEROMETRI

Noviji uređaji koji su dobili svoje mesto u proizvodnoj metrologiji, posebno za merenje dužina su laserski interferometri, koji predstavljaju optičkoelektronske instrumente visoke preciznosti. Njihov digitaini izlaz merene veličine omogućuje neposredno povezivanje sa CNC-mašinama (numerički upravljanim).

Laseri imaju mogućnost merenja od nekoliko mikrometara do vrlo velikih daljina. LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation (Pojačavanje svetla pomoću indukcionog zračenja). U prvu grupu spadaju laseri za merenje dužina do 50 m, u drugu teletetri sa modularnim zracima od 100 do  $5 \cdot 10^4$  m i optičke radare za daljine preko  $10^4$  m.

Pojava lasera uvela je nov svetlosni izvor, koji ima mnoge prednosti u odnosu na izvore koje su koristili klasični interferometri. Laser emituje snop fotona (uzani snop svetla) koji je: monohromatičan, linearno polarizovan, koherentan (neprekidan u prostoru i vremenu), i visokog intenziteta emisije, pa su zraci skoro na neograničenom rastojanju paralelni.



## 6.4. LASERSKI INTERFEROMETRI

Posebna prednost uređaja sa laserskom svetlošću je ta što su interferentne pruge zbog paralelnosti zraka vrlo jasne, bez rasipanja.

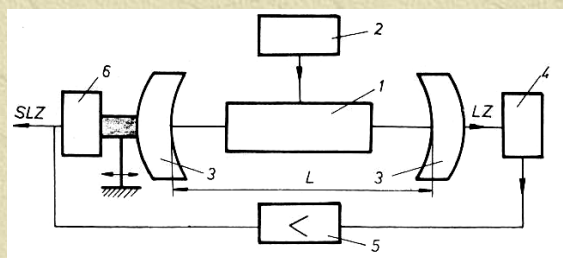
Osnovni elementi lasera su: aktivna materija, rezonator, eksitacioni sistem, a pomoćni su: izvor napajanja, sigurnosni i sistem za hladjenje, optička i dijagnostika.

Za aktivne materije koriste se: čvrsti, tečni i gasoviti materijali. Čvrste materije su kristalne strukture (sintetički rubin i slično) ili amorfne (staklo, plastika).

Gas kao aktivna materija može biti: (i) He-Ne (atomske gasni laseri); (ii) Ar, Kr, He (jonski laseri) i (iii) CO<sub>2</sub>-N<sub>2</sub>-He i slično (molekularni gasni laseri).

## 6.4. LASERSKI INTERFEROMETRI

Gasni laser prikazan je na slici. Sadrži aktivno telo (1), eksitacioni sistem (2), rezonator - sklop nepokretnog i pokretnog ogledala (3), fotodetektor (4), pojačivač (5) i piezokristal (6).



Eksitacioni sistem služi za pobudjivanje atoma aktivne materije (čvrste, kao što je rubin, tada pobudjuje atome hroma) i jonizacije gasa. Jonizacijom gasa pobudjuju se atomi i dovode na viši energetske nivo, pa je razlika energetskih nivoa ravna:

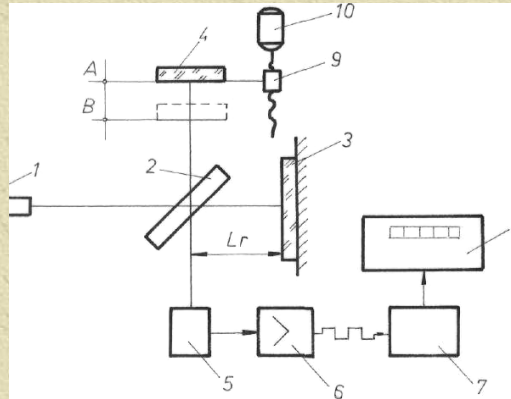
$$E = h f$$

h-plankova konstanta, f-frekvencija

## 6.4. LASERSKI INTERFEROMETRI

Interferometar sa laserskim izvorom svetla (slika) sastoji se iz jednofrekventnog lasera (1), interferometra u čiji sastav ulaze poluprovodna ploča (2), nepokretno ogledalo (3) i pokretno (4).

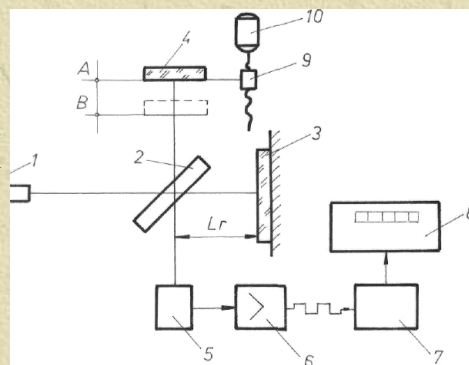
Nepokretno ogledalo postavljeno je na referentnu dužinu  $L_r$ , dok se površina pokretnog ogledala na početku merenja postavlja u tačku (A), a na kraju u (B) dejstvom pokretača (10) na mikrometerski zavrtanj (9).



## 6.4. LASERSKI INTERFEROMETRI

Laserski zraci (LZ) se dele kod nagnute poluprovodne ploče (2) tako da se jedan snop odbija od njegove gornje površine i dospeva do ogledala (4) i vraća, a drugi deo zraka prolazi kroz ploču, stiže do (3) i vraća se, prelazeći pri tome različiti optički put od prvobitnog snopa, što izaziva interferenciju svetlosti. Interferentna slika projektuje se, tada, na osetljivu površinu fotodetektora (5). Pomeranjem ogledala (4) za talasnu dužinu svetla, osvetljenost površine fotodetektora prolazi dvaput kroz svoj minimum, odnosno maksimum.

U fotodetektoru se ovaj optički signal pretvara u električni, koji se zatim pojačava u pojačivaču (6), zatim sabira i obradjuje u brojaču (7) i prikazuje na digitalnom pokazivaču (8).

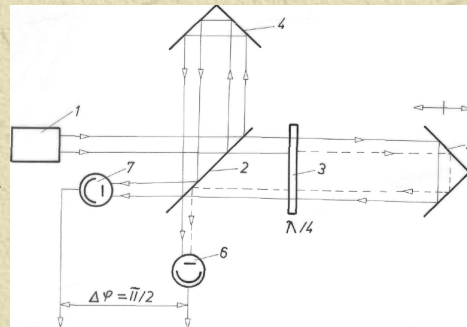


## 6.4. LASERSKI INTERFEROMETRI

Umesto ravnih, odnosno sfernih ogledala reflektora, koriste se kod novijih konstrukcija prostorne prizme (slika).

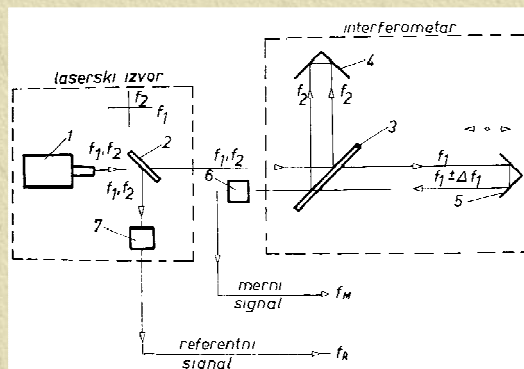
Laserski izvor svetlosti (1) daje jednofrekventnu i monohromatsku svetlost, koja se polovi kod pločice (2). Trostruka prizma (4) je nepokretna, a (5) pokretna. Dodatna pločica je pri tome postavljena na optički put zraka od pomičnog ogledala tako, da se menja faza polovine zraka za  $\lambda/2$ . Uz korišćenje dodatnog fotodetektora (7) (pored uobičajenog) (6) razlaže se praktično uređaj na dva

interferometra, koja su fazno pomerena za  $\lambda/2$ . Između izlaznih signala iz fotodetektora (6) i (7) nastaje tada fazni pomeraj za  $\lambda/2$ . Električni signali iz (6) i (7) dospevaju u reverzibilni brojač, a fazna razlika omogućuje da brojač dobije informaciju o smeru kretanja.



## 6.4. LASERSKI INTERFEROMETRI

Osim ovih, konvencionalnih interferometara, postoje i dvofrekventni interferometri (sl. 6.16) koji dele dvofrekventni laserski snop zraka iz izvora (1), dejstvom ploče (2) na dva snopa, frekvencije  $f_1$  i  $f_2$ . Jedan deo zraka usmerava se ka fotodetektoru (7) i iz njega izlazi kao referentni signal, frekvencije  $f_R = f_1 - f_2$ . Drugi deo zraka dolazi do frekventne deobene ploče (3) koja usmerava zrake frekvencije  $f_1$  ka pokretnoj, a  $f_2$  ka nepokretnoj prizmi. Odbijeni zraci od prizmi se susište kod deobene ploče, optički mešaju i usmeravaju ka fotodetektoru (6).



## 6.4. LASERSKI INTERFEROMETRI

To je merni signal čija je frekvencija:

$$f_M = f_1 - f_2 \pm \Delta f_1 = f_R \pm \Delta f_1.$$

Pri tome je:

$$\Delta f_1 = \pm 2 f_1 V / c$$

gde je:

V- brzina pomeranja pokretne prizme

c- brzina svetlosti.