

Glava 1

Teorije svetlosti i geometrijska optika

1.1 Priroda svetlosti

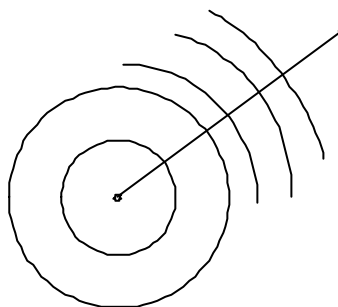
Prema modernim saznanjima svetlost je deo elektromagnetnog spektra. Klasično tumačenje svetlosti definiše svetlost kao zračenje koje je vidljivo za ljudsko oko. Moderna optika pored vidljive svetlosti bavi se i susednim oblastima koje se nazivaju ultravioletna oblast i infracrvena oblast.

Opticko zračenje je deo elektromagnetnog spektra i prostire se od 10 nm do 1 mm:

- ultravioletno (UV) zračenje (od 10 nm do 390 nm) koje je nevidljivo zračenje za golo ljudsko oko,
- vidljivo zračenje (od 390 nm do 770 nm) koje je jedini deo elektromagnetnog spektra na koji je ljudsko oko osetljivo i koje mi vidimo,
- infracrveno (IC) zračenje (od 770 nm do 1 mm) koje je nevidljivo zračenje za golo ljudsko oko.

1.2 Definicija zraka svetlosti i indeksa prelamanja

Ako se posmatraju svetlosni talasi koji se zrače iz tackastog izvora u vakumu, kao što je pokazano na slici 1.1, jasno je da je svaki talasni front sfernog oblika sa radijusom krivine koji raste kako se talasni front udaljava od tackastog izvora zračenja. Na dovoljnom rastojanju od tackastog izvora zračenja radijus krivine talasnog fronta može se smatrati beskonacnim i takav talasni front se naziva ravnim talasom.



Slika 1.1. Prostiranje svetlosnih talasa i zraka

Ako se prati putanja hipoteticke tacke na površini talasnog fronta za vreme njegovog prostiranja može se uociti da tacka putuje po pravoj liniji. Sa slike 1.1 može se videti da putanja hipoteticke tacke predstavlja normalu na ravan talasni front. Ta putanja

hipotetičke tačke se zove zrak svetlosti. Svetlosni zrak je korisna ideja koja ima veliku primenu prilikom projektovanja i analize optičkih sistema.

Talasna dužina zracenja je rastojanje između dve najbliže tačke talasa koje se nalaze u istom stanju oscilovanja (istoj fazi). Brzina prostiranja svetlosnih talasa u vakumu ne zavisi od talasne dužine svetlosti i približno je jednaka $2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$. U gasovima, tečnostima i čvrstim telima brzina svetlosti je manja od brzine svetlosti u vakumu i zavisi od talasne dužine. Odnos brzine svetlosti u vakumu prema brzini svetlosti u posmatranoj sredini naziva se apsolutni indeks prelamanja i definiše se jednačinom

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1.1)$$

gde su:

n – indeks prelamanja,

c – brzina svetlosti u vakumu,

v – brzina svetlosti u posmatranoj sredini.

Kako je brzina prostiranja svetlosti u posmatranoj sredini jednaka proizvodu talasne dužine λ i frekvencije ν ($v = \lambda \cdot \nu$) to se jednačina (1.1) može napisati u obliku

$$n = \frac{c}{\lambda \cdot \nu}. \quad (1.2)$$

Pošto je frekvencija monohromatske svetlosti konstantna apsolutni indeks prelamanja obrnuto je proporcionalan talasnoj dužini svetlosti.

U praktičnoj optici ne meri se apsolutni indeks prelamanja, već se indeks prelamanja date sredine određuje prema vazduhu. Indeks prelamanja vazduha iznosi približno 1.0003. Za sve praktične proračune može se usvojiti da je indeks prelamanja u vazduhu jednak indeksu prelamanja u vakumu.

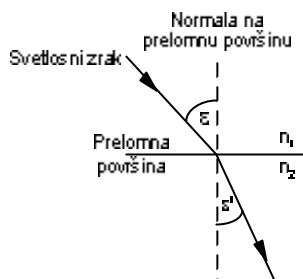
1.3 Osnovni zakoni geometrijske optike

Geometrijska optika je samo aproksimacija stvarnosti, budući da se bez difrakcionih pojava ne događa ni jedan slučaj prostiranja svetlosti. Geometrijska optika se bazira na zakonima čija je važnost utoliko veća ukoliko je talasna dužina posmatrane svetlosti kraca. U geometrijskoj optici, polazi se od nekoliko aksioma koji se ne dokazuju, već se na osnovu njih izvodi celokupna teorija. Osnovne aksiome geometrijske optike moguće je dokazati koristeći se elektromagnetnom teorijom svetlosti. Geometrijska optika pretpostavlja da se sve optičke pojave dešavaju u homogenim i izotropnim sredinama, odnosno u sredinama gde optičke osobine ne zavise niti od položaja svetle tačke niti od orijentacije zraka. Osnovni aksiomi geometrijske optike su:

- svetlost se prostire pravolinijski, sledeći svetlosne zrake nezavisne jedne od drugih,
- svetlost može da sledi istu trajektoriju, neodređen broj puta u oba smera,
- na granici razdvajanja dve homogene i izotropne sredine, svetlosni zraci podležu prelamanju (refrakciji) ili odbijanju (refleksiji) prema Snell – Descartesovom zakonu.

1.3.1 Snell – Descartesov zakon

Snell – Descartesov zakon definiše pojave prelamanja svetlosti na granicnoj površini i odbijanja svetlosti od granicne površine. Snop svetlosti, koji pada pod uglom ϵ na ravnu granicnu površinu koja deli dve opticke sredine, posle prelamanja zaklapa ugao ϵ' sa normalom na prelomnu površinu, kao što je prikazano na slici 1.2. Indeks prelamanja prve opticke sredine je n_1 , a druge opticke sredine je n_2 .



Slika 1.2. Definicija Snell – Descartesovog zakona

Snell – Descartesov zakon glasi

$$n_1 \cdot \sin \epsilon = n_2 \cdot \sin \epsilon'. \quad (1.3)$$

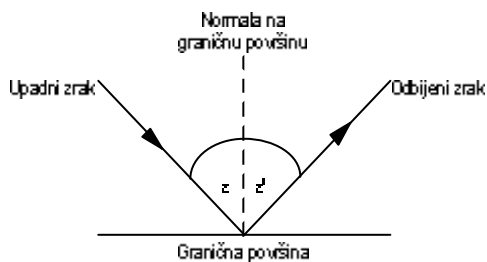
Jednacina (1.3) predstavlja matematičku formulaciju Snell – Descartesovog zakona i osnovnu jednacinu pomocu koje se proračunava prolaz svetlosnih zraka kroz opticki sistem. Snell – Descartesov zakon se recima može formulisati na sledeca dva nacina:

- Proizvod indeksa prelamanja sredine i sinusa ugla, što ga formira svetlosni zrak sa normalom na granicnu površinu, je opticka invarijanta.
- U homogenoj optickoj sredini, gde ne postoji dvojno prelamanje svetlosti, upadni zrak, normala na granicnu površinu i prelomni zrak, leže u jednoj ravni.

Pojava odbijanja (refleksije) može se definisati kao poseban slucaj prelamanja, jer zrak posle odbijanja od granicne površine ostaje u istoj sredini, pa se je dnacina (1.3) uprošćava u oblik

$$\epsilon = -\epsilon'. \quad (1.4)$$

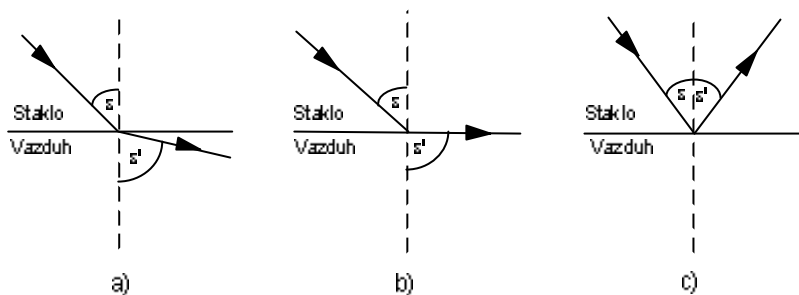
Graficki prikaz odbijanja zraka dat je na slici 1.3.



Slika 1.3. Odbijanje (refleksija) zraka

1.3.2 Potpuna unutrašnja refleksija

Neka zrak svetlosti dolazi iz stakla sa indeksom prelamanja $n = 1.5$ na granicnu površinu staklo vazduh kao što je prikazano na slici 1.5. Prelomni ugao se racuna po Snell – Descartesovom zakonu. Za upadni ugao $\varepsilon = 40^\circ$ prelomni ugao je oko $\varepsilon' = 75^\circ$ (slika 1.5,a). Kada upadni ugao poraste na $\varepsilon = 41.8^\circ$, tada $\sin \varepsilon'$ postaje jedinica i prelomni zrak se prostire duž granicne površine staklo – vazduh (slika 1.5,b). Za veće vrednosti upadnog ugla ε , geometrijska optika ne može da predvidi šta bi se događalo, jer $\sin \varepsilon'$ ne može da ima vrednosti veće od jedinice. Rešenje ovog problema daje elektromagnetna teorija svetlosti, koja pokazuje da se upadni zrak odbija od granicne površine staklo vazduh i vraća nazad u staklo (slika 1.5,c). Ovaj fenomen se naziva potpuna unutrašnja refleksija, a upadni ugao ε za koji je $n \cdot \sin \varepsilon' = 1$, kritični ugao. Refleksija je potpuna u smislu da kompletan upadni snop svetlosnih zraka se odbija nazad u staklo. Kod klasičnih ogledalskih površina, napravljenih od srebra ili aluminijuma, odbija se 90% do 95% upadnih zraka, a ostatak se apsorbira u metalu i izraci kao toplota.



Slika 1.5. Potpuna unutrašnja refleksija

Potpuna unutrašnja refleksija se veoma često koristi kod prizmi da bi se obezbedilo potrebno odbijanje zraka.

Glava 2

Idealni opticki sistem

2.1 Pojam idealnog optickog sistema

Idealni opticki sistem formira stigmatican lik predmeta. To znaci da svakoj tacki predmeta odgovara samo jedna tacka lika. Kod idealnih optickih sistema, geometrijski oblik lika je slican geometrijskom obliku predmeta, jer ne postoji izoblicenje.

Stvarni opticki sistemi ne mogu da formiraju stigmatican lik predmeta. Ipak, ideja idealnog optickog sistema se koristi radi projektovanja optickih sistema, cija su odstupanja od idealnog u dozvoljenim granicama. Za kriterijum na osnovu koga se određuje dozvoljeno odstupanje realnog optickog sistema od idealnog, koriste se karakteristike prijelnika, koji se nalazi iza optickog sistema. U praksi je važno, da prijelnik ne registruje odstupanje realnog od idealnog lika.

Teorija idealnog optickog sistema zasniva se na sledecim postavkama:

- Svaka tacka u prostoru predmeta ima samo jednu odgovarajucu tacku u prostoru lika. Ove dve tacke se nazivaju spregnutim (konjugovanim) tackama.
- Svaka prava linija u prostoru predmeta ima samo jednu odgovarajucu liniju u prostoru lika. Ove linije se nazivaju spregnutim (konjugovanim) linijama.
- Ako tacka u prostoru predmeta leži na pravoj, to i njoj spregnuta tacka u prostoru lika ležace na pravoj, koja je spregnuta s pravom u prostoru predmeta.
- Svakoj ravni u prostoru predmeta odgovara samo jedna ravan u prostoru lika. Ove dve ravni se nazivaju spregnutim (konjugovanim) ravnima.

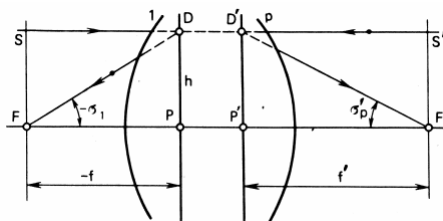
Preko ovih pretpostavki uspostavljena je geometrijska veza izmedju prostora predmeta i prostora lika.

2.2 Glavne (kardinalne) tacke

Poseban znacaj u teoriji idealnog optickog sistema imaju glavne (kardinalne) tacke optickog sistema. Kardinalne tacke se sastoje iz dva para tacaka, koje se nalaze na optickoj osi svakog centriranog optickog sistema i to su par glavnih tacaka, par žižnih tacaka. Ove tacke znatno pojednostavljaju određivanje položaja i velicine lika.

Koordinatni sistem u kojem se određuje položaj tacaka predmeta i odgovarajucih likova, postavlja se u par spregnutih ravni, normalnih na opticku osu sistema. U ovim ravnima, odnos velicine lika i predmeta je jednak jedinici (jedinicno uvecanje). Položaj ovih, glavnih ravni, zavisi od konstrukcionih elemenata optickog sistema. U najvećem broju prakticnih optickih sistema glavne ravni su virtualne, jer se nalaze unutar optickog sistema. Glavna ravan koja se nalazi u prostoru predmeta, naziva se prednja, ili prva glavna ravan. Glavna ravan koja se nalazi u prostoru lika, naziva se zadnja, ili druga

glavna ravan. Tacke preseka glavnih ravni sa optickom osom P i P' nazivaju se glavne tacke, kao što je prikazano na slici 2.1.



Slika 2.1. Žiže i glavne tacke u optickom sistemu

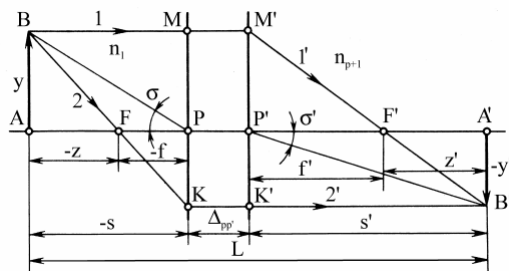
Ako bilo koji zrak, ili njegov produžetak, pri ulazu u opticki sistem sece glavnu ravan u tacki D, na visini h od opticke ose sistema, posle izlaska, on ili njegov produžetak seci ce glavnu ravan u tacki D', na istoj visini h od opticke ose sistema. Ova važna osobina glavnih ravni ima veliki znacaj za određivanje putanje zraka kroz opticki sistem.

Od mnoštva tacaka u oblasti prostora predmeta posmatraju se beskonacno udaljene tacke. Svaka svetla tacka, koja se nalazi u beskonacnosti, emituje paralelan snop zraka svetlosti. Ovaj snop zraka ulazi u osno simetricni opticki sistem, koji ako je idealan, skuplja snop u jednu tacku na optickoj osi. Ova tacka se naziva druga, ili zadnja žižna tacka i obeležava se sa F'. Žižna tacka je opticki spregnuta sa beskonacno udaljenom tackom. Ravan koja prolazi kroz zadnju žižnu tacku i koja je normalna na opticku osu, naziva se zadnja žižna ravan. Rastojanje duž opticke ose od zadnje glavne tacke do zadnje žižne tacke, naziva se zadnja žižna dužina i obeležava se sa f' .

Idealni opticki sistem može se predstaviti kao beskonacno tanak opticki sistem. Tada se prva i druga glavna ravan poklapaju.

2.3 Osnovne relacije predmet – lik u geometrijskoj optici

U ovom delu, bice prikazane jednačine konjugacije, odnosno jednačine koje povezuju tacke predmeta i lika, kao što je pokazano na slici 2.2. Opticki sistem je predstavljen sa glavnim ravnima. Predmet je duž AB, dužine y , koja je normalna na opticku osu. Opticki sistem stvara lik tacke B u tacki B', koja nastaje kao presek dva zraka u prostoru lika, koji su spregnuti sa dva zraka, koji su krenuli iz tacke B u prostoru predmeta.



Slika 2.2. Osnovne relacije između predmeta i lika

Zrak 1, prostire se paralelno sa optickom osom do tacke M' na drugoj glavnoj ravni, gde menja pravac i postaje spregnuti zrak 1', koji prolazi kroz zadnju žižu F'. Zrak 2 polazi od tacke B u prostoru predmeta i prolazi kroz prednju žižu F. On menja svoj pravac

u tacki K, na prvoj glavnoj ravni i postaje spregnuti zrak 2', koji se prostire paralelno sa optickom osom. Zraci 1' i 2' seku se u tacki B', koja predstavlja lik tacke B.

Položaj spregnutih tacaka A i A', koje se nalaze na optickoj osi i spregnutih duži AB i AB', normalnih na opticku osu, definisan je jednačinama konjugacije i može se odrediti u odnosu na žiže F i F' koordinatama z i z' (Newtonov oblik), ili u odnosu na glavne ravni P i P', koordinatama s i s' (Gaussov oblik).

Za opticki sistem koji se nalazi u vazduhu Newtonov oblik jednačine konjugacije je

$$z \cdot z' = -f'^2, \quad (2.1)$$

Gaussov oblik jednačine konjugacije je

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f'}. \quad (2.2)$$

Još jedna veoma važna jednačina koja definiše relacije predmet – lik je jednačina tangensa Lagrange – Helmholtza

$$f \cdot y \cdot \tan \sigma = -f' \cdot y' \cdot \tan \sigma'. \quad (2.3)$$

Jednacija tangensa Lagrange – Helmholtza definiše uslov za formiranje lika u idealnom optickom sistemu: Proizvod velicine predmeta, žižne dužine i tangensa upadnog ugla treba da je jednak proizvodu velicine lika, žižne dužine i tangensa prelomnog ugla sa suprotnim predznakom.

2.4 Uvecanje optickog sistema

Poprečno uvecanje je odnos velicine lika y' i predmeta y , koji su postavljeni upravno na opticku osu

$$b = \frac{y'}{y}. \quad (2.4)$$

Ugaono uvecanje optickog sistema se definiše kao odnos tangensa uglova, koje formira zrak sa optickom osom, u prostoru lika i prostoru predmeta

$$\gamma = \frac{\tan \sigma'_p}{\tan \sigma_1}. \quad (2.5)$$

Uzdužno uvecanje optickog sistema je odnos beskonacno malog segmenta u prostoru lika i odgovarajućeg segmenta u prostoru predmeta. Segmenti su spregnuti i nalaze se duž opticke ose

$$a = \frac{dz'}{dz}. \quad (2.6)$$

Glava 3

Komponente optickih sistema

3.1 Opticki materijali

Opticki materijali su svi materijali koji propuštaju opticko zracenje (ultraljubicasto, vidljivo i infracrveno). Opticki materijali se mogu nalaziti u sva tri agregatna stanja: gasnom – vazduh ili neki drugi prirodni gasovi, cvrstom – stakla, kristalni materijali, filmovi, tanki slojevi i tecnom – razliciti tipovi ulja.

Opticke komponente se najcesce proizvode od bezbojnog ili obojenog stakla, kvarca ili plastike. Glavni element za proizvodnju optickih komponenti je opticko bezbojno staklo.

Opticko staklo je staklo, koje se tokom proizvodnje pazljivo kontroliše, ima tacno određen hemijski sastav i fizicke osobine kao što su:

- indeks prelamanja za više talasnih dužina u oblasti primene,
- disperzija,
- Abbeov broj,
- transmisija.

Opticko staklo se razlikuje od tehnickog stakla po stepenu jednorodnosti, hemijskom sastavu i fizickim osobinama. Ono je otporno na dejstvo vlage, ugljene kiseline, dobro održava svoj oblik i lako se obrađuje.

Po svom hemijskom sastavu staklo sadrži najviše silicijum dioksida SiO_2 . Ostala jedinjenja, koja ulaze u sastav pojedinih vrsta stakala su oksidi natrijuma, kalijuma, magnezijuma, aluminijuma, soli fosforne kiseline. U novim vrstama stakla cesto se nalaze i kiseline retkih metala (lantana, tantala, cezijuma).

Apsolutni indeks prelamanja definisan je kao odnos brzine svetlosti u vakumu, prema brzini svetlosti u posmatranoj sredini. Poznato je da indeks prelamanja zavisi od talasne dužine svetlosti, $n = f(\lambda)$. Postoji veci broj formula koje prikazuju zavisnost indeksa prelamanja od talasne dužine, od kojih ce ovde biti navedena samo Sellmeirova formula, koja se koristi u katalogu najveceg svetskog proizvodaca stakala firme Schott iz Nemacke

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{B_1 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3 \cdot \lambda^2}{\lambda^2 - C_3}, \quad (3.1)$$

gde su:

λ – talasna dužina u μm ,

B_i, C_i – koeficijenti, koji se određuju za svaki tip stakla posebno i nalaze se u Schottovom katalogu stakla.

Disperzija je proces kod koga se zruci svetlosti za razlicite talasne dužine savijaju pod razlicitim uglovima. Disperzija se proracunava kao razlika indeksa prelamanja za dve talasne dužine.

Abbeov broj je konstanta opticke sredine, koja opisuje odnos indeksa prelamanja prema disperziji. Visoka vrednost Abbeovog broja oznacava ravnomernije prelamanje na svim talasnim dužinama. Abbeov broj se definiše kao

$$V = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}, \quad (3.2)$$

gde su:

v – Abbeov broj,

n_d – indeks prelamanja za Fraunhoferovu d liniju spektra,

n_F – indeks prelamanja za Fraunhoferovu F liniju spektra,

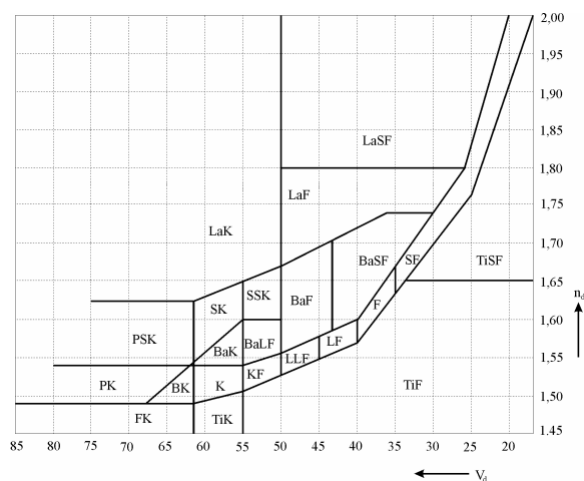
n_C – indeks prelamanja za Fraunhoferovu C liniju spektra.

Sva stakla se mogu podeliti na dve velike grupe stakala:

- Crown stakla sa indeksima prelamanja od 1.43 do 1.75 i Abbeovim brojem od 49.6 do 91. Osnovne karakteristike crown stakala su manje vrednosti indeksa prelamanja i više vrednosti Abbeovog broja.
- Flint stakla sa indeksom prelamanja od 1.53 do 1.96 i Abbeovim brojem od 20 do 49.6. Osnovne karakteristike flint stakla su veće vrednosti indeksa prelamanja i manje vrednosti Abbeovog broja.

U Schottovom katalogu stakala, sva crown stakla se lako poznaju, jer u svom imenu sadrže slova K, a sva flint stakla u svom imenu sadrže slovo F.

Na slici 3.1 prikazan je dijagram stakala iz Schottovog kataloga stakala. Na apscisi je nanet Abbeov broj, a na ordinati indeks prelamanja stakla. Na dijagramu su oznacene samo glavne grupe stakala, a ne i pojedinačna stakla, kojih u Schottovom katalogu ima oko 260.



Slika 3.1 . Dijagram stakala iz Schottovog kataloga stakala

Transmisija u optici označava provođenje energije zračenja kroz opticku sredinu. Transmisija se često definiše kao procenat energije koja prolazi kroz optički element, ili sistem, relativno u odnosu na ukupnu ulaznu energiju.

3.2 Socivo

Socivo je optički element napravljen od prozračnog optičkog materijala, ograničenog dvema rotacionim prelomnim površinama, koje su obično osno simetrične i centrirane. Najveći broj sociva je ograničen sa dve sferne površine. Ako je jedna površina ravna, tada ona mora biti normalna na optičku osu.

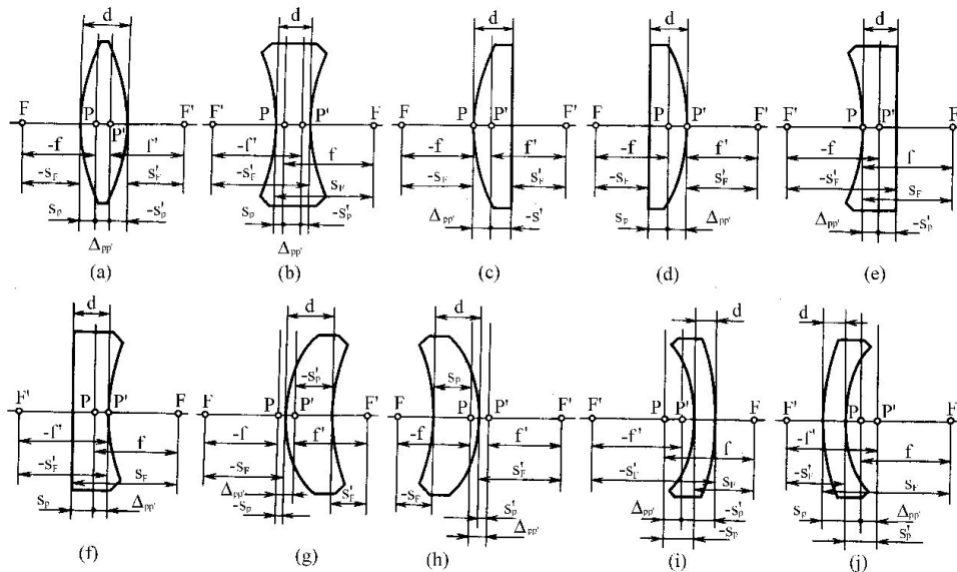
Sociva se mogu podeliti na:

- sabirna sociva,
- rasipna sociva.

Sabirno socivo je socivo koje paralelan ulazni snop zraka skuplja u jednoj tacki, odnosno jednoj ravni. Po obliku može biti bikonveksno (dve sferne konveksne površine, prikazano na slici 3.2 a), plankonveksno (jedna sferna konveksna površina i jedna ravna površina, prikazano na slici 3.2 c, d) i menisk (po jedna sferna konveksna i konkavna površina, prikazano na slici 3.2 g, h). Osnovna karakteristika sabirnog sociva je da je ono uvek deblje na osi nego na periferiji.

Rasipno socivo je socivo kod koga se ulazni paralelni snop zraka posle prolaska kroz socivo rasipa, odnosno širi, umesto da se skuplja. Po obliku može biti bikonkavno (dve sferne konkavne površine, prikazano na slici 3.2 b), plankonkavno (jedna sferna konkavna površina i jedna ravna površina, prikazano na slici 3.2 e, f) i menisk (po jedna sferna konveksna i konkavna površina, prikazano na slici 3.2 i, j). Osnovna karakteristika rasipnog sociva je da je ono uvek deblje na periferiji nego na osi.

Na slici 3.2 prikazani su različiti tipovi sociva sa definisanim parametrima.



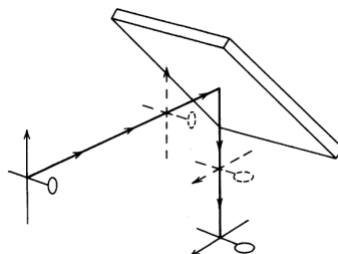
Slika 3.2. Različiti tipovi sociva

- (a) – bikonveksno sabirno socivo, (b) – bikonkavno rasipno socivo, (c), (d) – plankonveksno sabirno socivo, (e), (f) – plankonkavno rasipno socivo, (g), (h) – sabirni menisk, (i), (j) – rasipni menisk

3.3 Ogledalo

Ravno ogledalo je optički element koji ima ravnu refleksnu površinu. Namijenjeno je za promenu pravca zraka i za promenu položaja ose optičkog sistema. Kombinacija ravnih ogledala postavljenih pod određenim uglom omogućava obrtanje lika.

Na slici 3.3 je prikazana orijentacija lika posle odbijanja od ravnog ogledala. Uobicajeno je da se kao predmet posmatra krst sa strelicom i kružicom, koji omogućava da se sagleda kompletna orijentacija predmeta i lika u prostoru.



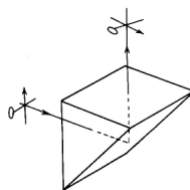
Slika 3.3. Orijentacija lika posle odbijanja od ravnog ogledala

Ravno ogledalo se pravi tako što se refleksni sloj nanosi na spoljnu, ili unutrašnju površinu planparalelne ploce. U slučaju kada je refleksni sloj nanešen na unutrašnju površinu, mogu se pojaviti parazitski likovi od spoljne površine planparalelne ploce. Kod ogledala visoke tačnosti refleksni slojevi se uvek nanose na spoljnu površinu. Za kvalitetne refleksne slojeve primenjuju se: srebro, aluminijum, hrom i zlato.

3.4 Prizma

Prizma je optički element sa ravnim poliranim stranicama, postavljenim pod određenim uglom. Prizma ne sme narušavati simetriju centriranih optičkih sistema. Da bi to ispunila, prizma mora da se u optičkom sistemu ponaša kao kombinacija planparalelne ploce i sistema ravnih ogledala, čiji je broj jednak broju refleksionih stranica prizme.

Jedna od najčešće korišćenih prizama u optičkom sistemu je pravougaona prizma, koja je prikazana na slici 3.4. Njena osnovna uloga je da skrene snop zraka za 90° . Druga uloga se postiže, ako se pravougla prizma postavi ispred objektiva u paralelni snop svetlosti. Tada se može omogućiti panoramsko posmatranje, tj. posmatranje u krugu od 360° , bez okretanja glave posmatraca, tako što se pravougaona prizma obrće oko svoje ose. Pravougaonu prizmu može da zameni ravno ogledalo, i obrnuto, svako ravno ogledalo može biti zamenjeno sa pravouglo prizmom.



Slika 3.4. Pravougaona prizma

Glava 4

Aberacije optickog sistema

Pod aberacijama se podrazumevaju nedostaci optickog sistema da formira lik koji odgovara idealnom liku. Aberacija se definiše kao razlika stvarnog i idealnog lika. Idealni lik dobijamo pod pretpostavkom, da svi zraci koji izlaze iz jedne tacke predmeta, moraju da se ponovo susretnu u jednoj tacki lika. Stvarni lik dobijamo proracunom hoda zraka kroz opticki sistem. Za paraksijalne zrake (zrake bliske optickoj osi), aberacije su male i mogu biti zanemarene. Medutim, za sve ostale zrake koji se nalaze na konacnoj udaljenosti od opticke ose i pod konacnim uglom u odnosu na opticku osu, aberacije postaju znacajne jer dosta iskrivljuju lik. Osnovni uzrok aberacija je u tome, što su sociva formirana od sfernih površina koje ne prelamaju zrake na isti nacin, kao što je pretpostavljeno u paraksijalnoj aproksimaciji. Ovakve aberacije nazvane su geometrijske. Drugi uzrok aberacija je povezan sa disperzijom svetlosti. Pošto indeks prelamanja zraka zavisi od talasne dužine svetlosti, to i žižna dužina i druge karakteristike sistema takode zavisi od talasne dužine. Zbog toga zraci, koji su emitovani iz iste tacke, a imaju različite talasne dužine, po prolasku kroz opticki sistem ne konvergiraju u istu tacku lika, cak iako su svaki za sebe idealni. Ovakve aberacije se zovu hromatske aberacije.

Za potrebe projektovanja optickih sistema aberacije se mogu podeliti u dve grupe: monohromatske ili geometrijske i hromatske aberacije. U praksi, aberacije se nikad ne javljaju kao izdvojene pojedinačne aberacije, vec uvek kao kombinacija aberacija. Sistem klasifikovanja aberacija veoma olakšava analizu aberacija i daje dobar opis kvaliteta lika optickog sistema.

Uobicajeno je da se aberacije mere kao velicina odstupanja za koje realni zraci promašuju tacku paraksijalnog lika.

Važno je imati na umu, da su aberacije neizbežne u svim realnim optickim sistemima, i jedan od ciljeva projektovanja optickog sistema je da se koriguju postojeće aberacije u optickom sistemu. Neke aberacije neizbežno moraju da ostanu, i cilj procene kvaliteta lika je da se odredi koliko velike mogu biti zaostale aberacije. U opštem slucaju, moderne metode projektovanja optickih sistema uzimaju aberacije u obzir prilikom rešavanja sledećih problema:

- određivanje zaostalih aberacija optickog sistema sa tacno definisanim konstrukcionim parametrima;
 - procena promenljivih konstruktivnih parametara optickog sistema, koji ce držati zaostale aberacije u okviru tacno definisanih tolerantnih granica. Te tolerantne granice mogu se izvesti na osnovu namene optickog sistema.
- Ovde ce biti opisane samo najosnovnije aberacije.

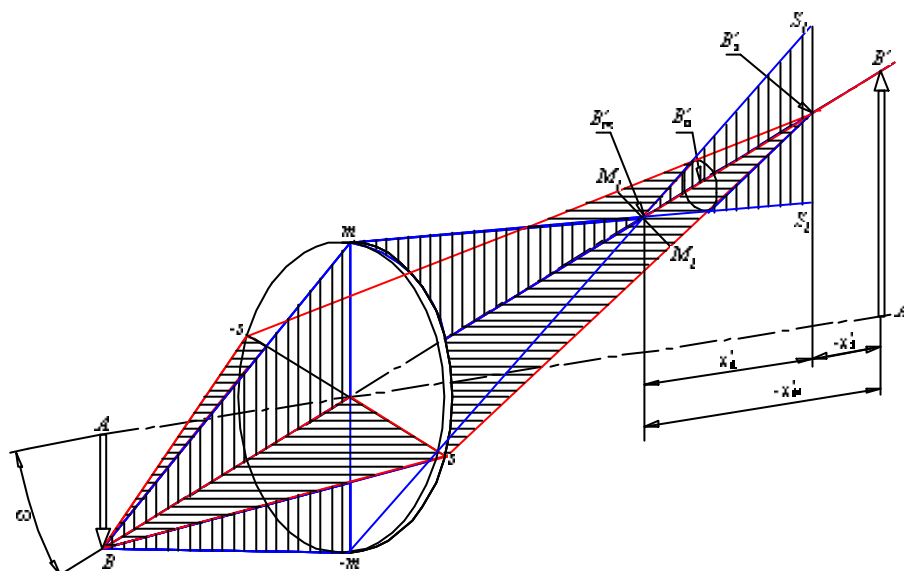
4.1 Sferna aberacija

Sferna aberacija se definiše, kao simetrična optička greška sociva i sfernih ogledala kod kojih zraci, koji na različitim visinama ulaze u optički sistem, ne spajaju se na izlasku iz optičkog sistema u tački paraksijalne žiže, već formiraju kružnu mrlju. Glavni uzrok sferne aberacije je, da ugao između upadnog zraka (koji je paralelan sa optičkom osom) i normale na sfernu površinu nije isti na svim visinama, već se povećava. Zbog toga zraci na većim odstojanjima od optičke ose, pri prelamanju kroz optičku površinu, skreću sa većim prelomnim uglom ka optičkoj osi, a samim tim seku optičku osu pre zraka na manjim odstojanjima.

4.2 Astigmatizam

Astigmatizam je pojava pri kojoj se zraci jednog istog snopa, posmatrano u dve uzajamno normalne ravni (meridionalnoj i sagitalnoj), posle prelamanja kroz optički sistem, ne seku u jednoj tački, niti se seku u ravni paraksijalnog lika, već obrazuju lik u obliku dve duži (meridionalnu i sagitalnu fokalnu), koje se nalaze na određenom rastojanju i pod uglom od 90° .

Na slici 4.1, dat je šematski prikaz astigmatizma.



Slika 4.1. Astigmatizam

Glavni zrak bilo kojeg osnog, beskonечно uskog snopa zraka, prolazi kroz centar krivine optičke površine, pa su zato veličine radijusa krivine u meridionalnoj (mm), i sagitalnoj (ss) ravni, jednake ($r_m = r_s$).

Za beskonечно uske snopove zraka, koji polaze iz vanosne tačke B , uslovi prostiranja bice različiti u meridionalnoj i sagitalnoj ravni. Glavni zrak, oko koga su drugi zraci simetrično raspoređeni, ne prolazi kroz centar krivine optičke površine u opštem slučaju, pa će osvetljeni element optičke površine imati različite radijuse krivine $r_m \neq r_s$, u meridionalnoj (mm) i sagitalnoj (ss) ravni. Izlazni talasni oblik, koji odgovara

elementarnom kosom snopu zraka, više nije sferni već je deformisan. Zraci, koji putuju u meridionalnoj i sagitalnoj ravni, sastaju se sa glavnim zrakom u tackama B'_m i B'_s u prostoru lika, na rastojanjima $-x'_m$ i $-x'_s$ od ravni paraksijalnog lika B' .

Svi zraci koji su pošli iz vanosne tacke predmeta B i prostirali se u meridionalnoj ravni skupljaju se u tacki B'_m , dok zraci koji su pošli iz iste tacke B i prostirali se u sagitalnoj ravni formiraju horizontalnu duž umesto tacke, kao što predviđa paraksijalna teorija. Isto važi i za ravan lika koji sadrži tacku B'_s , u kojoj se skupljaju svi zraci koji su pošli iz vanosne tacke predmeta B i prostirali se u sagitalnoj ravni, a zraci koji su pošli iz iste tacke B i prostirali se u meridionalnoj ravni formiraju vertikalnu duž.

Ovaj fenomen, odnosno nedostatak optickog sistema, na osnovu koga se lik vanosne tacke formira kao dve uzajamno normalne linije, koje leže u ravnima na razlicitom rastojanju od ravni paraksijalnog lika, zove se astigmatizam.

4.3 Krivina polja

Krivina polja je usko povezana sa astigmatizmom i uvek se zajedno obrađuju. Meridionalna i sagitalna fokala se formiraju na razlicitim rastojanjima od ravni paraksijalnog lika i njihov položaj zavisi od ugla vidnog polja. Ako se spoje sva mesta formiranja fokala dobijaju se dve krive, koje predstavljaju promenu položaja meridionalne i sagitalne fokale, sa promenom ugla vidnog polja. Kriva koja se dobija kao aritmeticka sredina ove dve krive naziva se krivina polja.

Fizicka suština aberacije krivina polja je u tome, da ravan lik, posle projektovanja kroz opticki sistem, neće više biti ravan, već će biti zakrivljen, tj. ako se predmet nalazio u ravni, lik više neće biti u ravni, već u prostoru (paraboloid).

Opticki sistem, koji je korigovan na astigmatizam i krivinu polja za određeni ugao vidnog polja, i sa zaostalim aberacijama koje imaju vrednosti u granicama tolerancije, se zove anastigmatski opticki sistem.

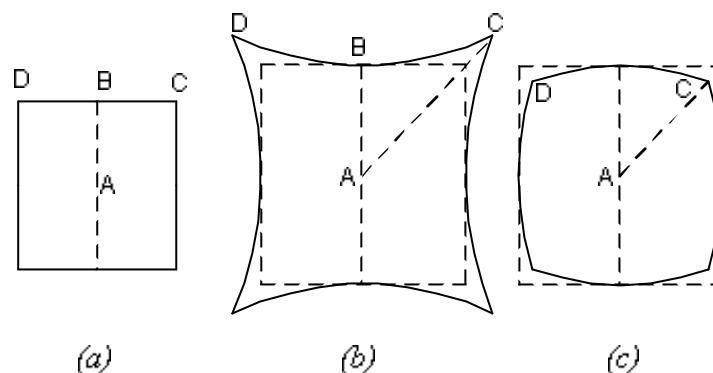
4.4 Distorzija

Distorzija u odnosu na sve druge aberacije ima sasvim posebne osobine. Ona ne izaziva nejasnocu slike predmeta. Ako su u sistemu korigovane sve ostale aberacije, a ostala samo cista distorzija, slike svih tacaka predmeta bice takode jasne tacke. Distorzija izaziva deformisanost slike predmeta u geometrijskom smislu.

Distorzija nastaje zbog nepotpunog ispunjavanja poznatog zakona geometrijske optike da je linearno uvecanje za par spregnutih, i na opticku osu normalnih ravni, konstanta. Neispunjenje ovog zakona dovodi do deformacije slike predmeta. Do promene linearnog uvecanja dolazi sa pomeranjem tacke od ose, ka periferiji. Distorzija kao aberacija, ima osobinu da je simetricna u odnosu na opticku osu. Graficki prikaz distorzije dat je na slici 5.4, na kojoj su prikazana tri moguca slucaja distorzije.

Linearno uvecanje ostaje konstantno pri udaljavanju od opticke ose. Tu je korigovana distorzija i takvi opticki sistemi se zovu ortoskopski sistemi. To je prikazano na slici 4.2a.

Linearno uvecanje raste pri udaljavanju od opticke ose, tada raste i distorzija, pa se zato kaže da je distorzija pozitivna, i to je prikazano na slici 4.2b.



Slika 4.2. Distorzija

Linearno uvećanje se smanjuje pri udaljavanju od optičke ose, tada se smanjuje i distorzija, pa se zato kaže da je distorzija negativna, i to je prikazano na slici 4.2c.

Optički sistemi sa korigovanom distorzijom i ostalim aberacijama u okviru tolerantnih granica zovu se ortoskopski sistemi.

4.5 Koma

Koma se javlja kod širokih snopova, koji u optički sistem ulaze pod nagibom prema osi sistema. Sastoji se u narušavanju simetrije tog snopa. Usled toga mrlja, koju proizvodi rasipanje zrakova, koji idu od neke tačke predmeta izvan ose, gubi svoj kružni oblik, karakteristican za sfernu aberaciju, pa raspodela svetlosne energije u mrlji dobija karakteristican oblik komete sa repom.

Koma je uzrokovana cinjenicom, da su glavne ravni sfernih sociva zakrivljene površi koje se prostorno definišu, a mogu se smatrati ravnim površinama samo za paraksijalnu oblast. Kao posledica toga, javlja se cinjenica da koma raste sa porastom numeričke aperture, odnosno relativnog otvora optickog sistema. Koma se može redukovati dodavanjem novih prelomnih površina, tj. povećanjem broja prelomnih površina optickog sistema, ili pogodnim izborom mesta (položaja) aperturne dijafragme optickog sistema.

Glava 5

Teleskopski sistemi

5.1 Princip rada teleskopskih sistema

Teleskopski sistemi su velika grupa optickih instrumenata projektovanih za posmatranje udaljenih predmeta. Primarna funkcija teleskopskog sistema je da uveca prividnu velicinu udaljenog predmeta. To se postiže tako, što oko posmatra lik predmeta kroz teleskopski sistem, pod vecim uglom nego što bi posmatralo predmet bez teleskopskog sistema. Ako se predmet posmatra bez teleskopskog sistema, tada važi jednostavno pravilo: što je predmet udaljeniji, to je ugao pod kojim se predmet gleda sve manji, pa je i velicina lika na mrežnjaci oka sve manja. To znaci, da sve manje vidnih elemenata mrežnjace prima vidne utiske. Fiziološka rezolucija ljudskog oka je $\psi_{oka} = 60''$ i svi predmeti koji se gledaju pod manjim uglom su nevidljivi za ljudsko oko. Na osnovu iznetih cinjenica, jasno proizilazi znacaj povecanja vidnog ugla primenom teleskopskog sistema.

Osnovna pretpostavka je da teleskopski sistemi rade sa predmetom i likom koji se nalaze u beskonacnosti. Snop paralelnih zraka ulazi u ulaznu pupilu teleskopskog sistema i snop paralelnih zraka izlazi iz izlazne pupile. Može se pretpostaviti da je snop zraka paralelan, zato što je velicina ulazne pupile zanemarljiva u odnosu na rastojanje do predmeta koji se posmatra. Pošto celokupan teleskopski sistem nema žižnu dužinu, teleskopski sistemi se nazivaju i afokalni sistemi.

Teleskopski sistemi se u suštini sastoje od dve komponente. Komponenta bliža predmetu se zove objektiv, a komponenta bliža oku posmatraca se zove okular. Objektiv je sabirni opticki sistem koji stvara realni lik udaljenog predmeta, koji je obrnut i umanjen. Okular ima funkciju lupe i uvecava lik predmeta koji je formirao objektiv. Objektiv i okular su tako projektovani da se zadnja žižna ravan objektiva poklapa sa prednjom žižnom ravni okulara. Objektiv sve paralelne zrake koji u njega ulaze skuplja u žižnoj ravni, a okular od skupljenih zraka u žižnoj ravni formira paralelan snop zraka na izlasku iz teleskopskog sistema.

Osnovne karakteristike teleskopskog sistema su:

- teleskopsko uvecanje Γ ,
- ugao vidnog polja 2ω ,
- precnik izlazne pupile D_{iz} ,
- rezolucija teleskopskog sistema ψ ,
- dužina teleskopskog sistema od prve do zadnje prelomne površine L ,
- položaj i udaljenost ulazne pupile od prve prelomne površine p ,
- položaj i udaljenost izlazne pupile od zadnje prelomne površine p' .

Teleskopsko uvećanje Γ je jednako ugaonom uvećanju γ i za velike uglove iznosi

$$\Gamma = \frac{\tan \omega'}{\tan \omega} = -\frac{f'_{ob}}{f'_{ok}} = \frac{D_u}{D_{iz}} = \gamma. \quad (5.1)$$

gde su:

ω' – prividni ugao vidnog polja,

ω – realni ugao vidnog polja,

f'_{ob} – žižna dužina objektiva,

f'_{ok} – žižna dužina okulara,

D_u – prečnik ulazne pupile,

D_{iz} – prečnik izlazne pupile,

γ – ugaono uvećanje.

Iz teorije idealnih optičkih sistema poznat je odnos poprečnog, ugaonog i podužnog uvećanja

$$\Gamma = \frac{1}{\beta}, \quad \alpha = \beta^2 \quad \rightarrow \quad \alpha = \frac{1}{\Gamma^2}.$$

Vidi se da teleskopski sistem stvara izoblicenu perspektivu prostora. Prividna velicina predmeta nam se čini Γ puta uvećana zato što ga oko gleda pod uglom prividnog vidnog polja ω' . Slika prostora ispred optičkog sistema je komprimovana, odnosno spljoštena.

5.2 Tipovi teleskopskih sistema

Osnovni uslov za formiranje teleskopskih sistema je poklapanje zadnje žižne ravni objektiva i prednje žižne ravni okulara. Postoje dve moguće šeme formiranja teleskopskog sistema:

- Holandski ili Galileiev teleskop,
- Keplerov teleskop.

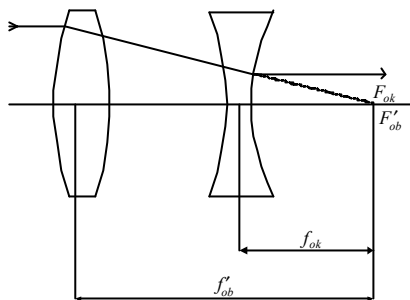
5.2.1 Galileiev teleskopski sistem

Galileiev teleskopski sistem se sastoji iz pozitivnog objektiva i negativnog okulara i formira uspravan imaginarni lik predmeta. Uopštena optička šema Galileievog teleskopskog sistema data je na slici 5.1.

Objektiv kod Galileievog sistema je obično pozitivni duble (sistem od dva slepljena sociva) sa relativnim otvorom do $f/3$ i uglom vidnog polja do $2\omega = 8^\circ$. Ugao vidnog polja ne može da bude veći, jer i za ove uglove, zbog veoma udaljene ulazne pupile, objektiv mora da ima značajan relativni otvor za koji je teško korigovati sve aberacije.

Okular je obično jedno negativno socivo, ili negativni duble sa prividnim uglom vidnog polja od $2\omega' = 30^\circ$ do 40° , pod uslovom da su aberacije glavnog i kosih zraka kompenzovane pomoću objektiva. Galileievi teleskopi se projektuju za mala uvećanja,

koja su najčešće od $\Gamma = 2.5\times$ do $\Gamma = 4\times$, a nikad ne prelaze uvećanja od $\Gamma = 6\times$ do $\Gamma = 8\times$.



Slika 5.1. Galilejev teleskopski sistem

Prednosti Galilejevog teleskopskog sistema su:

- mala dužina teleskopskog sistema,
- prosta konstrukcija,
- uspravan lik,
- mali gubici svetlosti, jer ima samo četiri površine staklo – vazduh.

Nedostaci Galilejevog teleskopskog sistema su:

- formira imaginarni lik predmeta. (U Galilejevom teleskopskom sistemu nije moguće ugraditi koncanicu. Zbog toga se ova šema teleskopskog sistema ne može koristiti u sistemima za merenje i nišanje);
- malo vidno polje, koje je i loše definisano zbog proizvoljnog položaja oka u odnosu na optički sistem;
- malo uvećanje, u poređenju sa Keplerovim teleskopskim sistemom.

5.2.2 Keplerov teleskopski sistem

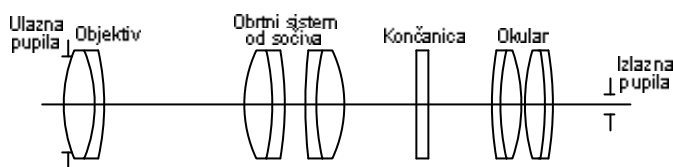
Keplerov teleskopski sistem se sastoji iz pozitivnog objektiva i pozitivnog okulara i formira realan i obrnuti lik. Formiranje realnog lika znači, da postoji položaj u okviru teleskopskog sistema, u koji se može postaviti koncanica. Na ovaj način, optički sistem se može koristiti za usmeravanje i nišanje. Keplerov sistem formira obrnut lik, što zadovoljava jedino astronomske potrebe, dok za sve ostale potrebe, neophodno je ugraditi obrtni sistem, koji može biti od sociva ili prizama.

Kao i kod Galilejevog teleskopskog sistema, ulazna pupila je najčešće nosac objektiva. Lik ulazne pupile, odnosno izlazna pupila, je kod Keplerovog sistema realan i nalazi se iza okulara u prostoru lika. Kod Keplerovog teleskopskog sistema položaj izlazne pupile je tačno definisan i na tom mestu se uvek postavlja zenica oka.

Optička šema Keplerovog teleskopskog sistema sa obrtnim sistemom od sociva prikazana je na slici 5.2.

Objektiv Keplerovog sistema je obično pozitivni duble, ili neki komplikovaniji objektiv (Cookeov triple, Tessar, Petzval). Relativni otvor može biti do $f/3$, ako je objektiv duble, odnosno do $f/2$, ako je objektiv neki od komplikovanijih objektiva. Ugao vidnog polja najčešće ima vrednost od $2\omega = 8^\circ$ do $2\omega = 12^\circ$, a maksimalno do $2\omega = 20^\circ$.

Okulari Keplerovog sistema su složeni optički sistemi od 3 do 6 sočiva. Prividni ugao vidnog polja okulara bitno zavisi od njegove složenosti i iznosi od 40° do 70° .



Slika 5.2. Kepleroov teleskopski sistem

Kepleroov teleskopski sistem uobicajeno ima veca uvecanja od Galileiovog teleskopskog sistema. U vojnim primenama, Kepleroov sistem se obicno projektuje za uvecanja od $\Gamma = 1.5\times$ do $\Gamma = 10\times$, u redim slucajevima moguca su i veca uvecanja.

Prednosti Keplerovog teleskopskog sistema u odnosu na Galileiov teleskopski sistem su:

- veci ugao vidnog polja,
- vece uvecanje,
- mogucnost postavljanja končanice, što omogucava primenu u sistemima za merenje i nišanje.

Nedostaci Keplerovog u odnosu na Galileiov sistem su:

- potreba za ugradnjom obrtnog sistema da bi se dobio uspravan lik,
- veca ukupna dužina optickog sistema.

Glava 6

Komponente teleskopskog sistema

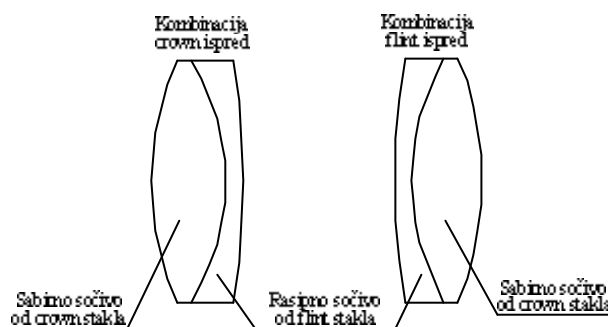
6.1 Objektiv

Objektiv je prvi element teleskopskog sistema i njegova uloga je da formira lik predmeta u svojoj zadnjoj žižnoj ravni. Od kvaliteta objektiva zavisi kvalitet lika predmeta i, samim tim, kvalitet celog teleskopskog sistema.

Najčešće korišćeni objektiv za teleskopske sisteme je duble, koji se sastoji iz dva sociva, koja mogu biti slepljena, ili mogu da se nalaze na malom međusobnom rastojanju (rastavljeni duble). Duble se sastoji iz jednog sabirnog sociva, napravljenog od crown stakla, i jednog rasipnog sociva, napravljenog od flint stakla. Moguće su dve kombinacije dublea:

- crown ispred (prvo sabirno, pa rasipno socivo),
- flint ispred (prvo rasipno, pa sabirno socivo).

Na slici 6.1 prikazane se dve moguće kombinacije dublea.



Slika 6.1. Dve moguće kombinacije dublea

Ako se žele dobre osobine objektiva, tada treba da su zadovoljeni sledeći zahtevi:

- žižna dužina $f' \leq 150 \text{ mm}$,
- relativni otvor manji ili jednak $f/4$,
- ugao vidnog polja $2\omega \leq 6^\circ$.

Ako se može postići da se aberacije objektiva kompenzuju sa aberacijama okulara, tada se može povećati ugao vidnog polja na $2\omega = 8^\circ$ do $2\omega = 11^\circ$, za kombinaciju crown ispred, odnosno do $2\omega = 15^\circ$ za kombinaciju flint ispred.

Treba naglasiti da su crown stakla manje osetljiva na atmosferske uticaje i mehanicke udare, pa se zbog toga kod nišanskih sprava češće koriste dublei sa kombinacijom crown ispred.

Rastavljeni dublei omogućavaju bolju korekciju aberacija jer imaju više konstruktivnih parametara, ali se relativno retko koristi zbog sledećih problema:

- imaju veće gubitke usled refleksije, zbog duplo većeg broja površina staklo – vazduh,
- teški su za montažu i centriranje.

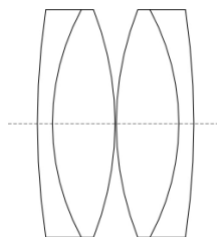
6.2 Okular

Okular prima lik koji formira objektiv i ima ulogu da uveća taj lik na principu lupe. Okular uvećava lik predmeta, tako što ga posmatra pod prividnim uglom vidnog polja koji je veći od realnog ugla vidnog polja objektiva, za onoliko puta koliko je uvećanje teleskopskog sistema. Okular formira svoj lik u beskonacnosti, a to znači paralelan snop svetlosti izlazi iz okulara kroz izlaznu pupilu i ulazi u ljudsko oko.

Uobicajeno je da se okular sastoji od dve odvojene grupe sociva. Grupa sociva koja se nalazi bliže koncanici se zove kolektor, jer skuplja svetlost, koja je posle koncanice divergentna. Grupa sociva koja se nalazi bliže oku posmatraca se zove ocnica, jer usmerava svetlosni snop u izlaznu pupilu teleskopskog sistema koja se poklapa sa zenicom oka posmatraca.

Kod teleskopskih sistema primenjuje se više tipova okulara, od kojih će ovde biti prikazan samo simetrični okular.

Simetrični okular se sastoji iz dva slepljena dublea, koji su obično indentični, i nalaze se na malom međusobnom rastojanju. Dublei su tako postavljeni, da su sabirna sociva od crown stakla sa unutrašnje strane, a rasipna sociva od flint stakla sa spoljašnje strane. Izgled simetričnog okulara dat je na slici 6.2.



Slika 6.2. Simetrični okular

Simetrični okular ima sledeće dobre karakteristike:

- dobra korekcija monohromatskih i hromatskih aberacija,
- veliko prednje temeno rastojanje, što omogućava laku konstrukciju dioptrijskog pomeranja okulara,
- veliko zadnje temeno rastojanje, a samim tim i veliko rastojanje izlazne pupile.

Simetrični okular je jedan od najčešće korišćenih okulara za dnevne nišanske sprave.

6.3 Obrtni sistem

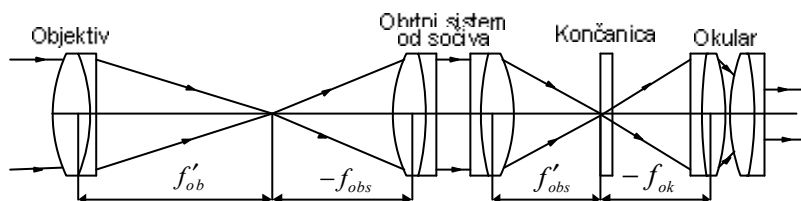
Poznato je da u osnovnoj varijanti Keplerov teleskopski sistem ne formira uspravan lik predmeta. Da bi se dobio uspravan lik koji po orijentaciji u potpunosti odgovara predmetu potrebno je uvesti obrtni sistem koji može biti sastavljen od:

- sociva,

- ogledala,
- prizme ili sistema prizama.

Obrtni sistem se postavlja između zadnje žižne ravni objektiva i prednje žižne ravni okulara. Obrtni sistem ima ulogu da prenese lik, koji je formirao objektiv, iz zadnje žižne ravni objektiva u prednju žižnu ravan okulara i da ga pri tome obrne po pravcu i visini.

Obrtni sistem od sociva najčešće se sastoji od dva dublea. Ta dva dublea su tako projektovana da se prednja žižna ravan prvog dublea obrtnog sistema poklapa sa zadnjom žižnom ravni objektiva, a zadnja žižna ravan drugog dublea obrtnog sistema poklapa sa prednjom žižnom ravni okulara. Princip rada obrtnog sistema sa socivima je sledeći: Objektiv formira lik predmeta iz beskonacnosti u svojoj zadnjoj žižnoj ravni. Taj formirani lik je istovremeno i predmet za prvi duble obrtnog sistema, i nalazi se u prednjoj žižnoj ravni prvog dublea obrtnog sistema. Pošto se predmet nalazi u žižnoj ravni lik će se formirati u beskonacnosti. To znači da će iz prvog dublea obrtnog sistema izaci paralelni snop svetlosti, koji ulazi u drugi duble obrtnog sistema i formira lik u zadnjoj žižnoj ravni drugog dublea obrtnog sistema. Taj lik je istovremeno i predmet okulara i nalazi se u prednjoj žižnoj ravni okulara. Okular formira lik u beskonacnosti, odnosno iz okulara izlazi paralelan snop svetlosti i kroz izlaznu pupilu ulazi u oko posmatraca. Princip rada obrtnog sistema sa socivima prikazan je na slici 6.3.



Slika 6.3. Obrtni sistem sa socivima

Prednosti obrtnih sistema sastavljenih od ogledala ili prizama u poredenju sa obrtnim sistemima od sociva su sledeće:

- pomoću ogledala ili prizama postižu se mnogo kraci optički sistemi,
- sistemi ogledala ili prizama omogućuju formiranje periskopskih optičkih sistema,
- okretanjem ogledala ili prizama može se vršiti posmatranje prostora bez okretanja glave posmatraca.

Poznato je da obrtni sistemi od prizama i ogledala mogu da slobodno menjaju mesta. Radi toga potrebno je detaljnije uporediti osobine prizama i ogledala. Osnovna karakteristika prizama je da zadržavaju neizmenjene uglove među refleksnim površinama, dok kod ogledala u toku eksploatacije može doći do razdešenosti. Pošto se ogledala montiraju svako za sebe, znači da je njihovo učvršćavanje teže nego kod prizama. Kod prizama gubici usled refleksije, budući da većina prizama radi sa totalnom refleksijom, su zanemarujući. Za razliku od prizama gubici usled refleksije kod ogledala, koja obavezno imaju refleksne slojeve, su znatni. Pored toga, tokom vremena u eksploataciji dolazi do oštećenja refleksnog sloja na ogledalima što dovodi do daljeg povećanja gubitaka. Kod prizama je moguće jednu površinu koristiti i kao refleksnu i kao prelomnu, dok je to kod ogledala nemoguće. Ova osobina dozvoljava konstrukciju kompaktnijih prizama.

Nedostaci obrtnih sistema od prizama u odnosu na ogledala su:

- prizmeni obrtni sistemi uvode aberacije u optički sistem dok ogledalski obrtni sistemi ne uvode aberacije,

- prizmeni obrtni sistemi imaju vecu masu od odgovarajucih ogledalskih obrtnih sistema.

Prizme koje se koriste za obrtne sisteme treba da imaju aberacije koje se mogu korigovati ostalim delovima optickog sistema. Osnovni zahtev je da prizma koja se koristi za obrtni sistem ne sme da radi kao spektralna prizma, odnosno da daje disperziju koja se ne može korigovati. Sledeci zahtev je da prizma ne sme da narušava simetriju optickog sistema. Navedeni uslovi mogu biti ispunjeni samo ako prizma, odnosno sistem prizama, deluju na snop svetlosti kao plan paralelna ploca postavljena normalno na osu simetrije optickog sistema.

6.4 Koncanica

Koncanica je osnovni nišanski i merni element teleskopskog sistema. Ona se može predstaviti kao skala, indikator ili šema koja se obicno postavlja na planparalelnoj ploci ili plan strani sociva. Koncanica se obicno sastoji od medusobno paralelnih ili unakrsnih linija i podela. Na koncanicama se nalaze potrebni brojevi, slova i druge neophodne oznake. Koncanica se postavlja u zadnju žižnu ravan objektiva ili u prednju žižnu ravan okulara, gde se formira slika cilja i posmatrac ima utisak da dolazi do preklapanja cilja i koncanice i da obe dolaze iz beskonacnosti.

Podela koncanica:

- koncanice sa providnom podlogom i tamnim linijama – podelama koje se koriste kod teleskopskih sistema,
- koncanice sa tamnom neprovidnom podlogom i providnim linijama – podelama koje se koriste kod kolimatora.

Podela koncanica prema nameni:

- merne,
- nišanske,
- kombinovane (složene).

Glava 7

Optoelektronske sprave

7.1 Znacaj optoelektronskih sprava

Za rad klasičnih optičkih instrumenata i nišanskih sprava potrebna je dnevna svetlost koja čovekovom oku omogućava da vidi predmete koji ga okružuju. U prirodi postoji velika varijacija intenziteta svetlosti (čak 9 redova velicina, od direktne sunčeve svetlosti u podne, do oblačne noci samo sa svetlošću zvezda) i čovekovo oko može da vidi samo u određenom opsegu. Ako se želi da čovek vidi i van svojih fizioloških granica moraju se koristiti optoelektronski sistemi koji omogućavaju da se nevidljivo, ili slabo vidljivo zračenje pretvori u vidljivo zračenje (svetlost) za čovekovo oko. Da bi se mogao spoznati značaj optoelektronskih sistema mora se prvo opisati, u grubim crtama, fiziologija čovekovog oka.

Ako se čovekovo oko posmatra sa čisto tehničke strane ono se može uporediti sa fotoaparatom. Oko je slobodno telo čija je prednja strana prozirna i naziva se rožnjaca. U prostoru između rožnjace i ocnog sociva nalazi se klasična aperturna dijafragma koja se naziva zenica. Kao i svaka aperturna dijafragma, zenica ograničava količinu primljene svetlosti tako što se skuplja i širi. Očno socivo ima ulogu da formira lik predmeta na mrežnjaci. Očno socivo je okruženo kružnim mišićem pod čijim dejstvom oko može da menja svoju optičku moc i na taj način je omogućeno da oko jasno vidi i bliske i daleke predmete. U analogiji sa fotoaparatom to bi odgovaralo izoštravanju slike, odnosno zauzimanju odgovarajuće daljine. Unutrašnji prostor oka, iza sociva, ispunjen je prozračnom tečnošću. Mrežnjaca, koja je zadnja površina oka, sadrži veliku količinu svetlosno osetljivih elemenata koji se nazivaju cepici i štapici. Cepici su skoncentrisani u centralnoj oblasti vidnog polja oka, dok su štapici raspoređeni van te centralne oblasti. U centru vidnog polja oka nalazi se žuta mrlja. Kada čovek želi da nešto jasno vidi, on se tako postavlja, da se lik predmeta formira na žutoj mrlji. Čovekovo oko ima mogućnost dvostrukog gledanja. Jedno je klasično dnevno gledanje u uslovima dovoljne količine svetlosti, a drugo je noćno gledanje. Osnovne karakteristike dnevnog i noćnog gledanja date su u tabeli 7.1.

Tabela 7.1. Osnovne karakteristike dnevnog i noćnog gledanja

Dnevno gledanje	Nocno gledanje
Osmatranje preko cepica	Osmatranje preko štapica
Sposobnost razlikovanja boja	Nemogućnost prijema boja (sve se vidi u nijansama sivog)
Najbolja jasnoca u žutoj mrlji	Najbolja jasnoca na 10° do 20° od centra žute mrlje
Malo polje vida sa velikom jasnocom	Veliko polje vida sa malom jasnocom

Za uocavanje posmatranog objekta potrebno je da postoji određeni kontrast, odnosno razlicita osvetljenost objekta i okoline. U normalnim, dnevnim uslovima minimalna vrednost kontrasta pri kojoj se može uociti objekat u okolini je 2%. Uobicajena vrednost kontrasta pri kojoj se, u dnevnim uslovima, bez problema može uociti objekat u okolini je od 5 do 10%. U nocnim uslovima, potrebna vrednost kontrasta da bi se mogao uociti objekat je od 20 do 50%.

Moc razlaganja oka veoma zavisi od doba dana i kolicine raspoložive svetlosti. U dnevnim uslovima moc razlaganja oka je 1 minut, dok u nocnim uslovima moc razlaganja oka zavisi od uslova okoline i iznosi:

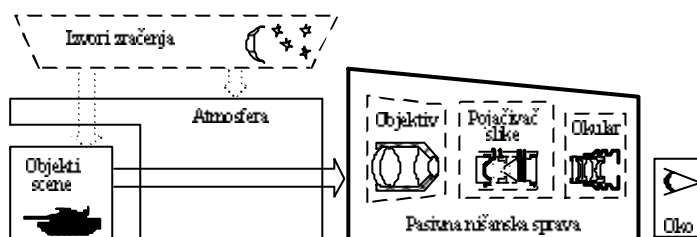
- pri slaboj mesecini, moc razlaganja oka je 4 lucne minute,
- pri vedroj noci bez mesecine, moc razlaganja oka je od 10 do 30 lucnih minuta,
- pri oblacnoj noci bez mesecine, moc razlaganja oka je od 40 do 60 lucnih minuta.

Iz iznetih podataka jasno se vidi da je moc razlaganja oka u nocnim uslovima od 4 do 60 puta lošija od moci razlaganja oka u dnevnim uslovima.

Klasicne nišanske sprave omogucavaju da povecanje moci razlaganja oka tako što povecavaju precnik objektiva, svetlosnu moc objektiva, transmisiju svetlosti kroz nišansku spravu, smanjujuci gubitke svetlosti. Medutim, ispod osvetljenosti od 0.01 luxa oko ne dobija dovoljno svetlosne energije i nikakav opticki sistem ne može da pomogne da se poveca moc razlaganja oka. Znaci, za male vrednosti osvetljenosti klasicne nišanske sprave nisu dovoljno dobre, vec su potrebne optoelektronske nišanske sprave. U naoružanju modernih armija nalaze se dva tipa optoelektronskih sistema. Prvi su optoelektronski sistemi sa pasivnim pojacavacima slike, a drugi su termovizijski sistemi.

7.2 Osnovne komponente optoelektronskih sprava

Osnovne komponente optoelektronskih, pasivnih sprava su: objektiv, pojacavac slike i okular. Medutim, na rad pasivnih sprava bitno uticu i uslovi koji vladaju u atmosferi, izvori zracenja kao što su Mesec i zvezde. Zbog toga se na opštoj blok šemi za pasivne sprave, datoj na slici 7.1, nalaze sve pomenute komponente i bitni cinioci.



Slika 7.1. Opšta blok šema za pasivne sprave

Objektivi za pasivne sprave mogu da budu:

- refrakcione (objektivi sastavljeni samo od sociva kod kojih je za prostiranje svetlosti dominantna refrakcija, tj. prelamanje svetlosti),
- refleksione (objektivi sastavljeni samo od ogledala kod kojih je za prostiranje svetlosti dominantna refleksija, tj. odbijanje svetlosti od ogledalskih površina objektiva),

- katadioptriske (objektivi sastavljeni od kombinacije sociva i ogledala, kod kojih se podjednako pojavljuju i refrakcija na prelomnim površinama i refleksija na ogledalskim površinama objektiva).

Refrakcioni objektivi uglavnom koriste kod pasivnih sprava, kod kojih je potreban veliki ugao vidnog polja i malo uvećanje. Tipican primer su pasivne naocare. Refleksioni i katadioptrički objektivi se uglavnom koriste kod pasivnih sprava kod kojih je potrebno veće uvećanje, a dovoljan je relativno mali ugao vidnog polja. Tipični primer su pasivne osmatračke i nišanske sprave.

Osnovni zahtevi koji se postavljaju pred objektivne koji se koriste za optoelektronske sistemi se sledeci:

- veliki ulazni otvor, koji mora da sakupi što je moguće veći broj fotona, jer ovi uređaji rade u uslovima niskog nivoa svetlosti i visokog šuma;
- veliki relativni otvor, tj. prečnik ulaznog otvora treba da je približno jednak žižnoj dužini objektiva, da bi se omogućila što veća koncentracija energije u ravni lika;
- optimizacija objektiva se mora vršiti za sledeće talasne dužine: glavna talasna dužina je 650 nm (na kojoj zrake zvezde na noćnom nebu), a pomoćne talasne dužine su 530 nm (na kojoj zrake Mesec) i 850 nm (u bliskoj IC oblasti);
- da bi objektivi omogućili veliki domet optoelektronskim uređajima, moraju pored velikog relativnog otvora imati i veliku žižnu dužinu.

Do sada su razvijene i uvedene u naoružanje četiri generacije pojačavača slike. Pojačavač slike je ključni optoelektronski deo koji vrši pojačanje postojeće svetlosti Meseca i zvezda. Pojačanje svetlosti vrši se pretvaranjem optičkog zračenja u električni signal i ponovnim pretvaranjem pojačanog električnog signala u vidljivo optičko zračenje.

Okulari koji se koriste kod pasivnih sprava su složeni širokougaoni okulari, koji se sastoje od najmanje 6 ili više sociva. Oni imaju dobro korigovane sve osnovne monohromatske aberacije.

7.3 Faktori koji utiču na rad optoelektronskih sprava

Faktori koji utiču na rad optoelektronskih, pasivnih sprava mogu se podeliti na tri velike grupe:

- uticaje atmosfere,
- uticaje scene,
- uticaje konstrukcije same optoelektronske, pasivne sprave.

U daljem tekstu će ukratko biti opisani atmosferski uticaji na prostiranje zračenja, koji se mogu se podeliti na tri osnovne grupe:

- Slabljenje zračenja (smanjenje transmisije, $\tau < 1$),
- Fluktuacije fluksa (snage) zračenja izazvane turbulencijama u atmosferi ili rasejanjem zračenja na česticama raspoređenim u atmosferi,
- Prelamanje zračenja u atmosferi koje je izazvano nehomogenom raspodelom gustine.

Osnovni procesi interakcije fluksa zračenja i atmosfere su:

- Selektivna apsorpcija na gasovitim sastojcima atmosfere,
- Rasejanje zračenja na česticama raspoređenim u atmosferi,

- Modulacija fluksa zracenja izazvana brzim promenama nekih atmosferskih parametara (turbulencije).

Meteorološko stanje atmosfere, preko uticaja na prostiranje elektromagnetnog zracenja, otežava primenu optoelektronskih uređaja za osmatranje, nišanje, vođenje i samonavodjenje projektila. Slabljenje zracenja pri prostiranju u atmosferi je osnovni mehanizam uticaja na primenu optoelektronskih uređaja i sistema. Pored slabljenja zracenja značajnu ulogu ima i sopstveno zracenje atmosfere, posebno u primenama termovizijskih uređaja.

Prisustvo vode u atmosferi ima ključni uticaj kako na slabljenje zracenja tako i na sopstveno zracenje atmosfere. Voda se u atmosferi nalazi u dva osnovna oblika: gasovito stanje – vodena para, koja ima prvenstveno uticaj na apsorpciju, i tecno stanje – kapljice vode, koje imaju prvenstveno uticaj na rasejanje. Kapljice vode se ponašaju kao cesticice koje doprinose rasejanju pri čemu se može smatrati da se ponašaju kao stabilna mešavina – aerosoli (sumaglica) ili nestabilna mešavina – hidrometeori (magla, oblaci, rosa, sneg). Za proučavanje osobina atmosfere i uticaja atmosfere na optoelektronske uređaje i sisteme, razvijen je veliki broj teorijskih modela i eksperimentalnih tehnika.

Apsorpcija je proces u kome se energija upadnog zracenja zadržava u atmosferi. Kada atmosfera apsorbuje energiju, rezultat je nepovratna transformacija energije zracenja u neki drugi oblik energije. Atmosfera može da apsorbuje samo deo ukupne energije zracenja. Ostatak energije zracenja će biti reflektovan (odbijen), refraktovan (prelomljen) ili rasejan.

Sastojci atmosfere koji najviše apsorbuju zracenje u vidljivoj i infracrvenoj oblasti spektra su: vodena para, ugljendioksid, ozon, azotmonoksid i metan.

Rasejanje zracenja je proces kod koga male cesticice, koje se nalaze u sredini sa razlicitim indeksom prelamanja, difuzno rasipaju u svim pravcima deo upadnog zracenja. Kod rasejavanja, ne postoji nikakva energetska transformacija, vec samo promena u spektralnoj raspodeli energije.

Rasejanje zracenja na sitnim cesticama u vazduhu (aerosoli) ima znatan uticaj na prostiranje zracenja kroz atmosferu. Uticaj rasejanja zracenja na cesticama je cesto veci nego apsorpcija zracenja. Rasejanje zracenja se dešava na sitnim cesticama (aerosoli) kako prirodnog porekla (sumaglica, magla) tako i veštackog porekla (namerno razvijena dimna zavesa).

Transmisija atmosfere je najvažniji parametar koji utice na karakteristike primene optoelektronskih uređaja i sistema. Na prigušenje zracenja uticu gubici usled procesa apsorpcije na molekulima i gubici usled rasejanja. Transmisija atmosfere cesto se izražava preko meterološke vidljivosti koji je standardni parametar za definisanje stanja atmosfere, odnosno za opis uticaja rasejanja na vizuelnu percepciju.

Meterološka vidljivost se definiše kao udaljenost na kojoj se ostvaruje pojavni kontrast od 2% za veliki crni (nereflektujući i neemitujući) cilj sa nebom u blizini horizonta kao pozadinom. Vrednost kontrasta od 2% je usvojena kao granicna vrednost za osetljivost prosečnog posmatraca na kontrast.

Glava 8

Pajacavaci slike

8.1 Princip rada pajacavaca slike

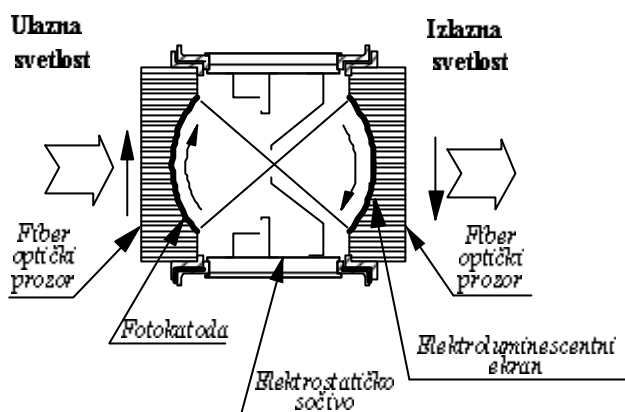
Princip rada pajacavaca slike zasniva se na dvostrukoj transformaciji energije. Prvo se transformiše energija optickog zracenja u energiju elektrona, a zatim se energija elektrona ponovo transformiše u svetlosnu energiju. Svaki optoelektronski sistem sastoji se iz tri osnovna elementa:

- objektiva,
- pajacavaca slike,
- okulara.

Uloga objektiva je da prihvati postojeće zracenje sa predmeta i formira lik u svojoj zadnjoj žižnoj ravni. Obicno se prihvata zracenje Meseca, zvezda ili nocnog neba, koje je slabog intenziteta i slabo vidljivo, ili nevidljivo za ljudsko oko, ali sasvim dovoljno za pajacavac slike da formira lik predmeta.

U zadnjoj žižnoj ravni objektiva gde se formira lik predmeta nalazi se fotokatoda pajacavaca slike. Na fotokatodi se dešava fotoelektricni efekat kod koga foton svetlosti izbija elektron. Pošto se na fotokatodi formira lik predmeta, to ce oni delovi lika koji su više osvetljeni imati vecu koncentraciju fotona na fotokatodi. Na osnovu fotoelektricnog efekta, na tim mestima ce biti generisan veci broj elektrona. Svi generisani elektroni ulaze u pajacavacki sistem koji predstavlja slobodan prostor u pajacavacu slike, između fotokatore i elektroluminiscentnog ekrana. U tom slobodnom prostoru vlada veoma jako elektricno polje koje ubrzava elektrone i povecava im energiju. Usmeravanje elektrona ka odgovarajućoj tacki na elektroluminiscentnom ekranu vrši se pomocu elektrostatickih sociva. Pored usmeravanja elektrona, elektronska sociva imaju ulogu i obrtanja lika, tako što elektron usmeravaju dijagonalno, tj. elektron koji je izašao sa dna fotokatore usmerava se na vrh elektroluminiscentnog ekrana. Elektron posle ubrzanja i povecanja sopstvene energije u pajacavackom sistemu, dolazi na elektroluminiscentni ekran gde se vrši obrnuti efekat, tj. udar elektrona izaziva svetlucanje ekrana. Što je broj upadnih elektrona na odredenu tacku elektroluminiscentnog ekrana veci, to je i svetlucanje (luminacija) te tacke ekrana veca. To znaci da što je lik predmeta na fotokatodi svetliji, to ce se generisati veci broj elektrona, koji ce generisati svetliju tacku lika na elektroluminiscentnom ekranu.

Uloga okulara je da posmatra lik koji je generisan na elektroluminiscentnom ekranu i da ga uveca po principu lupe. Elektroluminiscentni ekran se nalazi u prednjoj žižnoj ravni okulara tako da se njegov lik projektuje u beskonacnosti, odnosno paralelan snop zraka izlazi iz okulara i ulazi u oko posmatraca. Principska šema rada poja cavaca slike data je na slici 8.1.



Slika 8.1. Pajacavac slike

8.2 Osnovne komponente pajacavaca slike

Pojacavaci slike su specijalizovane vakumske elektronske cevi koje se sastoje iz sledećih osnovnih komponenti:

- fotokatode,
- pojacavackog sistema,
- elektroluminiscentnog ekrana.

Fotokatoda predstavlja veoma fini tanak sloj poluprovodnika složene strukture koji ima svojstvo spoljašnjeg fotoelektricnog efekta. Prve fotokatode su radene od kombinacije srebra oksida i cezijuma (Ag-O-Cs) i poznate su pod oznakom S-1. Najveći broj fotokatoda spada u grupu multialkalnih katoda koje su napravljene od kombinacije alkalnih metala: natrijuma (Na), kalijuma (K) i antimona (Sb). Te fotokatode se dopiraju sa malom koncentracijom cezijuma (Cs), radi smanjenja elektronskog afiniteta. Debljina multialkalnih katoda je izuzetno mala i iznosi od nekoliko desetina do nekoliko stotina nanometara.

Pojacavacki sistem se nalazi u prostoru između fotokatode i elektroluminiscentnog ekrana. U pojacavackom sistemu se koristi visok napon za povećanje energije elektrona. U okviru pojacavackog sistema nalaze se elektrostaticka ili elektromagnetska sociva, koja imaju ulogu da obrnu elektronsku sliku. To znaci, da se u pojacavackom sistemu elektroni ubrzavaju pomocu visokog napona i menjaju pravac prostiranja pomocu elektrostatickih sociva.

Elektroluminiscentni ekrani se izrađuju od sintetizovanih praškastih materijala, složene poluprovodnicke strukture, sa jasno izraženom kristalnom rešetkom. Osnovu za izradu ekrana cine jedinjenja cinka (Zn) i kadmijuma (Cd), sa sumporom (S) i selenom (Se). Njima se dodaju aktivatori, koji su u suštini male kolicine bakra (Cu) i magnezijuma (Mg), i koji formiraju centre luminiscencije. Od odnosa aktivatora zavisi i boja svetlosti koju zruci elektroluminiscentni ekran. Za pobuđivanje centara luminiscencije potrebna je visoka energija elektrona, pa je zato potrebno da se oni ubrzaju u pojacavackom sistemu pošto napuste fotokatodu.

8.3 Generacije pojacavaca slike

Razvoj pojacavaca slike poceo je krajem tridesetih godina prošlog veka i prvi primeri ovih pojacavaca korišćeni su u II svetskom ratu. Znacajan razvoj pojacavaca slike nastavljen je tokom pedesetih, šezdesetih, sedamdesetih i osamdesetih godina prošlog veka. U toku tih pedesetak godina istraživanja i razvoja definisane su pet generacija pojacavaca slike:

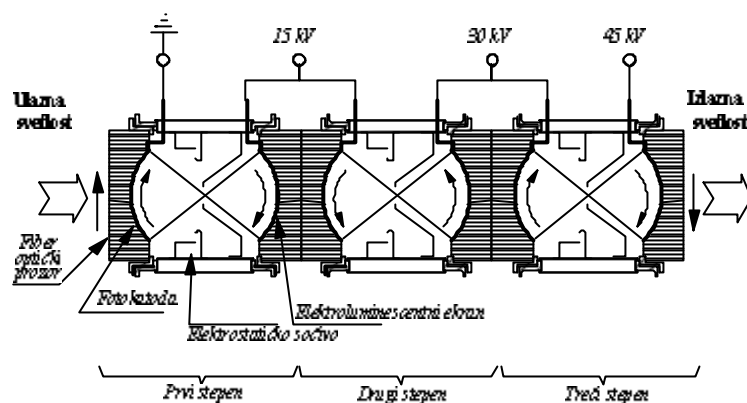
- 0 generacija,
- I generacija,
- II generacija,
- III generacija,
- IV generacija.

Prvo su pronadjeni pojacavaci slike 0 generacije, koji su u stvari pretvaraci slike. Ovi pretvaraci slike su zahtevali spoljašnji jaki izvor IC zracenja sa kojim je bilo potrebno osvetliti cilj. Uredaji koji u sebi imaju pretvarace slike nazivaju se aktivni uredaji, jer koriste posebne IC reflektore za osvetljavanje posmatranog prostora.

Pretvaraci slike imaju iste osnovne komponente kao i svi ostali pojacavaci slike. Fotokatoda je tipa S-1 (srebro – oksid – cezijumska). Ona ima veoma nisku osetljivost i visoku termalnu emisiju pa se zbog toga morao koristiti spoljni izvor IC zracenja. Fotokatoda S-1 je osetljiva u vidljivom i bliskom IC delu spektra. Ubrzanje elektrona se vrši u pojacavackom sistemu pomocu jakog elektricnog polja (radni napon od 12 do 18 kV). Elektroluminiscentni ekran je napravljen od cink – sulfida sa srednjom inercijom (tip P-20).

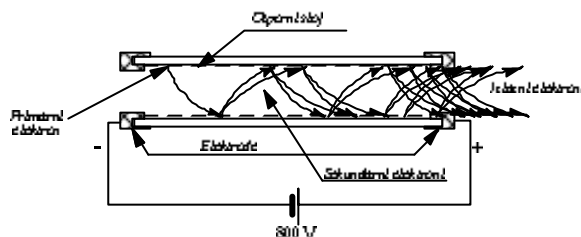
Pretvaraci slike nisu, u pravom smislu reci, pojacavaci slike, vec su pre svega pretvaraci IC zracenja u vidljivo zracenje. Pretvaraci slike i odgovarajuci aktivni uredaji u kojima su korišćeni, uvedeni su u naoružanje mnogih armija sveta, tokom pedesetih i šezdesetih godina. Danas se ovi uredaji uglavnom više ne koriste, jer se lako detektuju zbog aktivnih izvora IC zracenja (IC reflektora).

Intenzivnim istraživanjem i razvojem fotokatoda sa višom osetljivošću i nižom termalnom emisijom tokom šezdesetih godina prošlog veka, omogucen je razvoj pojacavaca slike I generacije. Glavna karakteristika novih multialkalnih fotokatoda (tipovi S-20, S-20R i S-25) je dovoljna osetljivost za prelazak na pasivni režim rada. To znaci da spoljašnji izvor IC zracenja više nije potreban, vec je dovoljno postojece zracenje od Meseca i zvezda. Pojacavacki sistem i elektroluminiscentni ekran ostali su isti, kao i kod pretvaraca slike. Ubrzanje elektrona se vrši pomocu visokog napona od 12 do 15 kV, a elektroluminiscentni ekran je od cink – sulfida. Još jedan pronalazak je obeležio razvoj pojacavaca slike I generacije. To je fiberopticki prozor koji se sastoji od nekoliko miliona optickih vlakana. Pronalazak fiberoptickog prozora je veoma bitan, jer je omogucio formiranje višestepenih (kaskadnih) pojacavaca slike. To je bilo neophodno jer se pokazalo da jednostepeni pojacavaci slike I generacije nemaju dovoljno pojacanje, pa se zato moralo vezivati dva ili tri pojacavaca slike na red, da bi se dobilo potrebno pojacanje. Veza izmedu pojedinih stepena pojacavaca slike ostvarena je preko fiberoptickog prozora. Kod višestepenih pojacavaca slike, prvi stepen mora imati najvece pojacanje, dok ostali stepeni moraju imati dobre opticke karakteristike. Ako se želi obrtanje lika, pojacavaci slike I generacije moraju biti ili jednostepeni, ili trostepeni. Trostepeni pojacavac slike I generacije prikazan je na slici 8.2.



Slika 8.2. Trostepeni pajacavac slike I generacije

Pojacavaci slike II generacije su nastali daljim tehnološkim razvojem pojacavaca slike. Glavni napredak je primena mikrokanalne plovice koja se sastoji od 6 do 7 miliona staklenih cevica precnika 10 do 12 μm . Na zidovima staklenih cevica nalazi se specijalni otporni sloj koji je izvor sekundarnih elektrona. Princip rada mikrokanalne plovice je sledeci: Elektroni koji ulaze u cevce pogadaju zidove cevce i izbijaju sekundarne elektrone. Pod dejstvom visokog napona (800V) ovi elektroni prolaze kroz cevicu i izbijaju nove elektrone i, na taj nacin, izazivaju efekat lavine. Šematski princip rada mikrokanalne plovice prikazan je na slici 8.3.



Slika 8.3. Princip rada mikrokanalne plovice

Mikrokanalna ploca ima osobinu da cuva prostornu informaciju i da pri tome povecava broj elektrona na izlasku iz mikrokanalne plovice, odnosno pojacava ulazni signal. Debljina mikrokanalne plovice je 0.5 mm. Primena mikronalne plovice omogucava:

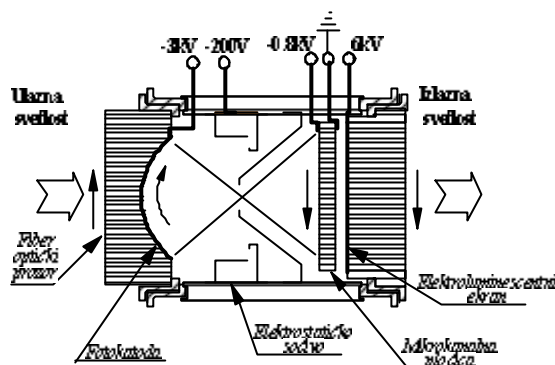
- znatno uprošćenje konstrukcije i smanjenje gabarita pojacavaca slike. Više nisu potrebni višestepeni pojacavaci slike, vec je dovoljan jednostepeni pojacavac slike;
- vecu otpornost na smetnje. Iznenadna pojava jakog tackastog izvora svetlosti u vidnom polju sprave, više ne dovodi do gubitka slike na celom elektroluminiscentnom ekranu, vec je zasícenje ograniceno na mali deo ekrana. To je zbog toga što tackasti izvor svetlosti pokriva mali broj cevica mikrokanalne plovice.

Postoje dva tipa pojacavaca slike II generacije:

- sa obrtanjem slike,
- sa blizinskim fokusiranjem.

Pojacavaci slike II generacije sa obrtanjem slike su slicni pojacavacima slike I generacije. Objektiv formira lik predmeta na multialkalnoj fotokatodi. Elektroni koji se emituju sa fotokatore se ubrzavaju i fokusiraju na mikrokanalnoj plovcici pomocu

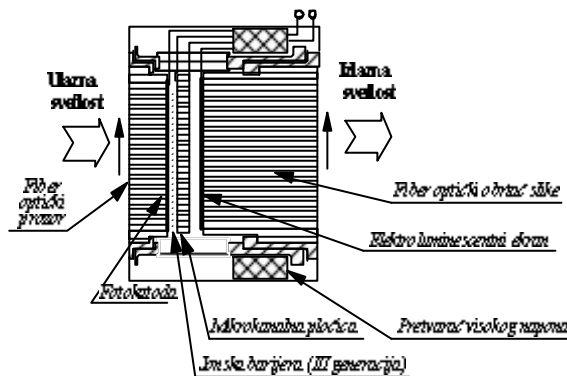
elektrostatickih sociva u pojacavackom sistemu. Mikrokanalna plocica se nalazi neposredno ispred elektroluminiscentnog ekrana. Posle pojacanja na mikrokanalnoj plocici, elektroni pogadaju elektroluminiscentni ekran i formiraju uspravan lik, koji se može posmatrati sa okularom. Šematski prikaz pojacavaca slike II generacije sa obrtanjem slike dat je na slici 8.4.



Slika 8.4. Pajacavac slike II generacije sa obrtanjem slike

Sa slike 8.4 se vidi da je radni napon na fotokatodi 3kV, dok je radni napon na elektroluminiscentnom ekranu 6 kV. To je znatno manji napon nego na pajacavacima slike I generacije.

Pojacavaci slike sa blizinskim fokusiranjem omogućili su dalje uprošćavanje pojacavaca slike i smanjenje njihovih dimenzija. Kod ovih pojacavaca slike mikrokanalna plocica se nalazi na rastojanju od nekoliko desetih delova milimetra od fotokatode koja je ravna. Kod svih prethodnih pojacavaca slike fotokatoda je imala sferni oblik, jer su se na taj nacin korigovali nedostaci u elektrostatickom fokusiranju elektrona (neravnomernost u rezoluciji slike, velika distorzija). Zbog malog rastojanja izmedu fotokatode i mikrokanalne plocice potreban napon za ubrzanje elektrona je smanjen na 200V. Da bi ovaj pojacavac slike formirao obrnuti lik koristi se fiberopticki obrtac slike koji se nalazi iza elektroluminiscentnog ekrana. Šematski prikaz pojacavaca slike II generacije sa blizinskim fokusiranjem dat je na slici 8.5.



Slika 8.5. Pajacavac II generacije sa blizinskim fokusiranjem

Radni napon na mikrokanalnoj plocici i elektroluminiscentnom ekranu kod pojacavaca slike II generacije sa blizinskim fokusiranjem je isti kao i kod pojacavaca slike II generacije sa obrtanjem slike.

Pojacavaci slike III generacije su rezultat daljeg tehnološkog razvoja pojacavaca slike II generacije sa blizinskim fokusiranjem. Dva bitna tehnološka napretka su uvedena kod pojacavaca slike III generacije. Prvi je uvođenje fotokatode se negativnim izlaznim radom na bazi elemenata iz III i V grupe periodnog sistema Mendeljejeva, drugi je uvođenje jonske barijere.

Nova fotokatoda na bazi galijum arsenida (GaAs) ima znatno povecanu osetljivost, narocito u bliskom IC delu spektra, u odnosu na fotokatode pojacavaca slike I i II generacije. Druga veoma bitna karakteristika je tehnološki napredak u smanjenju precnika cevica prilikom proizvodnje mikrokanalne plocice. Kod II generacije precnik cevica je bio 10 do 12 μm , dok kod III generacije precnik cevica je 6 μm . To omogucava pojacavacima slike III generacije vecu rezoluciju i veci domet.

Kod pojacavaca slike II generacije sa blizinskim fokusiranjem javio se problem oštećivanja fotokatode jonima sa mikrokanalne plocice. To je bilo moguće jer se mikrokanalna plocica nalazi veoma blizu fotokatode (na nekoliko desetih delova milimetra), pa su joni lako mogli da predu sa mikrokanalne plocice na fotokatodu. U pojacavacima slike III generacije uvodi se jonska barijera, koja je izvedena nanošenjem tankog sloja aluminijum oksida (Al_2O_3), cija je uloga zaštita fotokatode od erozije. Jonska barijera funkcioniše tako što propušta elektrone se fotokatode na mikrokanalnu plocicu, dok zaustavlja jone sa mikrokanalne plocice ka fotokatodi. Zbog potrebe elektrona da savladavaju jonsku barijeru napon između fotokatode i mikrokanalne plocice je podignut sa 200 V na 800 V. Svi ostali radni naponi su isti kao i kod pojacavaca slike II generacije sa blizinskim fokusiranjem. Principijalna šema pojacavaca slike III generacije je ista kao i za pojacavac slike II generacije sa blizinskim fokusiranjem i dodatkom jonske barijere i data je na slici 8.5.

Pojacavaci slike IV generacije su rezultat daljeg tehnološkog razvoja pojacavaca slike III generacije i razvijeni su krajem devedesetih godina prošlog veka. Pojacavaci slike III generacije uveli su jonsku barijeru da bi se sacuvala fotokatoda od erozije, medutim uvođenje jonske barijere smanjilo je maksimalnu rezoluciju pojacavaca slike, a samim tim i maksimalni domet pasivne nišanske sprave. Pošto se težilo postizanju maksimalne rezolucije pojacavaca slike bilo je jasno da se jonska barijera mora izbaciti. Izbacivanje jonske barijere je postalo moguće, tek kad je tehnologija proizvodnje mikrokanalnih cevica dovoljno napredovala da je uspela da proizvede materijal za proizvodnju mikrokanalnih cevica, koji nije generisao jone koji su oštećivali fotokatodu.

Pojacavaci slike IV generacije imaju mogucnost da rade u svim svetlosnim uslovima od zore i ranog sumraka do oblacne noci bez mesecine. Tek kod pojacavaca slike IV generacije iznenadna pojava jakog izvora svetlosti ne smeta za potpuno formiranje slike. To je postignuto izmenom nacina napajanja fotokatode pojacavaca slike. Tradicionalno kod svih pojacavaca do IV generacije napajanje fotokatode se vršilo jednosmernom strujom. Kod pojacavaca slike IV generacije napajanje fotokatode strujom se vrši takode jednosmernom strujom ali koja pulsira, odnosno napajanje fotokatode se veliki broj puta ukljucuje i iskljucuje. Što više svetlosti (fotona) dolazi na fotokatodu to se napajanje fotokatode češće iskljucuje, pa samim tim fotokatoda generiše manje elektrona koji dolaze na mikrokanalnu plocicu. Kao što se može videti napajanje fotokatode je povezano sa kolicinom svetlosti (fotona) koji dolaze na fotokatodu.

Glava 9

Laseri

9.1 Fizički princip laserskog zracenja

Sama rec laser je skracenica i znaci Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation – pojacanje svetlosti pomocu stimulisane emisije zracenja. Za razliku od vidljive svetlosti lasersko zracenje je monohromatsko, koherentno (prostorno i vremenski) i strogo kolimisano i polarizovano. U osnovi procesa laserskog zracenja nalazi se proces stimulisane, prinudno indukovane emisije svetlosti.

Da bi se u potpunosti razumeo fizički princip laserskog zracenja potrebno je detaljno poznavanje kvantne mehanike. Poznato je da se atom sastoji iz atomskog jezgra i elektronskog omotaca. Svaki atom sadrži određenu kolicinu unutrašnje energije koja je strogo kvantizirana, odnosno, unutrašnja energija atoma može imati samo određene, strogo definisane vrednosti. Po prirodnim zakonima, svaki atom teži da bude u stanju sa minimumom unutrašnje energije. To stanje se naziva osnovno ili ne pobudeno stanje. Moguce je da se atom nade i u stanju sa višom unutrašnjom energijom. To stanje se naziva pobudeno stanje i atom teži da se vrati u osnovno stanje.

Energija atoma koja odgovara optickom delu spektra je, u suštini, sadržana u njegovom elektronskom omotacu. Elektroni iz tog elektronskog omotaca mogu da zauzimaju samo tacno određene orbite, koje određuju energetski nivo celog atoma. U osnovnom stanju, elektroni se u atomu nalaze na najnižim energetskim orbitama. U pobudenom stanju, jedan ili više elektrona u atomu se nalazi na višim energetskim orbitama. Svaki pobudeni atom teži da prede sa višeg energetskog nivoa na niži energetski nivo, tako što ce elektron da se spusti sa više energetske orbite na nižu energetske orbitu, i pri tome da emituje foton cija je energija jednaka razlici energija posmatranih orbita.

Razmotrimo prvo primer iz svakodnevnog života, a to je sijalica sa usijanim volframovim vlaknom. Ona predstavlja izvor obicne bele svetlosti kod koje se energija dovodi, strucno se kaže pumpa, u atome volframa koji se dovode u pobudeno stanje. Pobudeni atomi teže da se vrata u osnovno stanje tako što spontano (bez spoljne prisile) emituju apsorbovanu energiju u vidu fotona, koji ima potpuno slucajan pravac. Moguce je primetiti da se pobudeni atomi volframa nezavisno jedan od drugog vracaju u osnovno stanje. To znaci da emitovani fotoni nisu u fazi, odnosno da nemaju nikakvu faznu zavisnost i da je emitovana svetlost nekoherentna bela svetlost koju vidimo.

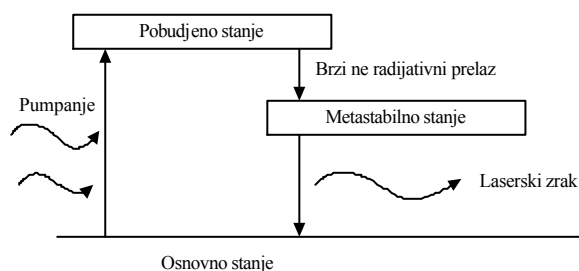
Drugi bitan efekat za razumevanje rada lasera je stimulisana emisija zracenja, koju je opisao Albert Einstein, 1917. godine. Ako atom pogodi foton sa dovoljno visokom energijom, tada atom može da apsorbuje foton i prede u pobudeno stanje (više energetske stanje). Atom teži da se vrati u niže energetske stanje (koje ne mora neophodno da bude osnovno stanje) pomocu emisije fotona na jedan od dva moguca nacina. Jedan od nacina je spontano emitovanje fotona, dok je drugi emitovanje fotona na osnovu prisustva

elektromagnetnog zračenja odgovarajuće frekvencije. Ovaj drugi način emitovanja fotona naziva se stimulisana emisija i predstavlja osnovni fizički princip laserskog zračenja.

Važno je primetiti da emitovani foton doprinosi povećanju gustine fluksa elektromagnetnog zračenja koje je dovelo do emitovanja tog fotona. Budući da se većina atoma nalazi u osnovnom stanju, velika je verovatnoća da će emitovani foton ponovo biti apsorbovan i da neće izazvati stimulisanu emisiju novih fotona. Međutim, ako bi na neki način uspešli da veliki broj atoma dovedemo u pobuđeno stanje, a samim tim ostane mali broj atoma u osnovnom stanju, tada bi emitovani foton sa odgovarajućom frekvencijom izazvao pojavu većeg broja fotona koji bi bili u fazi sa njim. To je tzv. efekat lavine, gde jedan foton izaziva pojavu stimulisane emisije većeg broja fotona. Populacija atoma koji su dovedeni u pobuđeno stanje naziva se populaciona inverzija. Ako je moguće dovodenjem spoljne energije održavati populacionu inverziju, tada će stimulisana emisija fotona biti sve snažnija i, u jednom trenutku, formiraće se snop izuzetno snažne monohromatske i koherentne svetlosti.

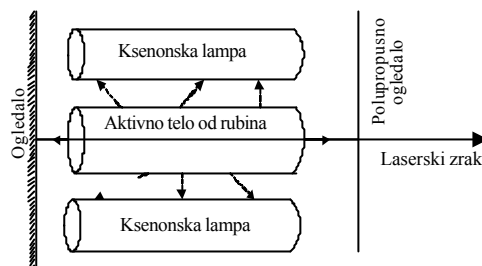
Osnovni problem kod projektovanja lasera je pronalaženje odgovarajuće supstance, koja dozvoljava formiranje populacione inverzije. Prvi materijal sa kojim je uspešno formirana populaciona inverzija i formiran laserski sistem je sintetički rubin. Rubin je kristal aluminijuma (Al_2O_3), kod koga je manji deo aluminijumovih jona Al^{3+} zamenjen sa jonima hroma Cr^{3+} . Joni hroma daju rubinu karakterističnu crvenu boju i oni se koriste za formiranje populacione inverzije u rubinskom laseru. U rubinskom laseru, šipka rubina se osvetljava intenzivnim bljeskovima ksenonske lampe. Joni hroma upijaju zelenu i plavu svetlost lampe i povećavaju energiju elektrona sa osnovnog nivoa u visoko pobuđeno stanje. Elektroni iz tog visokopobuđenog stanja veoma brzo prelaze u metastabilno stanje, koje je takođe pobuđeno stanje. Taj prelaz je ne radijativni, odnosno ne zrači se nikakva svetlosna energija, već se energija oslobađa rasipanjem toplotne energije koja zagreva šipku rubina. Osnovna karakteristika metastabilnog stanja je da ima dosta dugacko vreme života (oko 4 milisekunde). Ovo dugacko vreme života omogućava da veliki deo (više od polovine) jona hroma pređe u metastabilno stanje i na taj način, formira se populaciona inverzija, koja je neophodna da bi stimulisana emisija fotona mogla da savlada apsorpciju i dovede do pojacanja svetlosti.

Pojedini joni hroma će na spontani način preći iz metastabilnog stanja u osnovno stanje i pri tome će emitovati fotone na talasnoj dužini od 694.3 nm, što odgovara crvenoj boji u vidljivom delu spektra. Ti emitovani fotoni će pomoću stimulisane emisije, u interakciji sa metastabilnim jonima hroma, proizvesti nove fotone, na istoj talasnoj dužini. Važno je primetiti da svaki foton koji reaguje sa jonima hroma u metastabilnom stanju proizvodi dva nova fotona i na taj način se stvara efekat lavine. Graficki prikaz opisanog procesa dat je na slici 9.1.



Slika 9.1. Princip rada trostepenog lasera

Da bi se dobio jak impuls laserskog zracenja potrebno je pored rešenja pojacanja zracenja pomocu stimulisane emisije fotona, rešiti i problem pozitivne povratne sprege. To se reševa pomocu sledece principijalne šeme prikazane na slici 9.2.



Slika 9.2. Principijalna šema laserskog sistema

Kao što se sa slike 9.2 može videti, ksenonska lampa služi za pumpanje energije u štapic od rubina i prevodenje jona hroma u metastabilno stanje. Joni hroma na osnovu stimulisane emisije pocinju da emituju fotone u svim pravcima. Međutim, samo fotoni koji su emitovani duž ose štapica od rubina se odbijaju od sistema ogledala (dva ogledala) i na taj nacin se dodatno pojacavaju. Kada se zrak dovoljno pojaca polupropusno ogledalo propušta zrak van laserskog sistema. U tom trenutku je stvoren laserski impuls koji izlazi van sistema.

9.2 Osnovne komponente laserskog sistema

Da bi laserski sistem mogao da funkcioniše on mora da se sastoji iz sledećih osnovnih komponenti:

- aktivnog tela,
- sistema za pobuđivanje,
- rezonatorskog sistema.

Uloga aktivnog tela je da generiše veliki broj fotona pomocu stimulisane emisije, koji ce biti u fazi i kretace se u istom smeru. To se postiže preko populacione inverzije, kao što je opisano u prethodnom poglavlju.

Uloga sistema za pobuđivanje je pumpanje energije u aktivnom telu i njegovo dovodenje u metastabilno stanje sa populacionom inverzijom.

Uloga rezonatorskog sistema je pojacanje emisije fotona pomocu formiranja pozitivne povratne sprege. Rezonatorski sistemi se najčešće prave od ogledala koja reflektuju fotone i, na taj nacin, vraćaju ih u aktivno telo, koje pomocu stimulisane emisije generiše nove fotone.

9.3 Primena lasera

Laseri se danas primenjuju u mnogim oblastima ljudske delatnosti od medicine, do kosmonautike, automatike i robotike. Laseri takode imaju veliku primenu i u vojnoj tehnici.

Vojna primena lasera je mnogobrojna. Laseri se uglavnom koriste za:

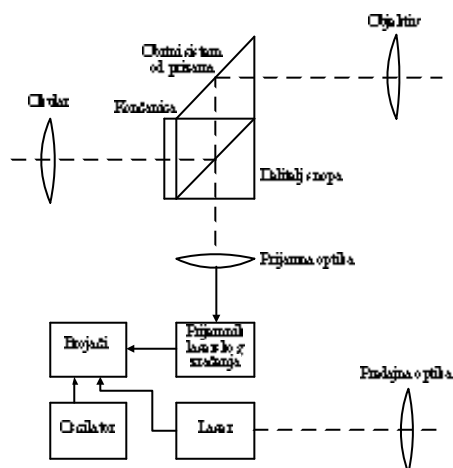
- sisteme za upravljanje vatrom,

- sisteme za navigaciju,
- merenje daljine.

Ovde će detaljnije biti opisana primena lasera u sistemima za merenje daljine – impulsnim laserskim daljinomerima. Impulsni laserski daljinomer je zasnovan na merenju vremena, koje je potrebno laserskom zraku da pređe put do cilja i da se po odbijanju od cilja vrati u prijemnik laserskog zracenja. Impulsni laserski daljinomer se sastoji od sledećih osnovnih komponenti:

- teleskopskog sistema, koji služi za osmatranje terena i uocavanje cilja do koga se želi izmeriti daljina. On takode služi za prihvatanje laserskog zracenja, odbijenog od cilja. Teleskopski sistem se sastoji od objektiva, obrtnog sistema od prizama, koncanice i okulara. U sklopu obrtnog sistema od prizama nalazi se i deljitelj snopa koji ima ulogu da razdvoji vidljivo zracenje od laserskog zracenja. Vidljivo zracenje se upucuje preko koncanice u okular teleskopskog sistema, dok se lasersko zracenje upucuje preko prijemne optike na prijemnik laserskog zracenja;
- lasera sa predajnom optikom. Laser služi za formiranje laserskog impulsa koji ima visoku snagu zracenja i malu divergenciju. Standardno rastojanje do koga se meri daljina je 10 do 20 km. Za tako velika rastojanja potrebno je dodatno smanjiti divergenciju laserskog snopa. To se obicno radi pomocu predajne optike koja se najčešće projektuje kao Galilejev teleskopski sistem;
- bloka elektronike, koji se sastoji iz brojaca i oscilatora. Brojac služi za merenje vremena koje je proteklo od trenutka kada je laserski snop napustio laser, do trenutka kada je reflektovani laserski snop stigao u prijemnik laserskog zracenja. Oscilator služi za davanje takta brojacima da bi oni mogli pravilno da mere proteklo vreme.

Principijelna šema impulsnog laserskog daljinomera prikazana je na slici 9.3.



Slika 9.3. Principijelna šema impulsnog laserskog daljinomera

Princip rada impulsnog laserskog daljinomera je sledeći: Kada operator pritisne dugme za merenje daljine, startuje se laser koji generiše laserski impuls. U trenutku kada laserski impuls napusti laser, tj. prođe kroz polupropusno ogledalo, na laseru startuje se brojac vremena. Brojac vremena se zaustavlja u trenutku kada laserski impuls, odbijen od cilja, dospe do prijemnika laserskog zracenja.