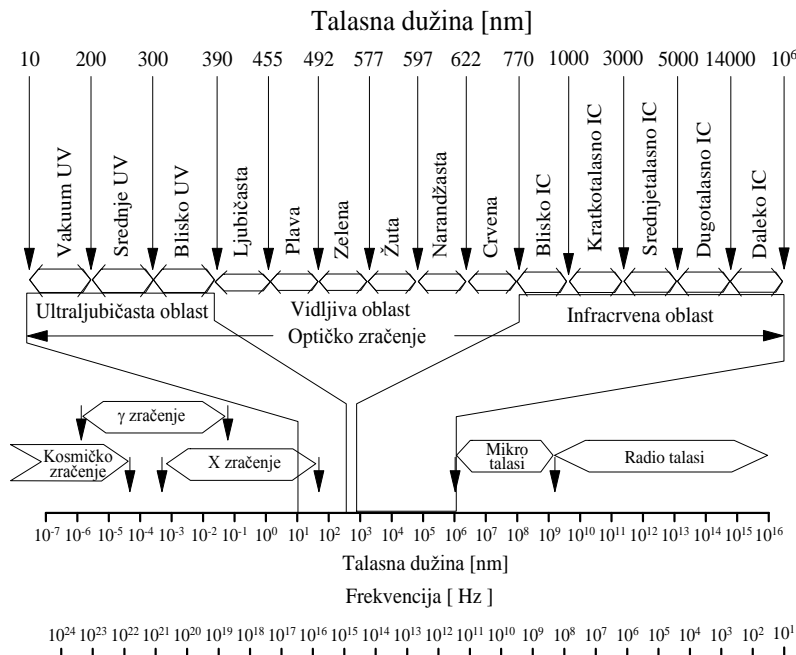


Teorije svetlosti i geometrijska optika

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. Kompletan elektromagnetni spektar prikazan je na slici 1.1 i sastoji se od:

- kosmičkog zračenja,
- γ zračenja,
- X zračenja,
- ultravioletnog zračenja,
- vidljivog zračenja ili vidljive svetlosti,
- infracrvenog zračenja,
- mikro talasa,
- radio talasa.



Slika 1.1. Elektromagnetni spektar

Osnovne karakteristike svih elektromagnetnih zračenja su da:

- prenose energiju,
- imaju konstantnu brzinu prostiranja u vakuumu koja iznosi $2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

U svim ostalim aspektima osobine elektromagnetnog zračenja veoma variraju zbog ogromnih razlika u talasnim dužinama. U delu elektromagnetnog spektra sa kratkim talasnim dužinama (kosmički zraci, γ zraci i X zraci) zračenje ima dominantno čestičnu (korpuskularnu) prirodu, dok u delu elektromagnetnog spektra sa velikim talasnim dužinama (radio talasi) zračenje ima dominantnu talasnu prirodu. Budući da se zračenje interesantno za optiku (ultraljubičasto, vidljivo i infracrveno) nalazi na sredini elektromagnetnog spektra, nije neobično što ono pokazuje kako talasnu prirodu tako i čestičnu prirodu u zavisnosti od posmatrane pojave.

Optičko zračenje je deo elektromagnetnog spektra, prostire se od 10 nm do 1 mm i njegovi delovi su:

- 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.

Podela i karakteristike optičkog zračenja koje zavise od talasne dužine zračenja date su u Tabeli 1.1:

Tabela 1.1. Podela i karakteristike optičkog zračenja

Naziv	Talasna dužina	Karakteristike
Vakuum UV zračenje	10 – 200 nm	Nevidljivo zračenje za golo ljudsko oko. Ne koristi se u vojnim sistemima.
Srednje UV zračenje	200 – 300 nm	Nevidljivo zračenje za golo ljudsko oko. Sunčevo zračenje, u ovom delu UV spektra, apsorbuje ozonski omotač.
Blisko UV zračenje	300 – 390 nm	Nevidljivo zračenje za golo ljudsko oko.
Vidljivo zračenje	390 – 770 nm	Vidljivo zračenje za golo ljudsko oko. Rasejano i reflektovano sunčevo zračenje omogućava jasan kontrast između pozadine i posmatranog objekta.
Blisko IC zračenje	770 – 1000 nm	Rasejano i reflektovano zračenje meseca, zvezda i neba omogućava jasan kontrast između pozadine i posmatranog objekta kada se koriste pasivni uređaji sa pojačavačima slike
Kratkotalasno IC zračenje	1–3 μm	Nevidljivo zračenje za golo ljudsko oko. “Toplotno zračenje”. Karakteristična primena je detekcija toplih delova aviona kao što je npr. motor.
Srednjetalasno IC zračenje	3–5 μm	Nevidljivo zračenje za golo ljudsko oko. Proizvodi sagorevanja (CO_2) zrače u ovom delu spektra. Pogodno za detekciju toplih delova na hladnoj pozadini sa termovizijom.
Dugotalasno IC zračenje	8–14 μm	Nevidljivo zračenje za golo ljudsko oko. Topli delovi na posmatranom objektu lako se uočavaju na hladnoj pozadini pomoću termovizije.
Daleko IC zračenje	14 μm – 1 mm	Nevidljivo zračenje za golo ljudsko oko. Zbog jake atmosferske apsorpcije nema vojnih primena u oblasti dalekog IC zračenja.

1.2 Domen geometrijske optike

Geometrijska optika proučava ponašanje i osobine zraka svetlosti. Svetlosni zrak je fizička apstrakcija u smislu da, kao i sve ostale apstrakcije kojima se bavi fizika, predstavlja samo deo ili jedan aspekt fizičke realnosti. Cilj fizike je da formuliše opšte zakone koji omogućavaju da se predvide rezultati eksperimenata. Fizički svet, posmatran u celini, je previše komplikovan da bi se njime bavili i zato, ako se želi da se formuliše bilo šta korisno ili inteligentno, potrebno je ograničiti se na zakone koji se bave apstrakcijama.

Geometrijska optika je aproksimacija elektromagnetne teorije svetlosti. Proučavanje geometrijske optike je opravdano činjenicom da ona omogućava da se naprave veoma tačne i korisne pretpostavke o svetlosti. Teorije geometrijske optike su glavni alat u projektovanju optičkih instrumenata. U ovom udžbeniku se geometrijska optika posmatra kao grana fizike i kao alat za projektovanje optičkih instrumenata.

1.3 Paraksijalna ili Gaussova optika

Postoji još jedna korisna aproksimacija koja se može uvesti prilikom proučavanja većine optičkih sistema, a to je da se pretpostavi da svi zraci leže blizu ose optičkog sistema. Ova aproksimacija je poznata kao paraksijalna ili Gaussova optika. Moglo bi se pretpostaviti da je paraksijalna optika previše velika aproksimacija i da ona ne može biti od velike koristi. Međutim, ona omogućava jednostavno određivanje glavnih osobina optičkog sistema i nezamenljivo je sredstvo u ranim fazama projektovanja optičkih sistema.

1.4 Optički sistem

Optički sistem se sastoji od skupa optičkih komponenti kao što su sočiva, prizme, ogledala, plan paralelne ploče i klinovi koji su projektovani tako da pomoću prelamanja i odbijanja svetlosti obave određene, tačno definisane optičke funkcije. Optičke komponente javljaju se u velikom broju različitih uređaja za posmatranje, merenje, kontrolu, snimanje. Uobičajeno je da se sistemi čije funkcionisanje zavisi od optičkih fenomena ili osobina svetlosti nazivaju optički sistemi. Primeri takvih sistema mogu se pronaći u različitim oblastima ljudske aktivnosti. Među najpoznatije optičke sisteme spadaju: mikroskopi, teleskopi, fotografske i filmske kamere, filmski projektori, interferometri, spektrometri. Optički sistemi koji koriste lasersko zračenje se sve više koriste u modernoj tehnologiji, medicini, fizici, telekomunikacijama.

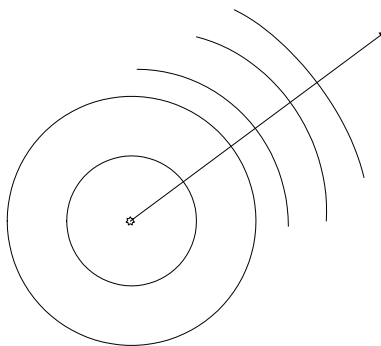
Prema položaju predmeta i lika optički sistemi se dele na četiri klase sistema:

- mikroskopi, kod kojih se predmet nalazi na konačnom rastojanju od optičkog sistema, a lik se nalazi u beskonačnosti,
- teleskopi, kod kojih se i predmet i lik nalaze u beskonačnosti,
- objektivni, kod kojih se predmet nalazi u beskonačnosti, a lik se formira na konačnom rastojanju od optičkog sistema,
- projekcioni sistemi, kod kojih se i predmet i lik nalaze na konačnom rastojanju od optičkog sistema.

Važno je primetiti da postoje optički sistemi koji ne formiraju lik predmeta. Takvi optički sistemi služe za preraspodelu svetlosne energije tako da se proizvede podjednaka osvetljenost posmatrane oblasti. Oni su namenjeni za osvetljenje i za određene fotometrijske i fotoelektrične instrumente.

1.5 Definicija zraka svetlosti i indeksa prelamanja

Ako se posmatraju svetlosni talasi koji se zrače iz tačkastog izvora u vakuumu, kao što je pokazano na slici 1.2, jasno je da je svaki talasni front sfernog oblika, sa radijusom krivine koji raste kako se talasni front udaljava od tačkastog izvora zračenja. Na dovoljnom rastojanju od tačkastog izvora zračenja radijus krivine talasnog fronta može se smatrati beskonačnim i takav talasni front se naziva ravnim talasom.



Slika 1.2. Prostiranje svetlosnih talasa i zraka

Ako se prati putanja hipotetičke tačke na površini talasnog fronta za vreme njegovog prostiranja može se uočiti da tačka putuje po pravoj liniji. Sa slike 1.2 može se videti da putanja hipotetičke tačke 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.

Rastojanje između dva susedna talasa je talasna dužina zračenja. Brzina prostiranja svetlosnih talasa u vakuumu 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 vakuumu i zavisi od talasne dužine. Odnos brzine svetlosti u vakuumu 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 vakuumu,

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 vakuumu.

1.6 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 kraća. 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 zrakova. Osnovni aksiomi geometrijske optike su:

- svetlost se prostire pravolinjski, 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.

1.6.1 Snell – Descartesov zakon

Snell – Descartesov zakon definiše pojave prelamanja svetlosti na graničnoj površini i odbijanja svetlosti od granične površine. Prelamanje svetlosti na graničnoj površini kao pojava bila je poznata još Aristotelu (350. god. pre nove ere). Poznati astronom Ptolomej (120. god. nove ere), radi postavljanja kvalitativnog zakona prelamanja svetlosti, preduzeo je merenje upadnog i prelomnog ugla. Podaci merenja koje je on vršio bili su vrlo tačni. Međutim, ova su se merenja odnosila na relativno male uglove, pa je radi toga došao do netačnog zaključka o proporcionalnosti između upadnog ugla i ugla prelamanja. Tačnu formulaciju zakona prelamanja dao je Willebrord Snell van Rayen (1591–1626. god), profesor fizike i matematike na Univerzitetu u Leydenu, Holandija, koji je u svom neobjavljenom delu naveo da odnos kosekansa upadnog ugla i ugla prelamanja ostaje konstantan.

Zakon prelamanja, kakav mi danas poznajemo, objavio je René Descartes (1596–1650. god) francuski matematičar, fizičar i filozof, 1637. god. Međutim, nije poznato da li je on znao za Snellove radove pa se radi toga zakon u literaturi naziva Snell – Descartesov zakon.

Radi objašnjenja Snell – Descartesovog zakona potrebno je posmatrati ravne talasne frontove koji upadaju na ravnu površinu, koja deli dve sredine sa indeksima prelamanja n_1 i n_2 , kao što je prikazano na slici 1.3. Svetlost se prostire od vrha slike nadole i prilazi graničnoj površini pod uglom. Paralelne linije predstavljaju položaje talasnog fronta u određenim intervalima vremena. Indeks prelamanja gornje sredine označen je sa n_1 , a donje sredine sa n_2 . Na osnovu jednačine (1.1) brzina svetlosti u gornjoj sredini je $v_1 = c/n_1$, a u donjoj sredini je $v_2 = c/n_2$.

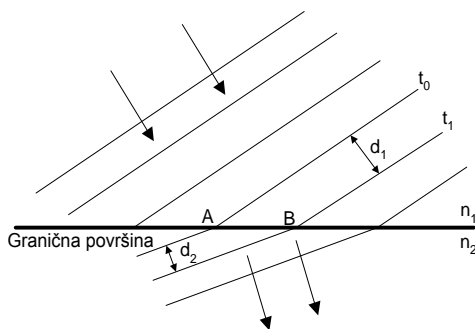
U trenutku t_0 , talasni front preseca graničnu površinu u tački A, a u trenutku $t_1 = t_0 + \Delta t$, talasni front preseca graničnu površinu u tački B. Za vreme Δt talasni front je prešao rastojanje

$$d_1 = v_1 \cdot \Delta t = \frac{c}{n_1} \cdot \Delta t, \quad (1.3a)$$

u gornjoj sredini, i rastojanje

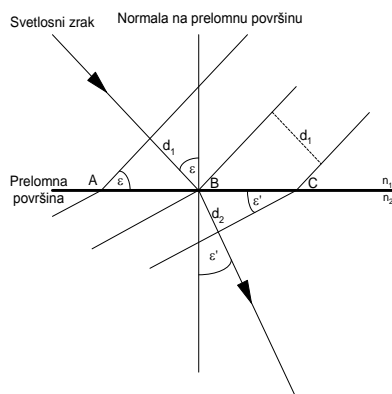
$$d_2 = v_2 \cdot \Delta t = \frac{c}{n_2} \cdot \Delta t, \quad (1.3b)$$

u donjoj sredini.



Slika 1.3. Ravni talasni front prolazi kroz granicu između dve optičke sredine sa različitim indeksima prelamanja

Na slici 1.8, pored prostiranja talasa ucrtan je i zrak koji predstavlja putanju proizvoljne tačke na talasnom frontu koja prolazi kroz tačku B na graničnoj (prelomnoj) površini. Ako linije na slici 1.4 predstavljaju položaje talasa u jednakim intervalima vremena tada rastojanja između preseka talasa AB i BC moraju biti jednaka. Ugao između talasnog fronta i prelomne površine je jednak uglu između zraka i normale na prelomnu površinu (uglovi sa normalnim kracima).



Slika 1.4. Definicija Snell – Descartesovog zakona

Sa slike 1.4 rastojanja AB i BC mogu se definisati kao

$$AB = \frac{d_1}{\sin \varepsilon} \quad , \quad BC = \frac{d_2}{\sin \varepsilon'} \quad (1.4)$$

Ako se veličine d_1 i d_2 , definisane jednačinom (1.3), zamene u jednačinu (1.4) dobija se

$$\frac{c \cdot \Delta t}{n_1 \cdot \sin \varepsilon} = \frac{c \cdot \Delta t}{n_2 \cdot \sin \varepsilon'} \quad (1.5)$$

Sređivanjem jednačine (1.5) dobija se

$$n_1 \cdot \sin \varepsilon = n_2 \cdot \sin \varepsilon' \quad (1.6)$$

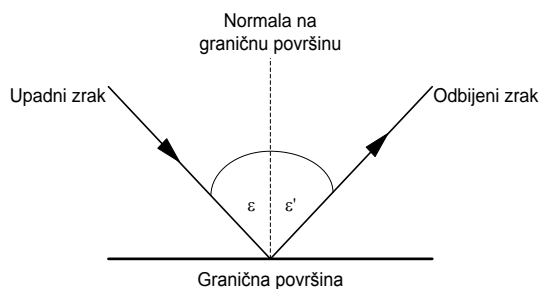
Jednačina (1.6) predstavlja matematičku formulaciju Snell – Descartesovog zakona i osnovnu jednačinu pomoću koje se proračunava prolaz svetlosnih zraka kroz optički sistem. Snell – Descartesov zakon se rečima može formulisati na sledeća dva načina:

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

Pojava odbijanja (refleksije) može se definisati kao poseban slučaj prelamanja, jer zrak posle odbijanja od granične površine ostaje u istoj sredini, pa se jednačina (1.6) uprošćava u oblik

$$\varepsilon = -\varepsilon' \quad (1.7)$$

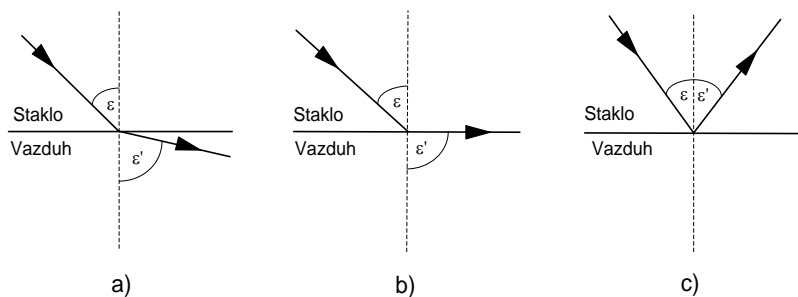
Grafički prikaz odbijanja zraka dat je na slici 1.5.



Slika 1.5. Odbijanje (refleksija) zraka

1.6.2 Potpuna unutrašnja refleksija

Neka zrak svetlosti dolazi iz stakla sa indeksom prelamanja $n = 1.5$ na graničnu površinu staklo vazduh, kao što je prikazano na slici 1.6.



Slika 1.6. Potpuna unutrašnja refleksija

Prelomni ugao se računa po Snell – Descartesovom zakonu. Za upadni ugao $\varepsilon = 40^\circ$ prelomni ugao je $\varepsilon' \approx 75^\circ$ (slika 1.6,a). Kada upadni ugao poraste na $\varepsilon = 41.8^\circ$, tada $\sin \varepsilon'$ postaje jedinica i prelomni zrak se prostire duž granične površine staklo – vazduh (slika 1.6,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 granične površine staklo vazduh i vraća nazad u staklo (slika 1.6,c). Ovaj fenomen se naziva potpuna unutrašnja refleksija, a upadni ugao ε za koji je $\sin \varepsilon' = 1$, 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 izrači kao toplota.

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

1.7 Konvencije u optici

Optički sistem se sastoji od skupa optičkih komponenti kao što su sočiva, prizme, ogledala, plan paralelne ploče. Svaka optička komponenta ograničena je površinama različitog oblika koje mogu biti međusobno različito postavljene. Ako su centri optičkih površina postavljeni na nekoj

pravoj takav optički sistem se naziva centrirani sistem. Prava, koja sjedinjuje sve centre sfernih površina naziva se optička osa sistema. Ravan, koju grade optička osa sistema i tačka predmeta koja ne leži na optičkoj osi naziva se meridionalna ravan. Jasno je da ovakvih ravni ima beskonačno mnogo. Ako optički sistem u svim meridionalnim ravnima ima jednake osobine tada se takav optički sistem naziva sistem kružne simetrije. Ravan normalna na meridionalnu ravan naziva se sagitalna ravan. Optički sistem koji u dve uzajamno normalno postavljene ravni ima različite osobine je sistem sa dvostrukom simetrijom.

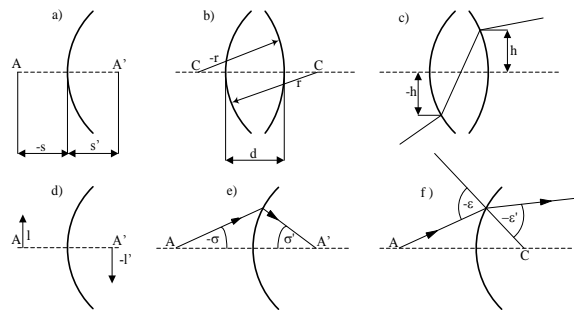
Centrirani optički sistem sastavljen od k graničnih površina (obeleženi od 1 do k), koje dele sredine sa različitim indeksima prelamanja sadrži $k+1$ sredinu. Optički prostor je moguće podeliti na dva dela: realni prostor, koji odgovara realnoj fizičkoj sredini i virtuelni prostor (imaginarni prostor), koji odgovara ostalom delu (zamišljenog) prostora. Prema tome, za svaku graničnu površinu vezana su dva optička prostora:

- prostor predmeta u odnosu na određenu graničnu površinu definiše se kao optički prostor koji se nalazi ispred granične površine, posmatrano u smeru kretanja svetlosti. Ako se usvoji konvencija o prostiranju svetlosti sa leva na desno, tada se prostor predmeta nalazi sa leve strane u odnosu na graničnu površinu;
- prostor lika u odnosu na određenu graničnu površinu definiše se kao optički prostor koji se nalazi iza granične površine, posmatrano u smeru kretanja svetlosti. Za usvojeni smer prostiranja svetlosti sa leva na desno prostor lika se nalazi sa desne strane granične površine.

Iz ovih definicija i predhodnih konvencija proizilazi da je sredina sa indeksom k prostor lika za graničnu površinu k i istovremeno prostor predmeta za graničnu površinu $k+1$.

Prostor predmeta i prostor lika povezani su sa zracima koji prolaze kroz optički sistem. Za zadati položaj zraka u prostoru predmeta moguće je proračunati položaj zraka u prostoru lika prateći njegovo kretanje kroz optički sistem. Zraci koji se nalaze u prostoru predmeta i lika i odgovaraju jedan drugom nazivaju se spegnutim ili konjugovanim zracima.

U optici se pored navedenih pojmova uvode i sledeće konvencije (prikazane i na slici 1.7):



Slika 1.7. Usvojene konvencije u optici

- sva razmatranja, crteži i šeme rade se pod pretpostavkom da se svetlost prostire s leva u desno;

- linearni odsecci na osi sistema su pozitivni ako je smer njihovog prostiranja od granične površine u pravcu prostiranja svetlosti. U suprotnom slučaju linearni odsecci su negativni (slika 1.7,a);
- poluprečnik krivine površine je pozitivan ako se centar krivine nalazi desno od površine, a negativan ako se nalazi levo od površine (slika 1.7,b);
- debljine sočiva i drugih optičkih elemenata, kao i vazdušnih rastojanja između prelomnih površina uvek su pozitivne;
- visina preseka zraka sa graničnom površinom, veličina predmeta i veličina lika su pozitivne ako se nalaze iznad optičke ose, a negativne ako se nalaze ispod optičke ose (slika 1.7,c,d);
- ugao zraka s optičkom osom je pozitivan ako je za njihovo poklapanje neophodno optičku osu okretati u smeru kretanja kazaljke na satu (za ugao manji od 90^0), a negativan ako je potrebno optičku osu okretati suprotno od kretanja kazaljke na satu (za ugao manji od 90^0) (slika 1.7,e);
- ugao između zraka i normale na površinu u tački upada zraka (upadni i prelomni ugao) je pozitivan ako je za poklapanje normale sa zrakom potrebno normalu zaokretati u smeru kretanja kazaljke na satu (za ugao manji od 90^0), odnosno, negativan ako je potrebno normalu zaokretati u suprotnom smeru od kretanja kazaljke na satu (za ugao manji od 90^0) (slika 1.7,f);
- pri odbijanju svetlosnog zraka od refleksne površine menja se znak indeksa prelamanja i znak rastojanja između refleksne površine i površine iza nje.