



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET
DEPARTMAN ZA FIZIKU



ODREĐIVANJE PLANARNE RASPODELE JAČINE SOČIVA

-master rad-

MENTOR:
Dr Igor Savić

KANDIDAT:
Nataša Antonijević

Novi Sad, 2010.

Sadržaj

UVOD	1
1. VRSTE I KARAKTERISTIKE NAOČALNIH SOČIVA.....	2
1.1 Geometrijske karakteristike.....	2
1.1.1. Zakrivljenost površi.....	3
1.1.2 Debljina naočalnih sočiva	5
1.1.3. Dijametar sočiva.....	6
1.2. Optičke karakteristike naočalnih sočiva.....	7
1.2.1 Jačina sočiva.....	7
2. SFERNA SOČIVA.....	10
2.1. Oblici i jačina sfernih sočiva.....	10
2.2. Debljina sfernog sočiva	15
2.3. Uvećanje sfernog sočiva.....	17
2.4. Vidno polje	17
3. MERENJE JAČINE SOČIVA	18
3.1. Jednostavni Hartman test i pojednostavljena metoda za interpretaciju rezultata.....	19
4. OPIS MERENJA I DISKUSIJA REZULTATA.....	22
4.1. Opis aparature	22
4.2. Postupak merenja, rezultati i diskusija.....	26
4.2.1. Određivanje jačine poznatog sfernog sočiva.....	26
4.2.2.Određivanje jačine nepoznatog sfernog sočiva	33
ZAKLJUČAK	37
LITERATURA.....	38
BIOGRAFIJA.....	39

UVOD

Naočalna sočiva se prvenstveno koriste, kao što im i ime kaže, u izradi naočara koja služe za otklanjanje ili smanjivanje refrakcionih grešaka oka. Ispitivanje i merenje optičke jačine naočalnog sočiva je značajno prvenstveno za proizvođače, ali i za optičare koji proveravaju jačinu nepoznatih sočiva ili vrše ugradnju i finalnu proveru sočiva ugrađenih u ramove.

U radu su ukratko navedene vrste naočalnih sočiva, opisane su njihove geometrijske i optičke osobine. S obzirom da su u ovom radu korišćena sferna sočiva, njima je posvećena posebna pažnja.

Pored nekoliko ukratko prikazanih načina za određivanje jačine sočiva, detaljno je prikazan metod određivanja planarne raspodele jačine sočiva koji se bazira na merenju trasverzalnih aberacija sočiva. Prvi cilj ovog rada je testiranje prikazanog metoda na sfernem sočivu poznate jačine. Drugi cilj ovog rada je snimanje planarne raspodele jačine sfernog sočiva sa defektima radi ispitivanja pouzdanosti metoda za snimanje planarne raspodele jačine varifokalnih sočiva.

Dobijeni rezultati i izvedeni zaključci su dati na kraju rada.

1. VRSTE I KARAKTERISTIKE NAOČALNIH SOČIVA

Naočalna sočiva se prvenstveno koriste, kao što im i ime kaže, u izradi naočara koja se koriste za otklanjanje ili smanjivanje refrakcionih grešaka oka. Sama sočiva se karakterišu svojim osobinama od kojih su najvažnije date u tekstu koji sledi.

Refraktivni sistem oka formira na mrežnjači lik posmatranog objekta, koji se nalazi na određenoj udaljenosti od oka. Formirani lik na retini je obrnut i umanjen. U slučajevima kada se lik ne formira na retini potrebna je refraktivna korekcija. U svrhu korekcije refraktione greške koriste se različite vrste refraktivnih pomagala, među kojima je najvažnije pomenuti kontaktna i naočalna sočiva.

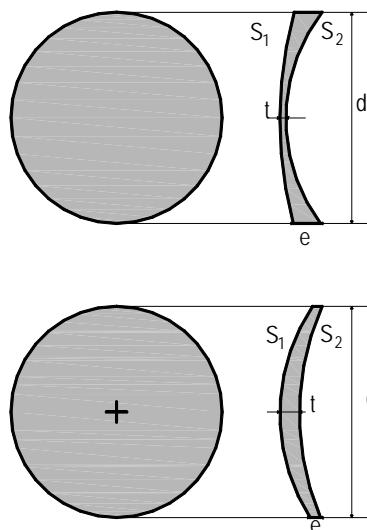
S obzirom da se lik posmatranog objekta formira iza zadnje strane naočalnog sočiva, jedna od važnih osobina sočiva koja figuriše u procesu formiranja lika posmatranog objekta je *back vertex power* (BVP). Ova veličina biće definisana u daljem tekstu.

1.1 Geometrijske karakteristike

Sočiva se izrađuju u formi precizno definisane geometrije, koja im onda daje određene optičke osobine.

Oblik sočiva karakterišu: zakriviljenost njegovih površina, centralna i ivična debljina i dijametar. Ivična debljina, oblik ivice sočiva i njegove dimenzije mogu biti različite, što zavisi od toga da li se radi o neizrezanom ili izrezanom sočivu.

Neizrezano sočivo je onaj oblik sočiva koji se dobija pri izradi. Uglavnom je kružnog oblika, ali ponekad se izrađuje u pravougaonom ili ovalnom obliku sa oštrim ivicama. Jedna od osnovnih osobina kojom se opisuje industrijski proizvedeno sočivo je dijametar (d) izražen u milimetrima (Slika 1.1.).



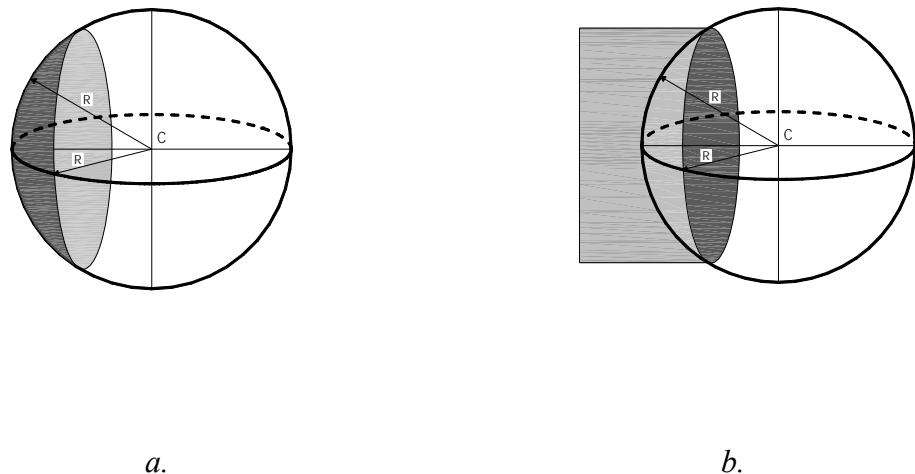
Slika 1.1. Naočalno sočivo (konkavno gore, konveksno dole) sa obleženom centralnom debljinom t , ivičnom debljinom e , sagovima s_1 i s_2 i dijametrom d

Kada je potrebno ugraditi sočivo u određeni ram onda se pristupa rezanju neizrezanog sočiva, a kao rezultat dobija se izrezano sočivo, koje odgovara obliku i dimenzijama rama naočara. S obzirom da optičke osobine naočara zavise od pravilnog položaja ugrađenog sočiva u ram, samoj proceduri ugradnje potrebno je pridati veliki značaj. U ovom radu analiziraće se samo neizrezana sočiva.

1.1.1. Zakriviljenost površi

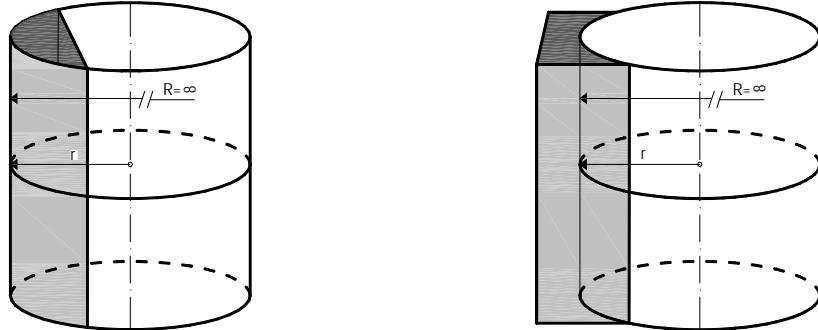
U naočalnoj optici i kontaktologiji, osnovna podela sočiva po obliku površi je na: sferna, cilindrična, torična, plano, asferična (najčešće eliptična) i progresivna sočiva. Zakriviljenost površine određena je poluprečnikom zakriviljenosti površine r . Ovaj parametar, u mnogo slučajeva, ne može direktno da se izmeri već se izračunava preko indirektno merene jačine sočiva F . Optičku površ karakterišu dva parametra: radius zakriviljenosti i pravac konveksnosti koja se određuje u odnosu na upadni svetlosni zrak.

Kod sfernih sočiva (Slika 1.2.) poluprečnik zakriviljenosti površine je uvek konstantan i jednak poluprečniku sfere od koje je izrađeno sočivo. Sferna površ predstavlja deo sfere koja u svim pravcima ima jednak radius krivine.

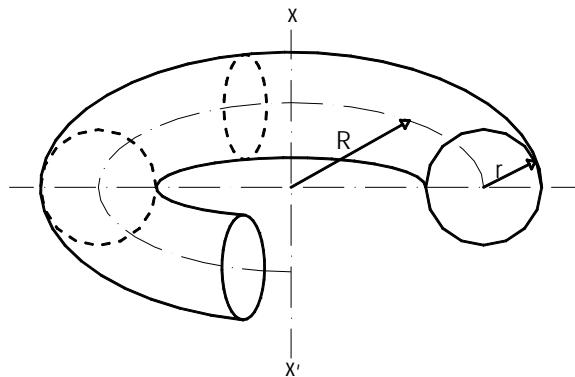


Slika 1.2. Sferna optička površ a.) konveksna b.) konkavna

Astigmatske površi su cilindrične i torične površi (Slika 1.3) koje se koriste u naočalnoj optici i kontaktologiji za korekciju okularnog astigmatizma. Astigmatičnu površ karakteriše činjenica da postoje dva meridijana duž kojih nije ista vrednost radijusa zakriviljenosti. Po definiciji, meridian koji ima najveći radius zakriviljenosti određuje osu površi, a drugi koji ima najmanju zakriviljenost određuje pravac normalan na osu površi.



a.
1.3. Cilindrična optička površ a.) konveksna b.) konkavna



Slika 1.4. Toroidalna optička površ

Cilindrična sočiva (Slika 1.3. a i b.) imaju dva radijusa zakrivljenosti. Sferni radius zakrivljenosti sočiva r je isti u svim preseцима normalnim na osu simetrije. Radius zakrivljenosti R u preseku duž ose simetrije je beskonačno velik. Torična površina (Slika 1.4.) predstavlja deo bočne površine torusa koji ima oblik unutrašnje automobilske gume. Zapravo, torična površina je cilindrična površina poluprečnika zakrivljenosti r , čija osa opisuje kržnicu poluprečnika R . Znači, toričnu površinu karakterišu dva poluprečnika zakrivljenosti: radius cilindrične površi r i radius torusa R .

Sferne, cilindrične i torične površi mogu biti koveksne ili konkavne (vrstu definiše smer upadnog zraka iz vazduha).

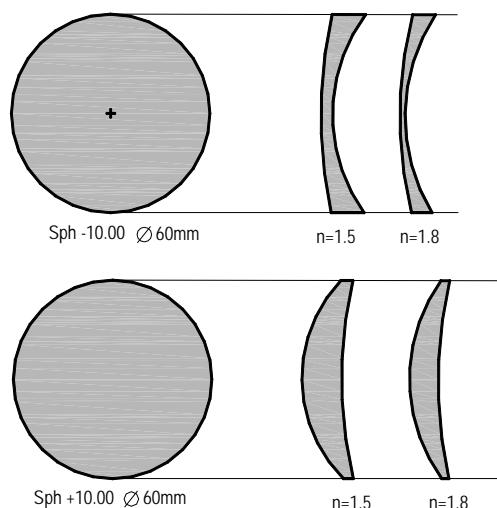
Plano površinu određuje površ takva da vrednost radijusa zakrivljenosti svakog njenog meridijana teži beskonačnosti. Vrednost zakrivljenosti planu površine je nula.

1.1.2 Debljina naočalnih sočiva

U slučajevima kada je zakrivljenost površine konstantna, debljina sočiva zavisi od dijametra. Centralnu debljinu sočiva određuje proizvođač na osnovu nekoliko kriterijuma. Na primer, konveksno sočivo sa jako malom ivičnom debljinom se lako okrnji, a veoma tanko konkavno sočivo je lomljivo u centralnom delu. U zavisnosti od osobe koja će nositi naočare, važno je uzeti u obzir i težinu i izgled sočiva, jer nošenje naočara, pre svega, treba da bude ugodno i bez opterećenja.

Što je deblje sočivo to je ono manje udobno da nošenje. Sočivo velike debljine je veoma teško, pa vuče naočare da klize ka napred. Na ovaj način uzrokuju se različiti optički efekti kao što su prizmatični efekat, transverzalna aberacija i druge.. Pored toga, ovakva sočiva su manje privlačna i zbog estetike se manje nose.

Ono što je važno napomenuti je i da se promenom debljine sočiva menjaju i optičke karakteristike. Jedan od načina da se, pri izradi naočara dobije najmanja moguća debljina, je korišćenje materijala za izradu sočiva sa velikim indeksom prelamanja (Slika 1.5.). Indeks prelamanja i debljina sočiva su obrnuto proporcionalni za sočivo zadate jačine, pa se u cilju smanjenja debljine ovaj odnos može iskoristiti.



Slika 1.5. Promena debljine konkavnog (gore) i konveksnog (dole) sfernog sočiva sa povećanjem indeksa prelamanja materijala n

Materijal koji se koristi za izradu sočiva mora biti proziran za vidljiv deo spektra i homogen da bi se izbegla hromatska aberacija odnosno razlaganje bele svetlosti na komponente. Takođe, materijal od kojeg se izrađuje naočalno sočivo mora biti tvrd, lak za farbanje (u današnje vreme najčešća je bela forma radi lakšeg površinskih presvlačenja), otporan na tretiranje hemijskim reagensima i bez supstanci koje izazivaju alergijske reakcije. Generalno gledano, naočalna sočiva se izrađuju od materijala koji se dele na dve velike grupe: plastika i staklo.

Indeks prelamanja materijala je veličina koja pokazuje koliko se savija svetlost u žuto-zelenoj oblasti spektra pri prolasku kroz dati materijal. Ova veličina se definiše se kao odnos brzina svetlosti u vakuumu i materijalu. U praksi se indeks prelamanja meri u vazduhu. Veličina koja povezuje indeks prelamanja materijala u žuto-zelenoj oblasti spektra sa vrednostima u plavom i crvenom delu spektra naziva se Abeov broj.

Druga velika podela aberacija je na monohromatske i polihromatske.

1.1.3. Dijametar sočiva

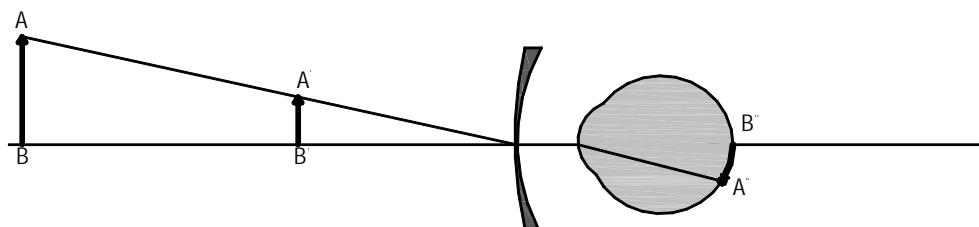
Dijametar neizrezanog sočiva određen je izborom rama u koji se sočivo ugrađuje. Masovna produkcija i velika rasprostranjenost primene sočiva uzrokovali su uvođenje standardnog dijametra sočiva, koji se vremenom menjao. Početna vrednost standardnog dijametra je bila 47 mm, a sada dostiže vrednost čak i do 70 mm.

Međutim, pored veličine rama, postoji još nekoliko faktora koji utiču na veličinu standardnog dijametra sočiva. Ako je poznata jačina sočiva, sa povećanjem dijametra sočiva povećava se i njegova ivična debljina (kod + sočiva se ivična debljina smanjuje, a kod – sočiva se povećava). Isto tako važi da za zadat dijametar sočiva, sočiva veće jačine povećavaju njegovu debljinu, pri konstantnoj vrednosti indeksa prelamanja.

Kako su debljina, odnosno težina sočiva, faktori koji određuju njegov dijametar, standardni dijametar predstavlja kompromis između veličine i jačine sočiva za materijal određenog indeksa prelamanja. Sa pojavom različitih ramova na tržištu i mogućnosti preciznijeg centriranja sočiva pri ugradnji u ram, proizvođači su razvili grupe produkata sa različitim veličinama standardnog dijametra.

1.2. Optičke karakteristike naočalnih sočiva

Posmatrajmo osobu koja vidi zamućenu sliku predmeta. Funkcija pravilno postavljenog naočalnog ili kontaktnog sočiva je da formira oštru sliku predmeta koju vidi osoba koja nosi sočivo. (Slika 1.6.)



Slika 1.6. Korekcija refraktivne greške naočalnim sočivom

Pozicija, veličina i oblik formirane slike zavisi od optičkih osobina sočiva odnosno od vrste i pozicije upotrebljenog sočiva (plano, sferno, konveksno, konkavno, cilindrično, torično, progresivno ili asferično).

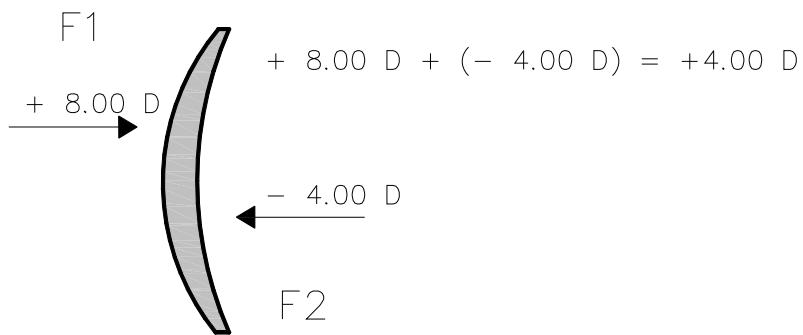
U ovom radu biće opisane optičke karakteristike sočiva najjednostavnijih oblika površi, kako se menjaju optičke osobine sočiva kada se kombinuju različite površine i njihov uticaj na svetlosni zrak koji prolazi kroz optički sistem.

1.2.1 Jačina sočiva

Ako paralelan snop zraka pada na plano površinu, nakon prelamanje snop je na izlazu takođe paralelan. Znači, na osnovu zakona refrakcije može se zaključiti da je jačina plano optičke površine jednaka nuli. Za slučajeve svih ostalih površi njihova jačina je različita od nule.

Jačina sočiva zavisi od indeksa prelamanja materijala od kojeg je izrađeno, ali i od oblika njegove i prednje i zadnje površi (Slika 1.7). Svetlosni snop čiji je pravac paralelan optičkoj osi, nakon prolaska kroz sferno sočivo, prelamaće se ka optičkoj osi (slučaj konvergentnog, +, sfernog sočiva) i seći će osu u fokalnoj tački F. U slučaju divergentnog (-, sfernog sočiva), snop će se prelamati od ose, a produžeci relanih zraka će seći optičku osu u imaginarnoj fokalnoj tački F'. Rastojanje od centra sočiva do fokalne tačke naziva se fokalna dužina, a obeležava se sa f. Ugao skretanja zraka nakon prelamanja kroz sferno sočivo srazmeran je jačini sočiva. Snaga ili

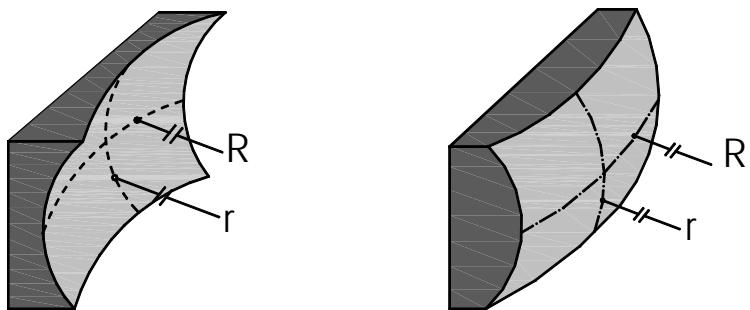
jačina svakog sfernog sočiva je srazmerna recipročnoj vrednosti fokalne dužine. Kada se fokalna dužina izrazi u metrima, snaga sočiva se izražava u dioptrijama (D).



Slika 1.7. Sferno sočivo sa prikazanim jačinama prednje površi i zadnje površi

Ako je jedna od površina koja razdvaja vazduh i naočalno sočivo cilindrična onda se radi o cilindričnom sočivu, koje može biti konkavno ili konveksno. Jačina cilindričnog sočiva duž osе cilindra jednaka je nuli, dok je jačina sočiva duž pravca normalnog na osu cilindra maksimalna. Ova dva pravca određuju glavne meridijane cilindrične površi. Na svim ostalim pravcima sočiva, između ova dva pravca, jačina sočiva varira od nule do maksimalne vrednosti.

U slučaju da je jedna površina koja razdvaja vazduh i sočivo toroidalna (Slika 1.8.), onda se radi o toroidalnom sočivu. Dva glavna meridijana kod toroidalnih sočiva su kružni, sa navećim radiusom zakrivljenosti R , koji određuje jačinu F_1 i drugi, sa najmanjim radiusom zakrivljenosti r , koji određuje jačinu F_2 . Ova dva meridijana su međusobno normalna i jačina F_2 je uvek veća od F_1 . Jačina cilindra torične površi predstavlja razliku jačina F_2 i F_1 . U slučaju toroidalne optičke površi glavna osa je uvek određena meridijanom koji ima najmanju jačinu.



Slika 1.8. Konkavno i konveksno toroidalno sočivo sa prikazanim radijusima zakrivljenosti dva glavna meridijana

Kod realnih materijala indeks prelamanja materijala varira sa talasnom dužinom primenjene svetlosti.

Kod svakog realnog sočiva postoje aberacije. Uopšteno gledano, aberacije smanjuju kvalitet slike. Seidel-ove aberacije se dele na dve grupe:

- aksijalne slučaj kada je objekat je na osi sočiva i
- transverzalne kod kojih je objekat je van ose sočiva.

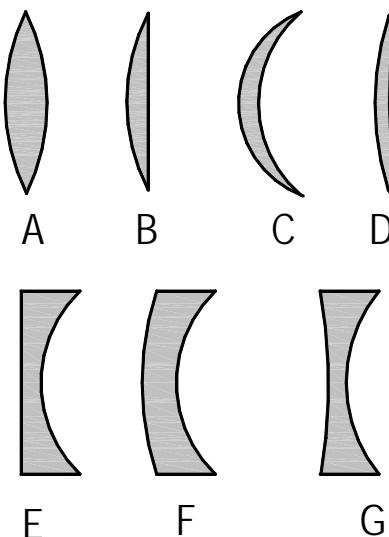
Aksijalne aberacije mogu biti sferne i hromatske. Kod sočiva postoje dve vrste hromatske aberacije: aksijalna i transverzalna. Obe vrste hromatske aberacije zavise od toga da li upadni svetlosni snop pada paralelno optičkoj osi ili ne. Kod transverzalnih aberacija postoje: koma, transverzalna hromatska aberacija, kosi astigmatizam, zakrivljenost polja i dr.

2. SFERNA SOČIVA

2.1. Oblici i jačina sfernih sočiva

Sferna sočiva su sočiva kod kojih je i prednja i zadnja površina sferna ili je jedna od njih plana površina. Generalno gledano, sočiva mogu biti: zakriviljena sočiva i ravna sočiva. Zakriviljena sočiva imaju jednu površinu koja je konveksna na svim meridijanima dok je druga površina konkavna na svim meridijanima. Sferna zakriviljena sočiva se nazivaju i meniskus sočiva. Ravna sočiva predstavljaju sve ostale oblike sočiva osim navedenih zakriviljenih sočiva, pri čemu je važno napomenuti da kod ravnog sočiva nije obavezno da ima jednu ravnu površinu.

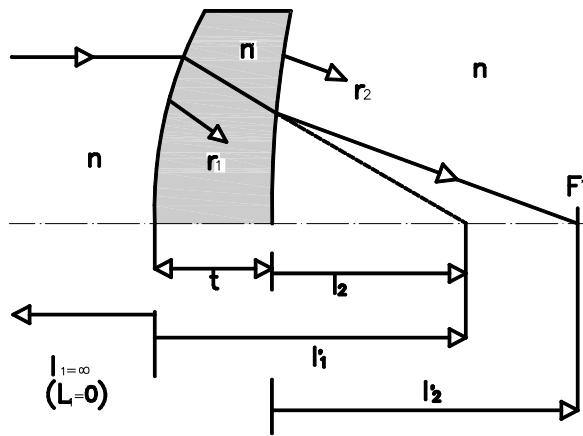
Oblici sfernih sočiva prikazani su na Slici 2.1, gde u svim slučajevima svetlost dolazi s leve strane.



Slika 2.1. Forme sfernih sočiva: A, B, C, D pozitivna, E, F, G negativna.

Prelamanje svetlosnog zraka pri prolasku kroz sferno sočivo prikazano je na Slici 2.2. Dato sferno sočivo ima centralnu debljinu t , a napravljeno je od materijala indeksa prelamanja n . Poluprečnik zakriviljenosti prednje površi prikazanog sočiva je r_1 , a zadnje r_2 . Na prikazanoj slici sve veličine koje se odnose na prednju površ imaju u indeksu 1, a one koje se odnose na zadnju površ sočiva imaju u indeksu 2.

Upadni zrak je paralelan optičkoj osi što predstavlja specijalan slučaj kada se objekat koji se posmatra nalazi na beskonačnom (u praksi, dovoljno velikom) rastojanju od sočiva. Refrakcija se posmatra na dve prelamajuće površi, prednjoj i zadnjoj.



Slika 2.2. Prelamanje svetlosnih zraka od beskonačno udaljenog predmeta kroz debelo sočivo

Na osnovu zakona refrakcije na prvoj površini možemo zapisati jednačinu:

$$L_1' - L_1 = F_1$$

gde je:

$$L_1 = \frac{n}{l_1}$$

S obzirom da $l_1 \rightarrow \infty$ onda je $L_1 = 0$, pa iz toga sledi da je:

$$L_1' = F_1$$

Za drugu površinu važi:

$$L_2 = \frac{n'}{l_2}$$

Sa slike se vidi da je $l_2 = l_1' - t$, pa se ubacivanjem u gornji izraz dobija:

$$L_2 = \frac{n'}{l_1' - t} = \frac{n'}{\frac{n'}{F_1} - t} \quad (2.1.)$$

gde je t centralna debljina posmatranog sočiva.

Promena vergencije na drugoj površini je:

$$L_2' - L_2 = F_2$$

Na osnovu prethodnih jednačina dobija se izraz za izlaznu vergenciju zadnje površine sočiva:

$$L_2' = F_2 + \frac{F_1}{1 - F_1 \frac{t}{n'}} \quad (2.2.)$$

U ovom specijalnom slučaju, za upadno svetlo od udaljenog objekta, L_2' se naziva *back vertex power* (BVP) i označava se kao F_v' :

$$F_v' = \frac{F_1}{1 - F_1 \frac{t}{n'}} + F_2 \quad (2.3.)$$

BVP je, u stvari, dioptrijsko rastojanje od zadnje površine sočiva do druge glavne žiže F' .

U slučaju naočalnog sočiva, BVP predstavlja jačinu sočiva iz perspektive osobe koja nosi sočivo.

Kada se objekat nalazi na prvoj glavnoj žiži F , svetlosni zraci od objekta će se, nakon prolaska kroz sočivo, od zadnje strane sočiva prostirati paralelno.

U ovom specijalnom slučaju se definiše *front vertex power* (FVP) kao:

$$F_v = \frac{F_2}{1 - F_2 \frac{t}{n'}} + F_1 \quad (2.4.)$$

FVP predstavlja jačinu sočiva gledano sa prednje strane sočiva, pa je ova veličina zbog toga mnogo manje važna za naočalnu tehniku i optiku.

Ekvivalentna jačina debelog sočiva ili sistema sočiva je veličina koja predstavlja jačinu tankog sočiva i može se koristiti kao optička zamena.

Na Slici 2.3. su prikazane dve glavne ravni sočiva H i H' , prva i druga žiža F i F' i prva i druga glavna tačka P i P' .

Ekvivalentna jačina sistema sočiva izračunava se na osnovu izraza:

$$F_e = F_1 + F_2 - dF_1F_2 \quad (2.5.)$$

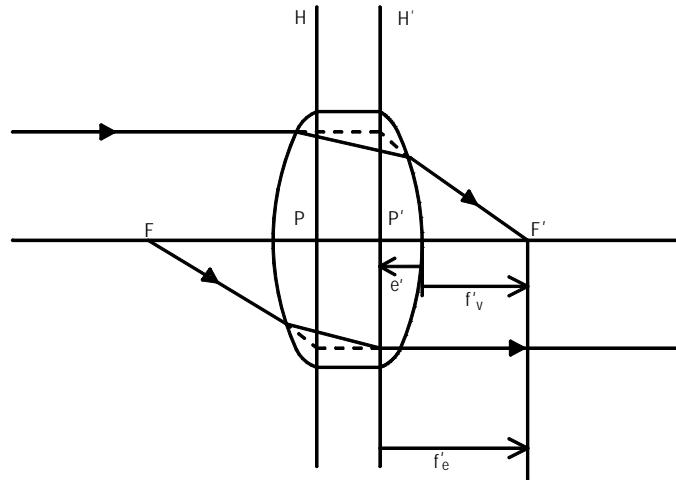
gde je

F_1 jačina prve površi sočiva

F_2 jačina druge površi sočiva

d debljina sočiva

Ekvivalentno tanko sočivo se nalazi u drugoj glavnoj ravni, na rastojanju $-\frac{1}{F_e}$ od druge glavne žiže F' .



Slika 2.3. Debelo sočivo sa prikazanim glavnim ravnima H i H' , glavnim fokalnim tačkama F i F' , rastojanjem na kojem se formira ekvivalentno tanko sočivo e'

Kada se u prethodni izraz umesto debljine sočiva d uvrsti izraz sa prividnu debljinu sočiva $\frac{t}{n'}$ dobija se:

$$F_e = F_1 + F_2 - \frac{t}{n'} F_1 F_2 \quad (2.6.)$$

Na osnovu slike može se napisati sledeće:

$$e' = f_v' - f_e'$$

gde je

f_v' - zadnja fokalna daljina

f_e' - fokalna daljina ekvivalentnog tankog sočiva

Rastojenje od zadnje površine sočiva do druge glavne tačke može se izračunati i kao:

$$e' = \frac{t}{n'} \frac{F_2}{F_e} \quad (2.7.)$$

Za slučaj tankih sočiva ekvivalentna debljina sočiva se može nešto jednostavnije izračunati. Kada se uzme u obzir uslov da debljina tankih sočiva može da se zanemari ($t \rightarrow 0$), prethodne jednačine izgledaju malo drugačije:

$$F = F_1 + F_2 \quad (2.8.)$$

Na osnovu jednačina za prednju i zadnju površ dobija se:

$$F = L' - L$$

$$\frac{n'-n}{r_1} = \frac{n'}{l_1'} - \frac{n}{l_1} \quad \text{za prednju}$$

$$\frac{n-n'}{r_2} = \frac{n}{l_2'} - \frac{n'}{l_2} \quad \text{za zadnju}$$

Za tanko sočivo važi

$$\frac{n'}{l_1'} = \frac{n'}{l_2}$$

pa je

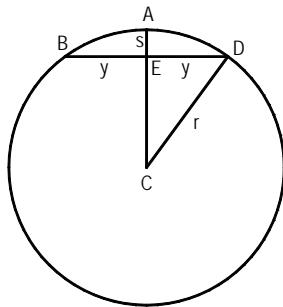
$$\frac{n}{l'} - \frac{n}{l} = F = \frac{n}{f}. \quad (2.9.)$$

U naočalnoj optici sočivo koje se posmatra se nalazi u vazduhu, pa se na kraju dobija izraz:

$$\frac{1}{l'} - \frac{1}{l} = \frac{1}{f} \quad (2.10.)$$

2.2. Debljina sfernog sočiva

Na Slici 2.4. prikazana je sferna kriva, definisana radijusom r i centrom u tački C. Data sferna kriva je presečena tetivom BD. Rastojanje AE s naziva sag, a označeno je sa s za tetivu dužine $2y$.



Slika 2.4. Sferna kriva sa obeleženim radijusom r , centrom C i sagom s

Na osnovu slike se može izvesti izraz za sag sočiva, i to za pozitivna i negativne vrednosti poluprečnika r :

$$\bullet \quad \text{za } r > 0 \quad s = r - \sqrt{r^2 - y^2} \quad (2.11.)$$

$$\bullet \quad \text{za } r < 0 \quad s = r + \sqrt{r^2 - y^2} \quad (2.12.)$$

U specijalnom slučaju kad je dužina tetine $2y$ jednaka prečniku sočiva $2r$ onda je debljina sočiva jednaka radijusu sočiva.

Iz jednačine

$$r^2 = y^2 + (r - s)^2 \quad (2.13.)$$

poluprečnik sferne krive se može izraziti i preko saga s i polovine dužine tetine date sferne površi y:

$$r = \frac{(y^2 + s^2)}{2s} \quad (2.14.)$$

Ako je s dovoljno malo u odnosu na y i r onda se s^2 može zanemariti. Ako se uvrsti uslov za ovaj specijalan slučaj onda se dobija:

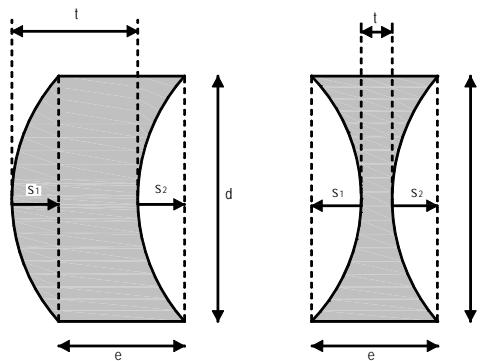
$$r = \frac{y^2}{2s} \quad (2.15.)$$

Na osnovu izvedenih jednačina može se izračunati ivična debljina naočalnih sočiva. Veza između ivične debljine (e) i centralne debljine (t) je data jednačinom:

$$e = t - s_1 + s_2 \quad (2.16.)$$

gde je s_1 sag prednje površine, a s_2 sag zadnje površine sočiva.

Na Slici 2.5.prikazana su naočalna sočiva sa označenim pomenutim veličinama.



Slika 2.5. Naočalno sočivo (konveksno levo, konkavno desno) sa označenom ivičnom debljinom e , centralnom debljinom t , dijametrom d i sagovima s_1 i s_2

Sag sočiva se meri od površine sočiva ka tetivi i može biti pozitivan ili negativan.

U slučajevima kada se primenom prethodnih jednačina izračuna da sočivo ima negativnu centralnu ili negativnu ivičnu debljinu, takvo sočivo ne može biti proizvedeno u dатој formi.

2.3. Uvećanje sfernog sočiva

Ukupno uvećanje naočalnog sočiva se definiše za osobu koja nosi dato sočivo, jer uvećanje sočiva oseti samo osoba koja gleda kroz dato sočivo.

Oznaka za uvećanje sočiva je SM i potiče od engleskog izraza *spectacle magnification*. Ukupno uvećanje naočalnog sočiva se definiše kao odnos veličine slike korigovane sočivom i veličine nekorigovane slike. Veličina slike, odnosno faktor jačine sočiva, se definiše preko ugla pod kojim osoba vidi udaljeni predmet, za slučaj korigovanog i nekorigovanog oka. U formuli na osnovu koje se izračunava ovaj faktor figuriše i veličina d_v koja predstavlja rastojanje između zadnje površine sočiva i oka osobe koja nosi dato naočalno sočivo.

$$PF = \frac{\omega'}{\omega} = \frac{1}{1 - d_v F'} \quad (2.17.)$$

Faktor jačine sočiva se povećava sa smanjenjem rastojanja d_v što se u praksi postiže primenom kontaktnih ili intraokularnih sočiva.

Kada se radi o debelom sočivu, sa zadnjom žižnom daljinom f_v i ekvivalentnom žižnom daljinom f_e , u račun je potrebno uključiti dodatne faktore, jer u tom slučaju na vrednost ukupnog uvećanja sočiva utiče i forma naočalnih sočiva.

Za slučaj meniskus sočiva ekvivalentna žižna daljina postaje veća u odnosu na zadnju žižnu daljinu što dovodi do povećanja vrednosti ukupnog uvećanja sočiva. Ukupno uvećanje naočara je proizvod faktora oblika SF i faktora jačine PF:

$$SM = PF \cdot SF \quad (2.18.)$$

Faktor oblika zavisi od jačine prednje površine sočiva. Ako su poznate jačina prednje površine sočiva F_1 , centralna debljina sočiva t i indeks prelamanja materijala od kojeg je sočivo napravljeno n , faktor oblika se može izračunati na osnovu relacije:

$$SF = \frac{1}{\left(1 - \frac{t}{n} F_1\right)} \quad (2.19.)$$

2.4. Vidno polje

Postoje dva pristupa izračunavanja vidnog polja koje vidi osoba kroz naočalno sočivo. Vidno polje osobe koja nosi naočalno sočivo određeno je prepisanim receptom i indukovanim prizmom pri ivici sočiva, dijametrom sočiva i rastojanjem sočiva od oka.

Konvergentno, plus, sočivo ograničava vidno polje osobe, a divergentno, minus, sočivo povećava vidno polje osobe koja nosi dato naočalno sočivo.

3. MERENJE JAČINE SOČIVA

Ispitivanje i merenje optičke jačine naočalnog sočiva je značajno prvenstveno za proizvođače, ali i za optičare koji proveravaju jačinu nepoznatih sočiva ili vrše ugradnju i finalnu proveru sočiva ugrađenih u ramove.

Za optičare je veoma važno da postoji brz i efikasan metod merenja jačine sočiva. U tu svrhu se koristi fokometar. U današnje vreme fokometar predstavlja najobičajeni instrument za merenje jačine naočalnih sočiva. Fokometar se, pored određivanja jačine sfernih sočiva, koristi i za centriranje naočalnih sočiva, merenje jačine i određivanje osa astigmatskih formi naočalnih sočiva, jačine i orijentacije prizme.

Na Slici 3.1. su prikazane dve vrste fokometra: ručni i automatski.



Slika 3.1. Fokometar a.) ručni i b.) automatski

Neke vrste komercijalnih fokometara su proizvedena usavrševanjem eksperimentalnih metoda određivanja jačine sočiva, na primer, varijacija Hartman testa, Hartman-Šek postavka eksperimenta i druge.

Drugi metod za brzo određivanje jačine sočiva je metod neutralizacije koji se zasniva na neutralisanju jačine sočiva nepoznate jačine pomoću sočiva poznate jačine iz probnog seta.

Pomenuti Hartman test je od posebnog značaja kako za naočalnu optiku tako i za ispitivanje velikih optičkih instrumenata kao što su astronomска ogledala, opisivanje primene i razvoja sočiva i druga.

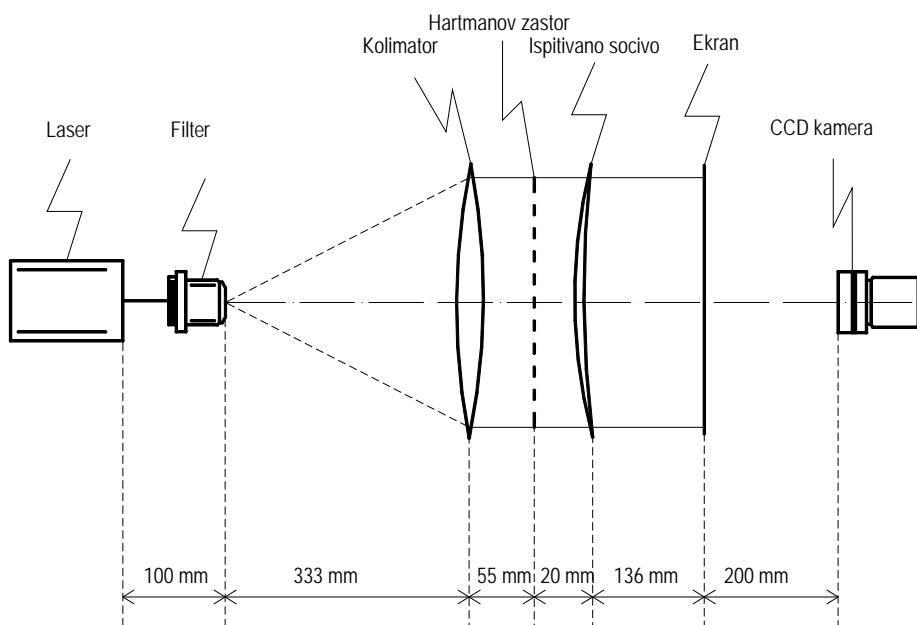
U ovom radu je korišćen metod određivanja jačine sočiva na osnovu trasverzalnih aberacija.

3.1. Jednostavni Hartman test i pojednostavljeni metoda za interpretaciju rezultata

Hartman test je pouzdan metod koji se koristi za posmatranje ponašanja talasnog fronta u optičkim sistemima, a bazira se na upotrebi Hartmanovog zastora. Hartmanov zastor je ploča sa otvorima tačno određenih dimenzija čiji se centri nalaze na određenom rastojanju d .

Hartmanov zastor se postavlja vrlo blizu optičkog sistema koji se ispituje, da bi se postiglo precizno merenje horizontalne i vertikalne transverzalne aberacije. Front svetlosnih talasa pada pod pravim uglom na Hartmanov zastor koji daje određen broj svetlosnih zraka koji padaju na sočivo paralelno optičkoj osi. Nakon refrakcije na sočivu, upadni talasni front se deformeše i formira sliku na ekranu. Transverzalna aberacija se meri za svaki zrak pojedinačno. Ova aberacija je, u suštini, rastojanje između tačaka formiranih na ekranu u prisustvu i bez prisustva optičkog sistema koji se meri.

Za ovaj rad značajan je jednostavan Hartman test i jednostavna metoda za interpretaciju rezultata. Na Slici 3.2. je prikazana jednostavna šema aparature pomoću koje se ovaj metod može realizovati.

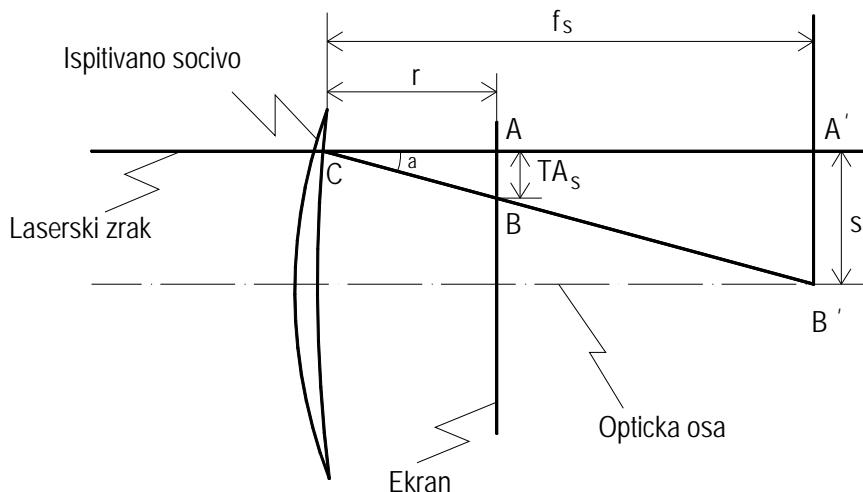


Slika 3.2. Šema aparature koja se koristi za realizaciju jednostavnog Hartman testa

Kao izvor talasnog fronta koristi se laser. Nakon prolaska kroz prostorni filter, laserski snop pada na kolimator, a potom na površinu Hartmanovog zastora. Na sferno sočivo koje se ispituje pada snop paralelnih laserskih zraka, dobijenih prolaskom svetlosnog laserskog fronta kroz rupice Hartmanovog zastora. Na zastoru koji se posmatra formira se slika svetlih tačaka. Korišćenjem ray tracing metoda određuje se koja tačka odgovara kom svetlosnom snopu i izračunava žižna

daljina za svaku tačku posebno. Jednostavnim računom dobija se vrednost jačine sočiva u svakoj tački ispitivanog sočiva.

Da bi se odredila jačinu sočiva, odnosno žižna daljina, za svaku svetu tačku na ekranu, potrebno je analizirati ponašanje jednog zraka, koji odgovara datoj tački, pri prolasku kroz sočivo (Slika 3.3.) (kao što je u radu D. P. Salas-Peimbert).



Slika 3.3. Analiza kretanja jednog zraka nakon prolaska kroz sočivo

Neka dati zrak prolazi kroz sočivo u tački C čije su koordinate (x, y) . Ekran je postavljen na rastojanju r od naočalnog sočiva, normalno na optičku osu sočiva.

S obzirom da naočalno sočivo skreće zrake, sigurno je da se javlja trasverzalna aberacija TA_s . Zrak koji posmatramo, u odsustvu ekrana, seče optičku osu u tački koja se poklapa sa fokusom naočalnog sočiva. Data tačka se nalazi na rastojanju jednakom žižnoj daljinji f sočiva koje se ispituje.

Refraktovani zrak formira ugao α sa pravcem referentnog laserskog zraka koji pada na ekran u slučaju kada nema sočiva. Na osnovu sličnosti trouglova prikazanih na Slici 3.3., može se izvesti izraz za žižnu daljinu odnosno jačinu sočiva koja odgovara svakoj tački na ekranu.

$$f_s = \frac{r \cdot s}{TA_s} \Rightarrow F = \frac{TA_s}{r \cdot s} \quad (3.1.)$$

Veličina F_s se na kraju dobija u jedinicama dioptrija $D = m^{-1}$.

Transverzalna aberacija TA_s predstavlja rastojanje između tačaka u kojima referentni i prelomljeni zrak probijaju ekran, a izračunava se na osnovu relacije

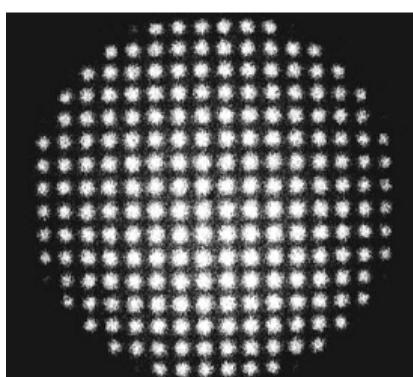
$$TA_s = \sqrt{TA_{sx}^2 + TA_{sy}^2} \quad (3.2.)$$

gde su $T A_{sx}$ i $T A_{sy}$ projekcije ove dužine duž x i y pravca.

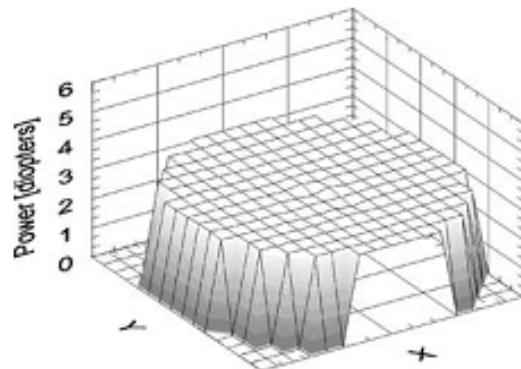
Veličina s izračunava se za koordinate tačke u kojoj laserski snop pada na sočivo, mereno u odnosu na centar sočiva:

$$s = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (3.3.)$$

Na osnovu precizne obrade podataka dobija se Hartmangram za sferno sočivo jačine +3.00 D prikazan na Slici 3.4. a. Distribucija jačine za dato sočivo prikazana je na Slici 3.4. b. (kao što je u radu D. P. Salas-Peimbert)



a.



b.

Slika 3.4. a.) Hartmangram b.) Planarna distribucija jačine sočiva

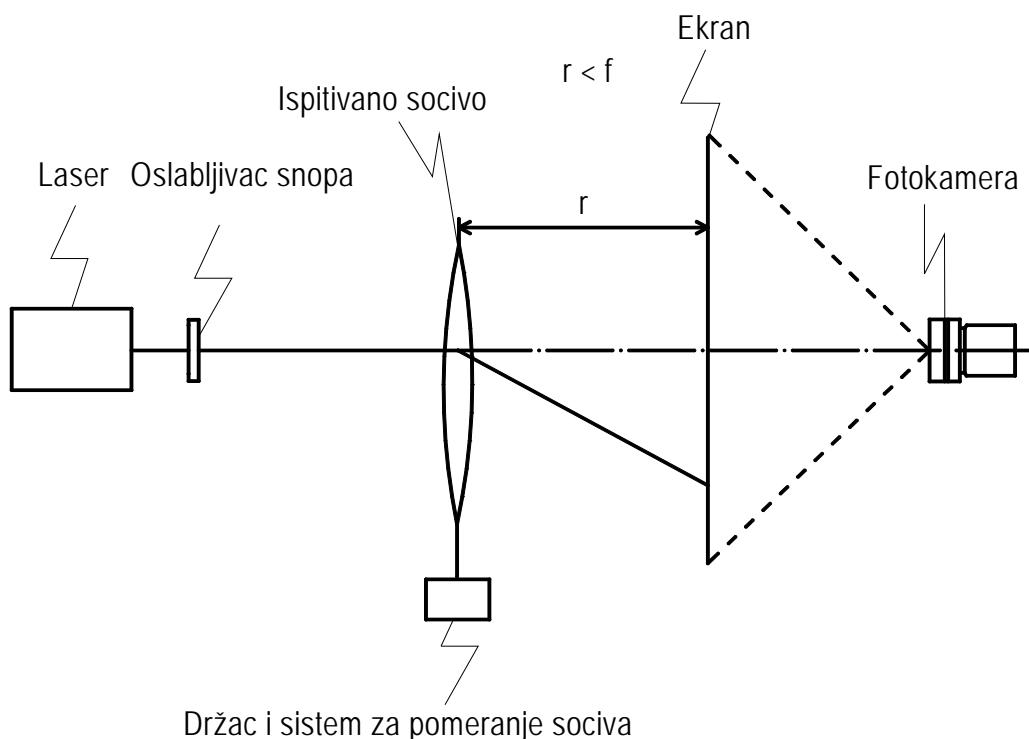
Identičnim postupkom se može odrediti jačina bifokalnog i progresivnog sočiva (kao što je u radu D. P. Salas-Peimbert).

Na osnovu opisanog Hartman testa može se realizovati i modifikovani metod određivanja jačine sočiva i oblike njene planarne raspodele, bez korišćenja Hartmanovog zastora. Takav metod je korišćen u ovom radu.

4. OPIS MERENJA I DISKUSIJA REZULTATA

4.1. Opis aparature

Metod određivanja jačine sočiva, korišćen u ovom radu, se bazira na merenju transverzalne aberacije sočiva.. Na Slici 4.1. je prikazana jednostavna šema aparature koja je korišćena za merenje transverzalne aberacije sfernog sočiva.



Slika 4.1. Jednostavna šema aparature koja korišćena za merenje transverzalne aberacije sfernog sočiva

Kao izvor svetlosnih talasa korišćen je He-Ne laser snage 0.5 mW i talasne dužine 633 nm, fiksiran na držač. Pravac laserskog snopa se ne može menjati tokom merenja.

Sočivo je fiksirano držačem sočiva, koji je montiran na mehanizam za pomeranje. Ovaj mehanizam omogućava precizno pomeranje sočiva u dva međusobno normalna pravca u ravni normalnoj na pravac laserskog snopa. Položaj sočiva u pomenutoj ravni se može odrediti sa tačnošću od 0.1 mm.

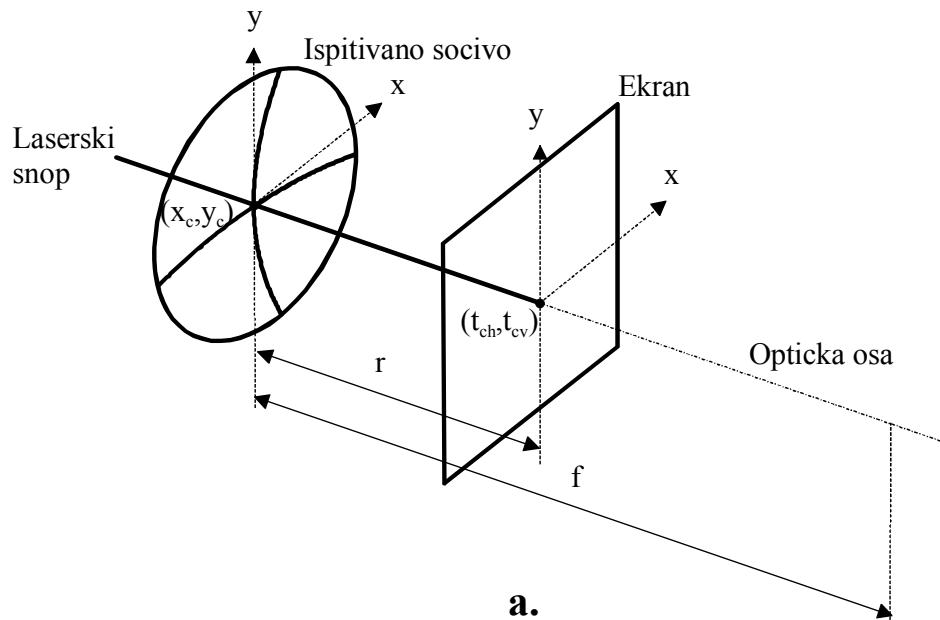
Između lasera i ispitivanog sočiva nalazi se sivi filter, koji ima ulogu oslabljivača laserskog snopa. Oslabljivač se koristi radi sprečavanja pojave saturacije korišćenog CCD senzora.

Iza sočiva, na rastojanju manjem od fokalne dužine sočiva, a u ravni paralelnoj ravni sočiva, nalazi se polutransparentni ekran. Ravan sočiva je ovde definisana zadnjom ivicom sočiva. Na određenom rastojanju r od sočiva, u ravni paralelnoj ravni ekrana, nalazi se digitalni fotoaparat Canon EOS 450D sa senzorom od 12.20 Mpx.

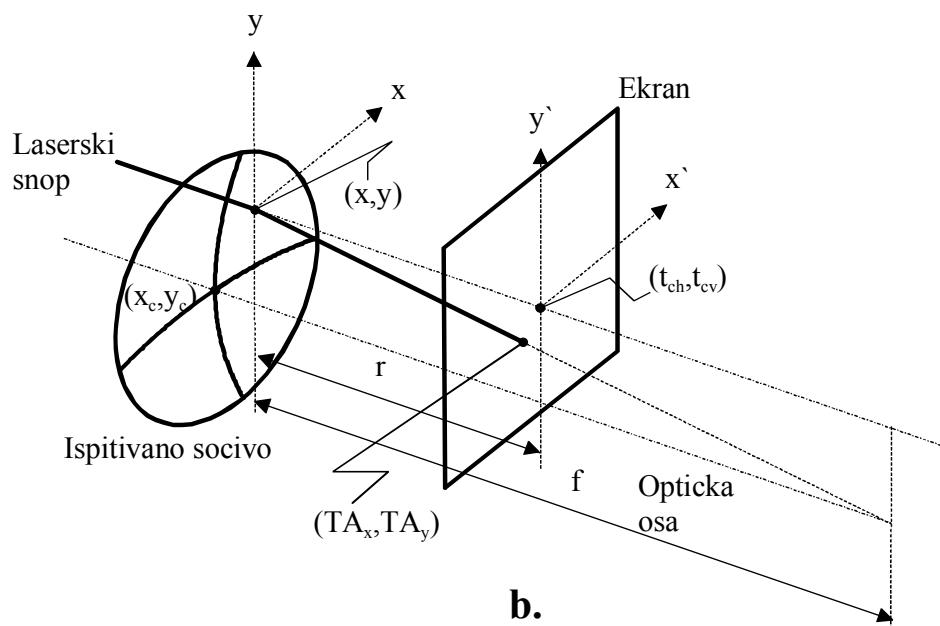
Oslabljeni laserski zrak, normalan na ravan ispitivanog sočiva, pada na sočivo i prelama se. U slučaju sfernog sočiva, ovaj zrak je paralelan optičkoj osi sočiva. Prelomljeni zrak na ekranu formira svetlu tačku. Kada upadni zrak prolazi kroz optički centar sočiva, ne dolazi do prelamanja. Promenom koordinata tačke na sočivu gde pada upadni zrak, menja se i položaj svetle tačke na ekranu. S obzirom da je devijacija laserskog snopa pri prolasku kroz sočivo povezana sa trasverzalnom aberacijom, jačina datog sočiva može se izračunati na isti način kao u opisanoj metodi jednostavnog Hartman testa.

Postavka eksperimenta u ovom radu je slična onoj opisanoj u metodu jednostavnog Hartman testa, osim što se ne koristi Hartmanov zastor. Različiti položaji laserskog zraka se dobijaju pomeranjem sočiva u njegovoj ravni, duž horizontalnog i vertikalnog pravca.

Na Slici 4.2.a prikazano je kretanje laserskog zraka koji prolazi kroz optički centar sočiva. U tom slučaju, koordinate sočiva očitane na nonijusu mehanizma za pomeranje predstavljaju koordinate centra sočiva (x_c, y_c). S obzirom da u ovom slučaju zrak nastavlja da se kreće bez devijacije, na ekranu stvara svetlu tačku sa koordinatama (t_{ch}, t_{cv}). Ako se centar sočiva pomeri u odnosu na laserski snop (Slika 4.2.b), snop će tada padati na sočivo u tački čije su koordinate očitane na nonijusu (x, y). Pošto laserski snop pada van centra sočiva, prisutna je devijacija snopa, pa su koordinate svetle tačke na ekranu (TA_x, TA_y).



a.



b.

Slika 4.2. Kretanje laserskog zraka koji prolazi kroz
a.) optički centar sočiva b.) određenu tačku na površini sočiva

Položaj svetle tačke na ekranu određuju se u odnosu na koordinate tačke proizvedene od zraka koji prolazi kroz centar sočiva i ne prelama se. Takođe, položaj tačke upadnog zraka koji pada na sočivo određuju koordinate datog položaja sočiva u odnosu na početni položaj sočiva kada upadni laserski zrak prolazi kroz optički centar sočiva.

Izraz na osnovu kojeg se izračunava jačina sočiva je prikazan relacijom

$$F = \frac{\sqrt{(TA_x - t_{ch})^2 \cdot k^2 + (TA_y - t_{cv})^2 \cdot k^2}}{r \cdot \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}} \quad (4.1.)$$

gde su

TA_x , TA_y horizontalna i vertikalna koordinata svetle tačke na ekranu kada laserski snop prolazi kroz sočivo u nekoj tački različitoj od centra sočiva

t_{ch} , t_{cv} horizontalna i vertikalna koordinata svetle tačke na ekranu kada laserski snop prolazi kroz centar sočiva (centralna tačka na ekranu)

x , y horizontalna i verikalna koordinata tačke u kojoj laserski zrak pada na sočivo

x_c , y_c horizontalna i vertikalna koordinata centra sočiva

k kalibracioni parametar

r rastojanje između ravni sočiva i ekrana

Koordinate tačke na sočivu u koordinatnom sistemu vezanom za centar sočiva mogu se definisati na osnovu izraza

$$X = x - x_c \quad Y = y - y_c \quad (4.2.)$$

Za svaki izabrani položaj sočiva, svetla tačka formirana na ekranu se snima kamerom. Sa svakog snimka, metodama obrade podataka određuju se vrednost „koordinata trasverzalne aberacije” koordinate svetle tačke na ekranu. Jednostavnim postupkom izračunavanja kalibracionog parametra k i njegovim korišćenjem vrši se konverzija aberacije iz piksela u milimetre. Korišćenjem Relacije (4.1.) izračunava se jačina ispitivanog sočiva za svaku svetu tačku na ekranu.

Na osnovu eksperimentalnih podataka se može prikazati planarna raspodela jačine ispitivanog sočiva.

Detaljni opis merenja i primenjenih metoda obrade podataka biće opisani u sledećem poglavlju.

4.2. Postupak merenja, rezultati i diskusija

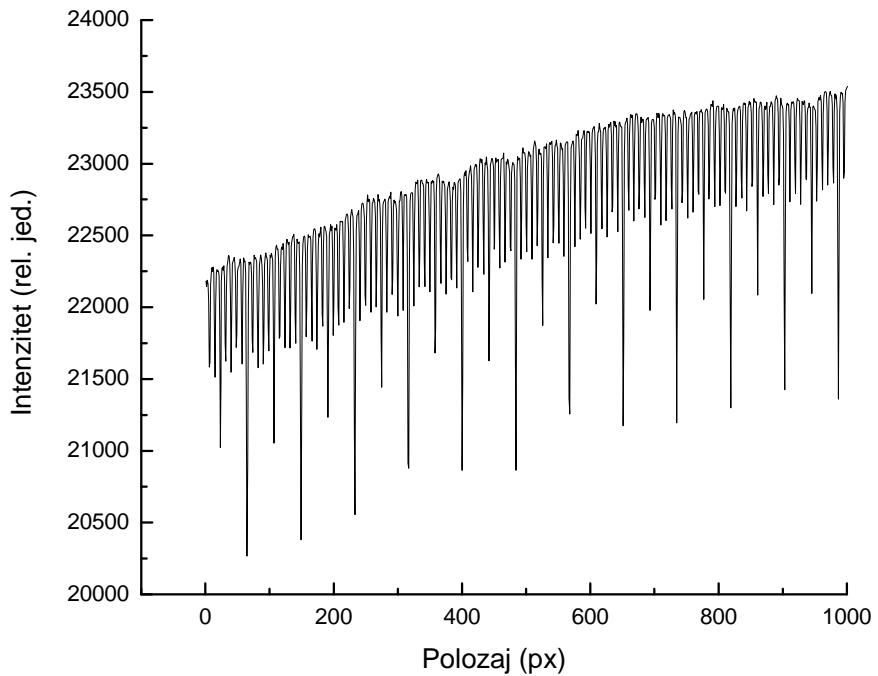
Pomoću opisane aparature (Slika 4.1.) izvršeno je indirektno merenje jačine sfernih sočiva. Za prvi uzorak je uzeto sočivo poznate jačine radi testiranja metoda, a u drugom delu merenja je ispitivano nepoznato sočivo čija je jačina prethodno izmerena fokometrom.

4.2.1. Određivanje jačine poznatog sfernog sočiva

U prvom delu merenja kao uzorak je korišćeno sočivo poznate jačine $F = (+2.5 \pm 0.25) D$, proizvedeno u Optičkoj industriji Gethaldus. Iako je jačina pomenutog sočiva unapred poznata, ova vrednost je proverena merenjem pomoću vizuelnog fokometra. Dijametar sočiva koje se ispituje je 60 mm, a napravljeno je od materijala indeksa prelamanja $n = 1.52$. Sa datim sočivom je izvršeno petnaest merenja i to duž horizontalnog pravca koji prolazi kroz optički centar sočiva i duž dva proizvoljno odabrana horizontalna pravca.

Svi snimci napravljeni fotokamerom su snimljeni u RAW formatu u rezoluciji 4272×2848 px. Očitavanje raspodele intenziteta po snimku je rađeno pomoću softverskog paketa 4Spec. S obzirom da ovaj program podržava samo ulazne grayscale fajlove ekstenzija IMG i TIFF maksimalne rezolucije 1360×1024 px, dobijene snimke je bilo neophodno prilagoditi. Iz tog razloga su svi snimci prebačeni u grayscale TIFF format rezolucije 1360×907 px da bi se održale horizontalne i vertikalne proporcije snimaka.

Pre samog početka merenja sočiva, snima se kalibracioni snimak na osnovu kojeg je izračunat parametar k . Za snimanje kalibracionog snimka korišćena je milimetarska hartija, postavljena na ekran. Kalibracioni snimak za dato rastojanje kamere od ekrana prikazan je na Slici 4.3. Važno je napomenuti da se posle određivanja parametra k , ne sme menjati rastojanje između ekrana i fotokamere, jer se on menja sa promenom ovog rastojanja. Takođe, isto važi i za jednom podešen fokus i zum fotokamere.



Slika 4.3. Kalibracioni snimak za dato rastojanje kamere od ekrana

Očitavanjem koordinata svakog desetog maksimuma zaključeno je da jednom milimetru odgovara 8.3 piksela, za dati položaj kamere. Na osnovu relacije:

$$k = \frac{x}{a} \quad (4.3)$$

gde je a broj piksela između očitanih vrednosti svakog desetog maksimuma što u milimetrima odgovara dužini x, izračunata je vrednost kalibracionog parametra $k = 1.2 \cdot 10^{-4}$ m / px.

Izraz na osnovu kojeg je izračunata greška kalibracionog parametra je dat relacijom :

$$\Delta k = \left(\frac{\partial k}{\partial a} \right) \cdot (\Delta a) \quad (4.4.)$$

Procenjena statistička greška očitavanja broja piksela između svakog desetog maksimuma na kalibracionom snimku iznosi $\Delta a = \pm 0.1$ px, pa je za grešku indirektno merene veličine kalibracionog parametra dobijena vrednost $\Delta k = 1.417 \cdot 10^{-6}$ m/px.

Nakon izračunatog kalibracionog parametra, određuje se položaj centra sočiva. Prvo se odredi položaj tačke na ekranu za slučaj kada nema ispitivanog sočiva u držaču tako što se pomoću markera obeleži dati položaj tačke na ekranu. Zatim se u držač stavi ispitivano sočivo i uz pomoć mehanizma za pomeranje se pomera manuelno, sve dok se laserski snop ne poklopi sa

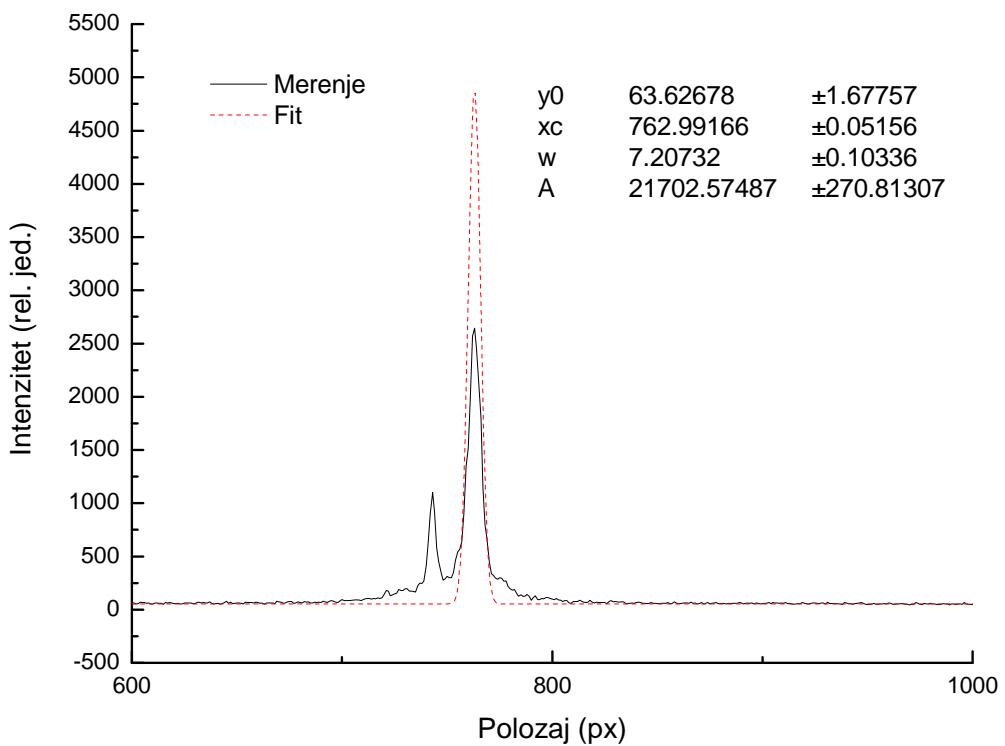
obeleženom tačkom na ekranu. Kada se pomenute dve tačke poklope sočivo je centrirano i određene su koordinate centra sočiva x_c i y_c koje se očitavaju na nonijusu. Tada se pomoću fotokamere snimi ekran sa svetлом tačkom. Vertikalna t_{cv} i horizontalna t_{ch} koordinata dobijene centralne tačke na ekranu se dobijaju očitavanjem ovog snimka po vertikali i horizontali. Na osnovu prepostavke da laserski snop ima Gausovu raspodelu, pomenute koordinate t_{ch} i t_{cv} se dobijaju fitovanjem odgovarajućih raspodela intenziteta na Gausov profil.

Po određivanju položaja centralne tačke na ekranu pristupa se pomerenju sočiva i merenja ostalih koordinata neophodnih za izračunavanje transverzalne aberacije. Naime, za svaki položaj sočiva, koji se podešava nonijusom na držaču, fotografisani su položaji odgovarajućih svetlih tačaka na ekranu. Isti postupak koji je primjenjen za određivanje koordinata centralne tačke primjenjuje se i za određivanje koordinata svake svetle tačke na ekranu. Na Slici 4.4. prikazan je snimak jedne svetle tačke za slučaj kada laserski snop ne prolazi kroz centar sočiva.



Slika 4.4. Snimak jedne svetle tačke za slučaj kada laserski snop ne prolazi kroz centar sočiva.

Najbitniji parametar fitovanja eksperimentalnih raspodela intenziteta na Gausovu raspodelu za svaku tačku pojedinačno, u ovom radu, je vrednost koordinate položaja maksimuma profila. Vrednost ovog parametra predstavlja jednu od dve pomenute koordinate položaja date svetle tačke. Na ovaj način se određuju koordinate TA_x i TA_y , koje predstavljaju koordinate transverzalne aberacije TA. Primer određivanja horizontalne komponente na osnovu fitovanja eksperimentalne krive na Gausovu raspodelu za datu tačku prikazan je na Slici 4.5.



Slika 4.5. Primer fitovanja eksperimentalne krive na Gausov profil

Na osnovu Relacije (4.1.) izračunavaju se vrednosti jačine ispitivanog sočiva. Za sočivo poznate jačine, rezultati su prikazani u Tabeli 4.1. Dati rezultati su dobijeni za rastojanje između ravni sočiva i ekrana od $r = 141$ mm. S obzirom da je merenje izvršeno metrom greška očitavanja ove veličine iznosi $\Delta r = 0.5$ mm.

Br. merenja	TA_x (px)	ΔTA_x (px)	TA_y (px)	ΔTA_y (px)	X (mm)	Y (mm)	F (D)	ΔF (D)
1.	780.5	0.05	480.3	0.06	5.6	0	2.58	0.05
2.	811.8	0.05	480.2	0.1	15.6	0	2.64	0.04
3.	845.3	0.05	481	0.05	25.6	0	2.73	0.04
4.	719.4	0.06	481.1	0.06	-14.4	0	2.62	0.04
5.	686.6	0.05	481.1	0.06	-14.4	0	2.70	0.03
6.	685.5	0.05	435.2	0.06	-24.4	14.1	2.72	0.03
7.	718.6	0.04	436.6	0.08	-14.4	14.1	2.64	0.03
8.	763	0.05	437.5	0.09	0	14.1	2.55	0.04
9.	780.2	0.06	437	0.07	5.6	14.1	2.57	0.03
10.	811.4	0.04	436.8	0.06	15.6	14.1	2.60	0.03
11.	812.6	0.04	531.4	0.06	15.6	-15.9	2.74	0.04
12.	782.1	0.05	530.9	0.06	5.6	-15.9	2.77	0.04
13.	764.2	0.05	528.6	0.48	0	-15.9	2.64	0.04
14.	722.8	0.04	532.1	0.06	-14.4	-15.9	2.65	0.03
15.	686	0.06	533.2	0.05	-24.4	-15.9	2.77	0.04

Tabela 4.1.

Greška indirektno merene veličine F izračunata je na osnovu zakona o propagaciji greške (Relacija (4.5.))

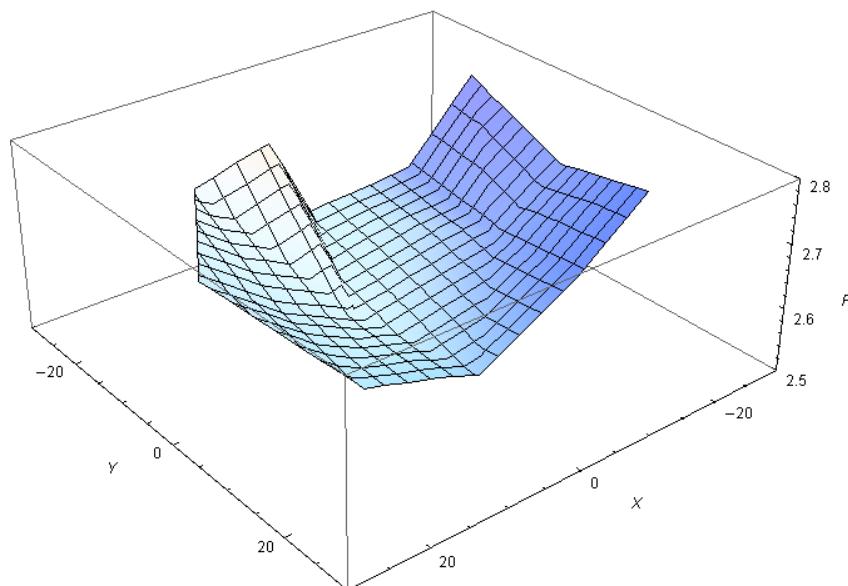
$$\Delta F = \left[\left(\frac{\partial F}{\partial TA_x} \right)^2 \cdot (\Delta TA_x)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial TA_y} \right)^2 \cdot (\Delta TA_y)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial t_{ch}} \right)^2 \cdot (\Delta t_{ch})^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial F}{\partial t_{cv}} \right)^2 \cdot (\Delta t_{cv})^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial k} \right)^2 \cdot (\Delta k)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial x} \right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y} \right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial F}{\partial x_c} \right)^2 \cdot (\Delta x_c)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y_c} \right)^2 \cdot (\Delta y_c)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial r} \right)^2 \cdot (\Delta r)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4.5)$$

Δx i Δy su greške x i y koordinata očitanih sa nonijusa, a Δx_c i Δy_c su greške koordinate centra sočiva. Vrednost ovih grešaka očitavanja sa nonijusa iznosi $5 \cdot 10^{-2}$ mm.

$$\Delta X = \sqrt{\left(\frac{\partial X}{\partial x} \right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial X}{\partial x_c} \right)^2 \cdot (\Delta x_c)^2} \quad \Delta Y = \sqrt{\left(\frac{\partial Y}{\partial y} \right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \left(\frac{\partial Y}{\partial y_c} \right)^2 \cdot (\Delta y_c)^2} \quad (4.6.)$$

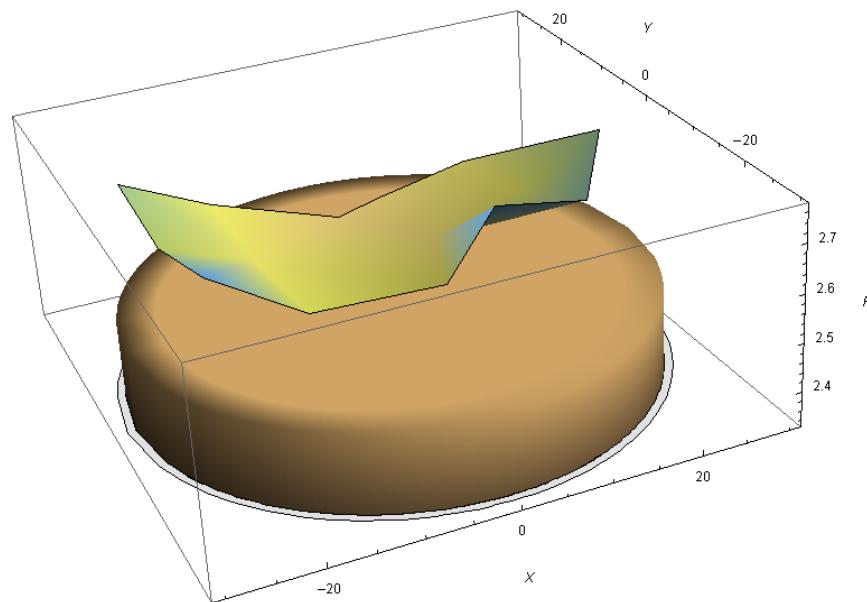
Na osnovu zakona o propagaciji greške (Relacija (4.6.)) dobijene su vrednosti greške za koordinate laserskog zraka na sočivu u koordinatnom sistemu vezanom za centar sočiva. Vrednosti pomenutih grešaka su iste za sve merene tačke i iznose $\Delta X = \Delta Y = 0.0707$ mm.

Rezultati merenja iz Tabele 4.1. prikazani su grafički na Slici 4.6. Važno je napomenuti da na grafiku prikazana površ predstavlja površ dobijenu na osnovu izmerenih tačaka, a ne ekstrapolisanu površ po celoj aperturi sočiva. Na apscisi i ordinati grafika se nalaze koordinate tačke na sočivu u koordinatnom sistemu vezanom za centar sočiva izražene u mm. Na z osi grafika su vrednosti jačine sočiva izražene u D.



Slika 4.6. Grafički prikaz rezultata merenja, u vidu planarne raspodele jačine sočiva, dobijenih za sočivo poznate jačine +2.5 D

Na Slici 4.7. je takođe data raspodela jačine kao i na slici 4.6. (gornja površ), ali je prikazana i raspodela jačine za idealno sočivo jačine +2.5 D i dijametra 60 mm (donja površ), radi vizuelnog poređenja dobijenih rezultata sa idelanim slučajem. Pomenuta donja površ čija visina +2.5 D predstavlja unapred poznatu jačinu ispitivanog sočiva datu od strane proizvođača.



Slika 4.7. Grafički prikaz rezultata merenja. Planarna raspodela jačine sočiva (gornja površ). Raspodela jačine za idealno sočivo jačine +2.5 D (donja površ)

Iz Tabele 4.1 i Slike 4.6. i 4.7. lako je videti da maksimalno i minimalno odstupanje merenih jačina sočiva od vrednosti koje je proizvođač naveo iznose 0.27 D i 0.05 D redom, što odgovara odstupanjima od 10.8 % odnosno 2 % respektivno. Takođe se može primetiti da su sve izmerene vrednosti veće od onih navedenih od strane proizvođača. Ova činjenica može ukazivati na to da vrednost rastojanja između ravni sočiva i ekrana nije dovoljno precizno izmerena. Može se još primetiti i da se izmerena jačina sočiva povećava u smeru smanjenja Y koordinate. Najverovatniji uzrok ove pojave može biti neparalelnost između ravni sočiva i ekrana.

Iako su dobijeni podaci više nego zadovoljavajući, neophodan je i dalji rad na poboljšanju same aparature. Naročito je potrebno osigurati paralelnost između ravni sočiva i ekrana kao i preciznije merenje njihovog međusobnog rastojanja.

Treba napomenuti da se merenje jačine sočiva vizuelnim fokometrom vrši u centru sočiva. Greška ovakvog merenja je ± 0.25 D. Uz pretpostavku da je jačina sočiva ista u svim tačkama kao i da je maksimalna dobijena greška 0.27 D, može se zaključiti da je opisani metod određivanja planarne raspodele jačine sočiva veoma pouzdan. Očekuje se da će metod dati bolje rezultate ako se izvrše predložena poboljšanja aparature.

4.2.2.Određivanje jačine nepoznatog sfernog sočiva

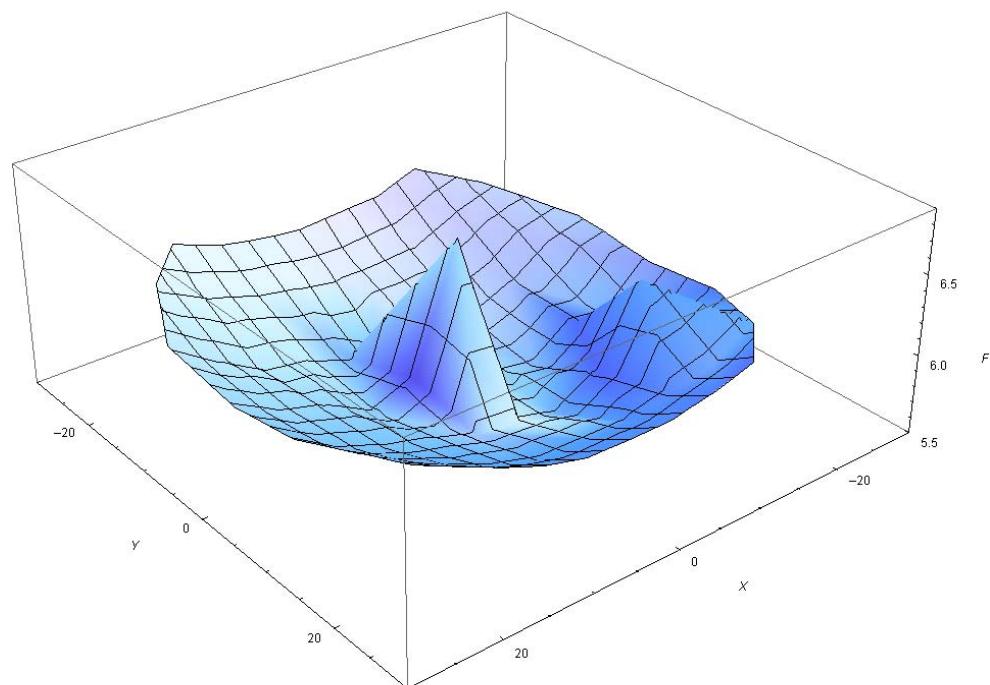
S obzirom da je pomoću test sočiva poznate jačine pokazano da je metod pouzdan, u drugom delu merenja ispitivano je nepravilno proizvedeno tzv. škart sočivo. Ova vrsta sočiva je odabrana da bi se utvrdilo da li se pomoću opisanog metoda mogu ustanoviti i nepravilnosti sočiva. Rezultati ispitivanja škart sočiva ujedno će biti i test da li se opisani metod može koristiti i za određivanje planarne raspodele varifokalnih sočiva. Pre početka merenja, pomoću ručnog i automatskog fokometra, je izmerena vrednost datog sočiva koja iznosi $F = + (5.5 \pm 0.25) D$. Dijametar ispitivanog sočiva je 60 mm, a materijal od koga je napravljen sočivo ima indeks prelamanja $n = 1.52$.

Broj merenja	TA_x (px)	ΔTA_x (px)	TA_y (px)	ΔTA_y (px)	X (mm)	Y (mm)	F (D)	ΔF (D)
1.	524.6	0.08	350.9	0.06	24.1	9.1	6.01	0.05
2.	483.6	0.1	227.7	0.16	19.1	19.1	6.15	0.06
3.	420.5	0.15	235.2	0.06	14.1	19.1	5.99	0.06
4.	474.9	0.17	237.7	0.08	9.1	19.1	5.93	0.07
5.	536.6	0.15	239.4	0.05	4.1	19.1	5.86	0.06
6.	594.8	0.18	239.2	0.06	0.9	19.1	5.87	0.06
7.	654.4	0.17	239.1	0.05	5.9	19.1	5.87	0.06
8.	711.8	0.13	236.4	0.05	10.9	19.1	5.95	0.05
9.	768.6	0.06	232.8	0.04	15.9	19.1	6.07	0.05
10.	827	0.05	227.2	0.04	20.9	19.1	6.20	0.05
11.	889.2	0.03	166.7	0.03	15.9	24.1	6.22	0.05
12.	952.6	0.06	172.1	0.04	10.9	24.1	6.10	0.05
13.	893.4	0.14	174.9	0.04	5.9	24.1	6.03	0.05
14.	831.6	0.2	175.3	0.05	0.9	24.1	6.02	0.05
15.	770.5	0.19	175.8	0.05	4.1	24.1	6.02	0.05
16.	708.7	0.17	173.6	0.03	9.1	24.1	6.07	0.05
17.	651.3	0.11	169.4	0.04	14.1	24.1	6.15	0.05
18.	767.6	0.2	577	0.12	0.9	0	6.60	0.53
19.	821.5	0.14	580.1	0.08	5.9	0	5.82	0.09
20.	881.4	0.17	584	0.09	10.9	0	5.70	0.06
21.	941.5	0.11	704.9	0.06	15.9	0	5.85	0.06
22.	1006.9	0.07	700.3	0.07	20.9	0	5.94	0.05
23.	656.5	0.03	696.9	0.07	25.9	0	6.10	0.05
24.	602.8	0.17	695.2	0.1	4.1	0	5.62	0.11
25.	543.9	0.14	694.3	0.08	9.1	0	5.58	0.06
26.	489.7	0.17	694.8	0.11	14.1	0	5.76	0.06
27.	423.1	0.1	696.8	0.09	19.1	0	5.71	0.05
28.	421.5	0.1	700.8	0.11	24.1	0	5.96	0.05

Broj merenja	TA_x (px)	ΔTA_x (px)	TA_y (px)	ΔTA_y (px)	X (mm)	Y (mm)	F (D)	ΔF (D)
29.	479.1	0.06	706	0.09	24.1	10.9	6.01	0.05
30.	544	0.17	768.5	0.16	19.1	10.9	5.94	0.05
31.	601.3	0.16	762.6	0.1	14.1	10.9	5.77	0.05
32.	652.8	0.16	760.2	0.15	9.1	10.9	5.66	0.06
33.	710.1	0.2	759	0.15	4.1	10.9	5.69	0.06
34.	768.4	0.19	759.7	0.14	0.9	10.9	5.52	0.06
35.	824	0.14	762	0.14	5.9	10.9	5.66	0.06
36.	881.4	0.14	766.3	0.19	10.9	10.9	5.77	0.06
37.	944.4	0.13	346	0.12	15.9	10.9	5.81	0.05
38.	1011.7	0.07	349.5	0.07	20.9	10.9	5.98	0.05
39.	954.4	0.03	353	0.03	25.9	10.9	6.17	0.05
40.	889.4	0.02	354.1	0.03	20.9	20.9	6.20	0.05
41.	829.2	0.06	355.8	0.03	15.9	20.9	6.06	0.05
42.	772.2	0.11	355.8	0.06	10.9	20.9	5.97	0.05
43.	710.5	0.08	356.5	0.06	5.9	20.9	5.93	0.05
44.	658.3	0.16	355.7	0.05	0.9	20.9	5.88	0.05
45.	601	0.06	354.4	0.06	4.1	20.9	5.87	0.05
46.	537.5	0.07	352.8	0.05	9.1	20.9	5.90	0.05
47.	478.1	0.15	577	0.05	14.1	20.9	6.02	0.05
48.	537	0.03	580.1	0.03	19.1	20.9	6.10	0.05
49.	598.3	0.04	584	0.06	14.1	25.9	6.17	0.05
50.	653.3	0.09	704.9	0.03	9.1	25.9	6.07	0.05
51.	715	0.2	700.3	0.03	4.1	25.9	6.06	0.05
52.	774.5	0.06	696.9	0.04	0.9	25.9	6.04	0.05
53.	833.8	0.11	695.2	0.03	5.9	25.9	6.07	0.05
54.	896.9	0.05	694.3	0.03	10.9	25.9	6.12	0.05
55.	1010.1	0.03	694.8	0.06	15.9	25.9	6.23	0.05
56.	943.2	0.04	696.8	0.05	25.9	9.1	6.17	0.05
57.	882.5	0.08	700.8	0.06	20.9	9.1	5.99	0.05
58.	824.1	0.09	706	0.05	15.9	9.1	5.88	0.53
59.	767.1	0.12	768.5	0.06	10.9	9.1	5.81	0.09
60.	710.1	0.15	762.6	0.06	5.9	9.1	5.72	0.06
61.	657.9	0.18	760.2	0.09	0.9	9.1	5.70	0.06
62.	597.7	0.25	759	0.09	4.1	9.1	5.62	0.05
63.	767.6	0.2	759.7	0.09	9.1	9.1	5.79	0.05
64.	821.5	0.15	762	0.08	14.1	9.1	6.27	0.11
65.	881.4	0.12	766.3	0.07	19.1	9.1	5.88	0.06

Tabela 4.2.

Primenom opisanog postupka merenja transverzalne aberacije i identičnim postupkom obrade podataka dobijeni su rezultati za ispitivano, škart, sočivo koji su prikazani u Tabeli 4.2. Rezultati su dobijeni za rastojanje između ravni sočiva i ekrana od $r = (149 \pm 0.5)$ mm. Postupak izračunavanja greške indirektno merene veličine F izvršen je na isti način kao što je opisano za slučaj prethodnog sočiva (Relacija (4.5)). Grafik dođen na osnovu rezultata datih u Tabeli 4.2. prikazan je na Slici 4.8.



Slika 4.8. Grafički prikaz rezultata u vidu planarne raspodele jačine nepoznatog sočiva

Na z osi prikazanog grafika nalaze se vrednosti jačine sočiva izražene u D, a na x i y osi se nalaze koordinate tačke na sočivu u koordinatnom sistemu vezanom za centar sočiva, izražene u mm.

Rezultati prikazani u Tabeli 4.2 i grafik prikazan na Slici 4.8. pokazuju da najmanje odstupanje izmerenih rezultata od vrednosti jačine sočiva izmrene ručnim i automatskim fokometrom iznosi 0.02 D, a najveće 1.1 D. Izraženo u procentima, vrednost minimalnog odstupanja iznosi 0.36 %, a maksimalnog 20 %. Mora se voditi računa da je fokometrom izmerena jačina sočiva samo u centru sočiva. Prema tome, navedena odstupanja su dobijena pod pretpostavkom da sočivo ima istu jačinu u svim tačkama. Takođe, na osnovu prikazanih rezultata se može primetiti da su sve izmerene vrednosti veće od vrednosti izmerene fokometrom, što može ukazati na to da vrednost rastojanja između ravni sočiva i ekrana, kao i u prethodnom slučaju merenja jačine test sočiva, nije dovoljno precizno izmerena. Za razliku od test sočiva, ovo sočivo je mnogo bolje pozicionirano na držač, pa ne postoji tendencija porasta jačine sočiva u pravcu smanjenja vrednosti Y koordinate. Ovo takođe može da znači da je, pri ovom merenju, delimično otklonjena nepravilnost u paralelnosti između ravni sočiva i ekrana. Međutim, u ovom slučaju se primećuje porast jačine ka periferiji sočiva, što se najverovatnije može objasniti postojanjem nepravilnosti u procesu proizvodnje sočiva.

Na grafiku prikazanom na Slici 4.8. vidi se da je najveća izmerena vrednost jačine sočiva, odnosno najveće odstupanje od vrednosti + 5.5 D, u tački vrlo bliskoj centru sočiva. Odstupanje od 1.1 D u tački ($X = 0.9$ mm, $Y = 0.0$ mm) veoma blizu centra je najverovatnije posledica omaške pri očitavanju koordinata položaja sočiva. Naime, jednostavnim računom se može pokazati da ako se za x koordinatu sočiva uzme vrednost za 0.1 mm veća od izmerene, dobija se jačina od $(+5.94 \pm 0.44)$ D. Odavde se može i izvesti zaključak da nesigurnost određivanja jačine u delu sočiva veoma blizu centra (do rastojanja od nekoliko mm) raste i da metod tu nije precizan.

Iz prikazanih rezultata merenja, može se zaključiti da se metod opisan u ovom radu može koristiti i za snimanje planarne raspodele jačine kako sfernih, tako i bifokalnih, cilindričnih ili varifokalnih sočiva. Treba napomenuti da ovaj metod može biti od velike koristi za ispitivanje nepravilnosti proizvedenih sočiva, ne samo naočalnih već i sočiva za druge namene.

ZAKLJUČAK

U ovom radu opisan je metod određivanja planarne raspodele jačine sfernih sočiva, koji se bazira na merenju transverzalne aberacije sočiva.

Rezultati merenja prostorne raspodele jačine sfernog sočiva poznate jačine, pokazuju da su maksimalno i minimalno odstupanje merenih jačina od vrednosti koje je proizvođač naveo 10.8 % odnosno 2 % respektivno, što znači da je metod merenja veoma pouzdan.

Za drugo sferno sočivo sa defektima, takođe je snimljena planarna raspodela jačine i zaključeno je da se metod može koristiti i u svrhu snimanja varifokalnih sočiva. Takođe je zaključeno da metod nije dovoljno pouzdan za delove sočiva koji su u neposrednoj blizini (od nekoliko mm) od optičkog centra sočiva.

Pored navedenih zaključaka, predloženo je i kako poboljšati aparaturu u cilju dobijanja veće preciznosti.

LITERATURA

1. Colin Fowler, Keziah Latham Petre, Spectacle Lenses, Theory and Practice, Butterworth-Heinemann, A division of Reed Educational and Professional Publishing Ltd (2001.)
2. Jenean Carlton, Frames and Lenses, SLACK Incorporated, USA (2000.)
3. Essilor, Ophthalmic Optics Files No.1, No.2, No.3
4. Sears, Optika, Naučna knjiga Beograd (1963)
5. B. Durić, Ž. Ćulum, Fizika IV deo, Optika, Naučna knjiga Beograd, (1966)
6. Đ. Mušicki, Uvod u teorijasku fiziku III/2, Prirodno-matematički fakultet, Beograd (1987.)
7. D. P. Salas-Peimbert, G. Trujillo-Schiaffino, J.A. Gonzales-Silva and S. Almazan-Cueellar, Simple Hartmann test data interpretation for ophthalmic lenses, *Review of Scientific Instruments* 77 (2006)
8. W.E. Humphrey, C. E. Campbell, and J. E. Sheedy, U.S. Patent No. 5 303 022 (12 April 1994).
9. Y. Ikezawa, E. Yanagi, and T. Kato, U.S. Patent No. 6 145 989 (14 November 2000.)
10. M. Abitol, E. Tederry, and E. Memoun, U.S. Patent No. 5 355 210 (5 Januar 1999)
11. D.H. Schulte, Appl. Opt. 7, 119 (1968.)
12. D. Malacara, App. Opt. 11, 99 (1972)
13. A. Morales and D. Malacara, Appl. Opt. 22, 3975 (1983)
14. L. Dame and F. Vakili, Opt. Eng. (Bellingham) 23, 759 (1984).
15. M. Servin, D. Malacala, J. L. Marroquin, and F. J. Cuevas, Opt. Eng. (Bellingham) 35, 1677 (1996)
16. D. Malacara and Z. Malacara, Opt. Eng. (Bellingham) 31, 1551 (1992)
17. C. Castellini, F. Fancini, and B. Tiribilli, Appl. Opt. 33, 4120 (1994)
18. G. Trujillo-Schiaffino and D. Malacara-Hernandez, Opt. Eng. (Bellingham) 41, 2910 (2002.)
19. D. P. Salas-Peimbert, G. Trujillo-Schiaffino, D. Malacara-Hernandez, D. Malacara-Doblado, and S. Almazan-Cueellar, proc. SPIE 5622, 102 (2004)
20. www.essilor.com
21. www.oiic-ca.com

BIOGRAFIJA

Nataša Antonijević, rođena 05.07.1980. u Novom Sadu. Pohađala je osnovnu školu „Prva vojvođanska brigada” u Novom Sadu, a 1994. godine upisala Gimnaziju „Jovan Jovanović-Zmaj” u Novom Sadu. Po završetku gimnazije 1999. godine upisuje Prirodno-matematički fakultet na Univerzitetu u Novom Sadu, na Departmanu za fiziku, smer diplomirani fizičar. Godine 2006. završava osnovne studije i na istom fakultetu upisuje Master studije, smer medicinska fizika. Sve ispite, predviđene planom i programom, je položila 2008. godine.



UNIVERZITET U NOVOM SADU
PRIRODNO-MATEMATIČKI FAKULTET

KLJUČNA DOKUMENTACIJSKA INFORMACIJA

Redni broj:

RBR

Identifikacioni broj:

IBR

Tip dokumentacije:

Monografska dokumentacija

TD

Tip zapisa:

Tekstualni štampani materijal

TZ

Vrsta rada:

Master rad

VR

Autor:

Nataša Antonijević

AU

Mentor:

Dr Igor Savić, docent

MN

Naslov rada:

Određivanje planarne raspodele jačine sočiva

NR

Jezik publikacije:

srpski (latinica)

JP

Jezik izvoda:

srpski/engleski

JI

Zemlja publikovanja:

Srbija

ZP

Uže geografsko područje:

Vojvodina

UGP

Godina:

2010.

GO

Izdavač:

Autorski reprint

IZ

Mesto i adresa:

Prirodno-matematički fakultet, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad

MA

Fizički opis rada:

(4/35/2/26/0/0)

FO

Naučna oblast:

Fizika

NO

Naučna disciplina:

Optika

ND

Predmetna odrednica/ ključne reči:

Jačina sočiva

PO

UDK

Čuva se:

Biblioteka departmana za fiziku, PMF-a u Novom Sadu

ČU

Važna napomena:

Nema

VN

Izvod:

U radu je prikazan i testiran metod za snimanje planarne raspodele jačine sočiva. Zaključeno je da je metod dobar i predložena su poboljšanja aparature u cilju povećanja preciznosti.

Datum prihvatanja teme od NN veća:

DP

Datum odrbrane:

DO

Članovi komisije:

KO

Predsednik:

Dr Zoran Mijatović, redovan profesor

član:

Dr Srđan Rakić, vanredni profesor

član:

Dr Igor Savić, docent

UNIVERSITY OF NOVI SAD
FACULTY OF SCIENCE AND MATHEMATICS

KEY WORDS DOCUMENTATION

<i>Accession number:</i>	
ANO	
<i>Identification number:</i>	
INO	
<i>Document type:</i>	Monograph publication
DT	
<i>Type of record:</i>	Textual printed material
TR	
<i>Content code:</i>	Final paper
CC	
<i>Author:</i>	Nataša Antonijević
AU	
<i>Mentor/comentor:</i>	Igor Savić, assistant professor
MN	
<i>Title:</i>	Determination of the planar distribution of lens power
TI	
<i>Language of text:</i>	Serbian (Latin)
LT	
<i>Language of abstract:</i>	English
LA	
<i>Country of publication:</i>	Serbia and Montenegro
CP	
<i>Locality of publication:</i>	Vojvodina
LP	
<i>Publication year:</i>	2010.
PY	
<i>Publisher:</i>	Author's reprint
PU	
<i>Publication place:</i>	Faculty of Science and Mathematics, Trg Dositeja Obradovića 4, Novi Sad
PP	
<i>Physical description:</i>	(4/35/2/26/0/0)
PD	
<i>Scientific field:</i>	Physics
SF	
<i>Scientific discipline:</i>	Optics
SD	
<i>Subject/ Key words:</i>	Lens power
SKW	
UC	
<i>Holding data:</i>	Library of Department of Physics, Trg Dositeja Obradovića 4
HD	
<i>Note:</i>	none
N	
<i>Abstract:</i>	This work describes a method used to determinate the planar distribution of lens power. A basic conclusion of this work is that the method is sound. However and in addition, suggestions are given of how to improve the experimental setup. These suggestions are designed to ensure more precise measures are obtainable in future procedures..
<i>Accepted by the Scientific Board:</i>	
ASB	

Defended on:

DE

Thesis defend board:

DB

President:

Dr Zoran Mijatović, full professor

Member:

Dr Srđan Rakić, assistant professor

Member:

Dr Igor Savić, assistant professor