

ing. RANETA-DORINA BODEA

TEZA DE DOCTORAT

CONTRIBUȚII PRIVIND SINTEZA SUBANSAMBLURILOR OPTICE CORECTATE LA
ABERAȚII CROMATICE ȘI SPECTRU SECUNDAR

Conducător științific:
prof. dr. ing. IOAN NICOARĂ

UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"	
TIMIȘOARA	
BIBLIOTECA CENTRALĂ	
Nr. volum	1
Dulap	369 Lit. C

2004

INTRODUCERE

Optica, de-a lungul timpului, a fost chemată, ca nici o altă știință să remodeleze atât macrocosmosul cât și microcosmosul.

Treptat, multe fațete ale activității și vieții umane au putut fi cunoscute, respectiv s-au dezvoltat prin aportul nemijlocit al opticii, ca parte a fizicii și matematicii – științe fundamentale – respectiv a echipamentelor optice – ca rezultat al ingineriei optice.

Aplicațiile concrete ale opticii – extinse în toate domeniile de activitate – se pot clasifica în trei mari categorii:

- ◆ Produse a căror funcționalitate se bazează exclusiv pe principii optice: instrumente tradiționale de observare și proiecție, camere digitale foto sau de luat vederi, sisteme de transmitere a informației prin fibră optică, sisteme de stocare și citire optică a informației, aparate care deserveșc domeniul medical, aparate de măsurare bazate pe interferometrie, spectrofotometre, instrumente cu diverse destinații bazate pe laseri etc.
- ◆ Module ale unor sisteme complexe: unități CD-ROM, CD-RW, DVD ale calculatoarelor, subansambluri optice ale scannerelor, copiatoarelor, imprimantelor etc.
- ◆ O gama largă de componente din construcția subansamblurilor opto-mecanice sau opto-electronice, de tipul senzorilor și traductorilor optici, utilizați pentru evaluarea unor parametri fizici de natură foarte diversă.

Optica este, de fapt, o ramură a fizicii, care, ca știință fundamentală, a statuat legi de descriere a fenomenelor. Realizarea unui produs pe principii optice presupune, însă, o etapă sine qua non, aproape tot atât de laborioasă și dificilă ca și descoperirea fenomenului în sine, etapă care revine inginerului. Pomind de la cunoștințele furnizate de fizicieni, *ingineria optică* are un statut clar de știință aplicativă și are ca scop elaborarea algoritmilor de proiectare constructivă și tehnologică, în care sunt implicate atât sinteza, cât și analiza sistemelor optice.

În optică s-a manifestat, din punct de vedere istoric, o situație paradoxală. Fizicienii au descoperit legile refracției, reflexiei, dispersiei, difracției, interferenței, polarizării etc. dar nu

au dovedit un interes prea mare pentru proiectarea concretă a elementelor și sistemelor optice.

Ingineria optică, acea ramură aplicativă căreia îi revine sarcinade a realiza sinteza și execuția sistemului optic, s-a dezvoltat în paralel și cu mare întârziere față de optica teoretică.

Începuturile ingineriei optice sunt legate de numele matematicianului Gauss, care, prin definirea *domeniului paraxial* și stabilirea ecuațiilor de formare a imaginii în dioptrica de ordinul I, a fost primul care a pus la dispoziția fabricanților de instrumente optice, un set de relații simple prin care se putea imagina un calcul de gabarit al sistemului și se putea controla, cu oarecare aproximație, poziția planelor conjugate. Optica gaussiană este, însă, importantă mai ales pentru că, geometric, descrie sistemele optice ideale. Și în prezent caracteristicile de referință ale sistemelor optice se determină cu relațiile indicate de Gauss.

Următoarele contribuții care conduc spre definirea unor criterii de proiectare aparțin tot unui matematician - Phillip Ludwig von Seidel. Acesta dezvoltă, de fapt, *dioptrica de ordinul III*. Ingineria optică modernă lucrează cu conceptele introduse de Seidel care a definit aberația sferică, coma, astigmatismul, curbura de câmp și distorsiunea. Aceștia li se atașau aberațiile cromatice, descoperite de Newton.

Prima lucrare de mare extindere, cu referire directă la proiectarea sistemelor optice, aparține profesorului londonez Alexander Eugene Conrady, care, pe lângă meritul de a fi sintetizat toate cunoștințele practice anterioare, le-a expus într-o formă coerentă și adresată direct inginerului proiectant. Contribuția sa majoră a constat în exploatarea teoriei aberațiilor de ordinul III, pe care le-a numit *aberații primare* și cu ajutorul cărora a elaborat algoritmi de sinteză a componentelor lenticulare și a oglinzilor. Rudolf Kingslake își asumă rolul de continuator al operei lui Conrady și devine el însuși un nume important în evoluția ingineriei optice a secolului trecut.

În prezent, există mai multe manuale valoroase de inginerie optică, printre care lucrarea intitulată *Handbook of Optics* și editată prin sponsorizarea OSA (*Optical Society of America*) este probabil cea mai amplă și cuprinzătoare sinteză a cunoștințelor teoretice și aplicative despre optică din toate timpurile. Pe parcursul a peste 3000 de pagini, care conțin 82 de capitole având tot atâția autori, se găsesc informații complete privind fundamentele teoretice ale opticii, calculul de gabarit al aparatelor optice, metodele de evaluare a calității imaginii, tehnologiile de execuție a componentelor și sistemelor, indicații privind alegerea materialelor pentru piesele optice și acoperirile cu straturi subțiri ale acestora. Sunt prezentate într-o coerență exemplară toate elementele specifice ingineriei optice pornind de la proiectarea sistemelor optice la atestarea calității pentru cele mai diverse aplicații ale opticii, de la instrumentele tradiționale la sistemele moderne de transmitere, citire, stocare și prelucrare a

informației.

Deși paragraful de mai sus poate conduce la idea că ingineria optică este un domeniu ajuns la maturitate, se pot face câteva observații în legătură cu situarea reală a activității de proiectare în optică.

Domeniul a cunoscut un progres real abia în ultima jumătate a secolului al XX-lea, progres care s-a datorat aproape în exclusivitate dezvoltării sistemelor de calcul automat. Calculul în optică este extrem de laborios și trebuie să fie foarte exact, ceea ce a constituit principalul impediment de evoluție în secolele trecute.

Abia în deceniul al X-lea al secolului trecut capacitatea de stocare și viteza de lucru a sistemelor de calcul automat au venit ca un sprijin real în calculul optic. Softurile specializate realizează, în primul rând, o analiză complexă și completă, la nivelul cunoștințelor teoretice, adică de la caracteristicile de referință până la funcția optică de transfer, cu reducerea timpului de lucru cu câteva ordine de mărime. Totuși, computerul rămâne un instrument de calcul și nu de proiectare. Asigură viteza și precizia de calcul, dar algoritmi sunt încă fixați în lanțul modelelor Gauss-Seidel-Conrady-Kingslake. Nu există până la ora actuală nici o rețetă precisă de a obține o componentă sau un subansamblu limitat la difracție. Și în prezent, abilitatea, experiența și intuiția proiectantului sunt indispensabile – condiții sine qua non - chiar pentru cel mai performant soft, care, de fapt este interactiv. Sinteza sistemelor optice se află încă în faza în care se vizează doar standardizarea calculului optic sub forma unor normative, așa cum există la nivel internațional în alte domenii tehnice.

În acest sens, s-au creat asociații internaționale, dintre care cea mai importantă este SPIE – *The International Society for Optical Engineering* – fondată în 1955, având ca membri peste 15000 de opticieni și aproape 350 de corporații de profil din toată lumea. Biblioteca asociației a acumulat peste 70000 de texte ale lucrărilor prezentate la conferințele științifice organizate de asociație sau publicate într-o multitudine de reviste de specialitate care s-au înființat și apar sub egida SPIE, printre care și *Romanian Journal of Optoelectronics*.

Ingineria optică este un domeniu deschis, dar pretențios, atât în privința calculului de proiectare, cât și a tehnologiei de execuție. Sistemele optice necesare viitorului sunt cele *limitate la difracție*, pentru care erorile se măsoară în număr de lungimi de undă și, ca urmare, se află la limita delicată a domeniilor micro și macro și care, deși istoria a arătat că este mai simplu să fie tratate separat, trebuie, cu necesitate, să fie integrate într-o structură de algoritmi unitari, așa după cum se încearcă în prezenta teză.

Lucrarea de față își propune să contribuie la dezvoltarea ingineriei optice prin perfecționarea metodelor existente respectiv prin elaborarea unor algoritmi noi de sinteză a subansamblurilor optice lenticulare, având în vedere, cu precădere, corectarea aberațiilor cromatice axiale, transversale și spectrul secundar, în condiții de calitate a imaginii extrem

de exigente, respectiv, cu soluții care asigură sisteme optice limitate la difracție.

Aberațiile cromatice și în special spectrul secundar reprezintă elemente de mare finețe, abordate tangențial sau ocolite în literatura de specialitate, motiv pentru aprofundarea subiectului s-a considerat oportună și necesară.

Teza nu reprezintă un punct singular, ci se înscrie pe o linie continuă a tradiției cercetărilor în domeniul opticii, tradiție creată și susținută de școli universitare importante, institute de cercetare și unități de producție din țară. Printre colectivele care s-au remarcat în domeniu se evidențiază cele de Universitatea Politehnica București (prin contribuții la sinteza și analiza unor subsansambluri optice specifice microscoapelor, aparatelor de măsurare, camerelor foto etc.), Academia Tehnică Militară București (prin cercetări privind aparatele de observare pe timp de zi și de noapte, prelucrarea și transmiterea imaginii, termoviziunea etc.), Universitatea "Politehnica" Timișoara (analiza și sinteza sistemelor optice, studiul fenomenelor cromatice, studii de colorimetrie și fotometrie etc.).

Elaborarea tezei s-a bucurat de îndrumarea atentă și competentă a conducătorului științific, dl prof. dr. ing. Ioan Nicoară, căruia autoarea îi mulțumește pentru sprijinul permanent, spiritul mobilizator și ideile constructive puse la dispoziție cu generozitate.

Același mesaj de gratitudine se îndreaptă și către dna conf. dr. ing. Corina Gruescu, care a oferit materiale bibliografice extrem de valoroase, idei și sugestii, o entuziastă și dezinteresată colaborare, pentru care autoarea își exprimă recunoștința.

CAP.1. STADIUL ACTUAL PRIVIND METODELE DE SINTEZĂ A SUBANSAMBLURILOR OPTICE CORECTATE LA ABERAȚII CROMATICE ȘI SPECTRU SECUNDAR

1.1. CONSIDERAȚII GENERALE

Sinteza subansamblurilor formate din lentile reprezintă etapa finală a calculului de proiectare a unui sistem optic original. Ea urmează etapei calculului de gabarit, care, în general, se bazează pe algoritmi stabiliți pentru fiecare tip de aparat optic, cu structură elaborată pe considerente de optică geometrică. Calculul de gabarit modelează matematic schema optică asociată aparatului. Literatura de specialitate, deși nu foarte bogată în rețete de calcul de gabarit, oferă totuși căi de determinare a parametrilor optici de referință ai subansamblurilor din diverse scheme optice ale grupelor de aparate clasice, cum ar fi lupa, luneta, microscopul, aparatele de proiecție etc. Diverse surse pot indica algoritmi asemănători, dar nu identici, dat fiind faptul că nu există metode riguroase și complet determinate cum sunt standardele de calcul din alte domenii tehnice tradiționale.

Presupunând cunoscute caracteristicile optice ale unor subansambluri optice cum sunt obiectivele, ocularele, redresoarele, condensoarele, colimatoarele etc., se pune problema determinării efective a geometriei elementelor optice componente, problemă pe care trebuie să o rezolve etapa de sinteză. Aceasta reprezintă cea mai laborioasă și dificilă parte a calculului optic, motiv pentru care, în măsura în care este posibil este evitată și înlocuită prin exploatarea bazelor de date existente. Dacă totuși sinteza este necesară, proiectantul nu are la dispoziție o metodă sigură și directă care să garanteze printr-un calcul liniar performanțele cerute sistemului. Proiectarea are mai mult un aspect iterativ, iar criteriul și incrementul care definesc iterația sunt la latitudinea proiectantului, pentru care cele mai importante calități sunt experiența și abilitatea de a identifica și cuantifica parametrii de influență semnificativi pentru fiecare temă în parte.

Dificultatea de a proiecta sisteme optice originale este legată și de faptul că sinteza trebuie validată întotdeauna prin analiză, care este laborioasă, durează mult și este ușor susceptibilă la erori. De aceea, istoria calculului optic nu a consemnat o evoluție mai rapidă spre metode pe deplin conturate, deși ca extindere temporală, optica este un domeniu foarte vechi.

Această problemă a rapidității calculului a fost în prezent depășită prin utilizarea calculatorului, care a redus timpul efectiv de analiză cu câteva ordine de mărime, a eliminat erorile care se propagau în calcule, a permis interpolarea matematică în locul speculației. Totuși, la nivelul celor mai performante tehnici ale prezentului, calculatorul nu poate susține întreg procesul de proiectare, ci are nevoie de intervenția operatorului uman, a cărui abilitate nu a putut fi total descrisă prin algoritmi compatibili cu mașinile de calcul.

Deciziile operatorului uman, transmise sistemului de calcul, se referă la declararea parametrilor importanți pentru o aplicație dată (de exemplu corectarea aberațiilor cromatice și sferice va conduce la alt algoritm decât corectarea aberației cromatice și a curburii de câmp). De asemenea, intervenția proiectantului este necesară după analiza unui sistem calculat, pentru a evalua măsura în care parametrii de calitate a imaginii satisfac cerințele temei.

Ca regulă generală, un subansamblu optic va conține numărul de lentile, respectiv de dioptri necesari introducerii în calcul a gradelor de libertate prin care se controlează puterea și aberațiile importante pentru aplicația dată. Aceste grade de libertate sunt reprezentate de razele dioptrilor. Un subansamblu optic lenticular poate conține în structura sa trei tipuri de componente lenticulare de bază: lentile singulare, dublete (lipite sau nelipite) și triplete (lipite sau nelipite). Pentru fiecare entitate de bază există metode de sinteză specifice și orientate spre minimizarea unor tipuri bine precizate de aberații. În ceea ce privește *aberațiile cromatice și spectrul secundar*, este necesară asocierea a două sorturi de sticlă optică – în cazul *dubletului* – sau a trei sorturi – pentru *triplet* – în scopul exploatării proprietăților dispersive diferite ale sticlelor. Lentila singulară nu poate corecta cromatismul, dar poate intra într-o structură mai complexă care conține o combinație a elementelor lenticulare de bază.

În continuare se vor face referiri numai la componente de tip dublet sau triplet, modelate astfel încât să corecteze cromatismul.

În prima etapă de sinteză se apelează la expresiile puterii și aberațiilor primare ale lentilelor subțiri, pentru care grosimea la centru se neglijează. Aberațiile primare rezultă din dioptica de ordinul trei și oferă valori suficient de apropiate de cele reale pentru a fi utilizate ca ecuații de bază pentru determinarea razelor.

Teoria aberațiilor primare ale lentilelor subțiri furnizează expresii pentru aberațiile longitudinale și transversale, geometrice și cromatice, deduse ca sume ale contribuției

fiecărei lentile din șirul dat. Neajunsul de a utiliza relații care neglijează grosimea pieselor optice și care conțin numai termenii de ordinul trei din dezvoltarea în serie de puteri a aberațiilor este deplin compensat de avantajul unui calcul rapid, bazat numai pe drumuri paraxiale. Relații exacte, bazate pe calcul trigonometric sau vectorial nici nu ar fi posibile fără cunoașterea razelor și grosimilor.

Expresiile aberațiilor primare devin ecuații având ca necunoscute razele, coeficienții fiind determinați numeric cu ajutorul datelor rezultate din drumuri paraxiale. Termenul liber al acestor ecuații conține valoarea impusă de către proiectant pentru aberația respectivă. În general, calculul pomește cu valori nule impuse acestor aberații.

Expresiile aberațiilor de ordinul trei pentru lentile subțiri sunt cunoscute sub numele de *sume-G*.

1.2. SINTEZA DUBLETELOR

1.2.1. Dubletul acromat nelipit

Dubletul este un subansamblu format din două lentile, lipite sau separate printr-un strat de aer. Una dintre componente, caracterizată prin dispersie mică are puterea de același semn cu acela al dubletului, iar a doua componentă, având putere de semn opus este caracterizată prin dispersie mare. Pentru proiectare, cele două lentile pun la dispoziție patru grade de libertate, corespunzătoare celor patru raze. Un grad de libertate este întotdeauna rezervat condiției care exprimă puterea dubletului. Celelalte pot fi utilizate pentru a corecta trei aberații. Acestea, în general, sunt cromatismul axial, aberația sferică și coma. În cazul corecției aberației cromatice subansamblul se numește *dublet acromat*.

Sinteza *dubletului nelipit*, format din două lentile – una convergentă și una divergentă – separate printr-un strat subțire de aer, bazată pe teoria lentilelor subțiri, cuprinde următoarele etape:

- ◆ stabilirea datelor de proiectare: f' – distanța focală, D – diametrul util al dubletului, 2ω - mărimea unghiulară a câmpului obiect, sorturile de sticlă Crown și Flint (cu caracteristicile n_e, n_F, n_C, v_e).
- ◆ calculul curburilor totale ale lentilelor componente

Notând cu a și b cele două lentile componente și scriind ecuația puterii sistemului (lentilele se consideră separate cu un strat de aer infinit subțire, astfel încât puterile lor se adună algebric) și condiția de acromatizare, se obțin următoarele expresii pentru distanțele focale ale componentelor:

$$f'_a = \frac{f'(v_a - v_b)}{v_a}, \quad (1.1)$$

$$f'_b = \frac{f'(v_b - v_a)}{v_b} = -f'_a \frac{v_a}{v_b}, \quad (1.2)$$

Din expresia puterii lentilei infinit subțiri rezultă curburile c_a și c_b :

$$c_a = \frac{1}{f'_a (n_a - 1)}, \quad (1.3)$$

$$c_b = \frac{1}{f'_b (n_b - 1)}. \quad (1.4)$$

unde c reprezintă notația pentru curbura totală a unei lentile ($c_a = 1/r_1 - 1/r_2 = c_1 - c_2$; $c_b = 1/r_3 - 1/r_4 = c_3 - c_4$).

♦ calculul paraxial al drumului razei marginale și pupile principale. În majoritatea cazurilor dubletele servesc drept obiective ale aparatelor afocale, care lucrează cu abscisă obiect infinită și au pupila de intrare în planul obiectivului ($s = -\infty$, $\sigma_a = 0$, $h_p = 0$).

Pentru acest caz se obțin următoarele date succesive:

$$\begin{aligned} \sigma_a = 0, \quad h_a = \frac{D}{2} = h, \quad \sigma'_a = \frac{h}{f'_a}, \quad p_a = 0, \quad p'_a = \frac{1}{f'_a}, \\ \sigma_b = \sigma'_a = \frac{h}{f'_a}, \quad h_b = h, \quad \sigma'_b = h \left(\frac{1}{f'_a} + \frac{1}{f'_b} \right), \quad p_b = \frac{1}{f'_a}, \quad p'_b = \frac{h}{\sigma'_b} = \\ = \frac{1}{f'_a} + \frac{1}{f'_b}, \quad s'_b = s' = \frac{f'_a f'_b}{f'_a + f'_b} \end{aligned} \quad (1.5)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{pa} = \sigma'_{pa} = \sigma_{pb} = \sigma'_{pb} = \sigma_p, \quad h_{pa} = h_{pb} = 0, \quad Q_a = Q_b = 0, \\ y'_b = y' = -\sigma_p \frac{f'_a f'_b}{f'_a + f'_b} \end{aligned} \quad (1.6)$$

♦ calculul factorilor-G

$$\begin{aligned} G_1 = \frac{1}{2} n^2 (n-1), \quad G_2 = \frac{1}{2} (2n+1)(n-1), \\ G_3 = \frac{1}{2} ((3n+1)(n-1)), \quad G_4 = \frac{1}{2n} (n+2)(n-1), \\ G_5 = 2 \frac{(n^2-1)}{n}, \quad G_6 = \frac{1}{2n} (3n+2)(n-1), \\ G_7 = \frac{G_2}{n}, \quad G_8 = \frac{G_1}{n}, \end{aligned} \quad (1.7)$$

♦ calculul curburilor c_1 și c_3 din condițiile de corectare a comei și aberației sferice.

Se pune condiția de anulare sau se acceptă o anumită valoare a comei:

$$\Sigma CC = CC_a + CC_b = 0, \quad (1.8)$$

obținându-se o relație liniară între curburile c_1 și c_3 de forma:

$$c_3 = k_1 c_1 + k_2, \quad (1.9)$$

$$\text{unde } k_1 = -\frac{G_{5a} c_a}{G_{5b} c_b}, \quad (1.10)$$

$$k_2 = \frac{1}{0.25 G_{5b} c_b} (G_{7a} c_a p_a + G_{8a} c_a^2 + G_{7b} c_b p_b + G_{8b} c_b^2). \quad (1.11)$$

Se scrie și condiția de anulare (sau se impune valoarea dorită) a aberației sferice:

$$\Sigma TSC = TSC_a + TSC_b = 0, \quad (1.12)$$

rezultând o expresie care conține ca necunoscute tot variabilele c_1 și c_3 . Se face o substituție, înlocuind curbura c_3 din relația (1.9) și se obține o ecuație de gradul doi cu necunoscuta c_1 :

$$k_3 c_1^2 + k_4 c_1 + k_5 = 0, \quad (1.13)$$

$$\text{unde } k_3 = G_{4a} c_a + G_{4b} c_b k_1^2, \quad (1.14)$$

$$k_4 = -G_{5a} c_a p_a - G_{2b} c_b^2 k_1 + 2G_{4b} c_b k_1 k_2 - G_{5b} c_b k_1 p_b - G_{2a} c_a^2, \quad (1.15)$$

$$k_5 = G_{1a} c_a^3 + G_{3a} c_a^2 p_a + G_{6a} c_a p_a^2 + G_{3b} c_b^2 p_b + G_{6b} c_b p_b^2 - \\ - G_{2b} c_b^2 k_2 + G_{4b} c_b k_2^2 - G_{5b} c_b p_b k_2 + G_{1b} c_b^3 \quad (1.16)$$

Ecuția (1.13) poate admite două, una sau nici o soluție reală, funcție de sorturile de sticlă alese.

Cunoscând valorile c_1 , c_3 , c_a , și c_b se pot afla și celelalte două curburi:

$$c_2 = c_1 - c_a, \quad (1.17)$$

$$c_4 = c_3 - c_b. \quad (1.18)$$

Puterea sistemului și sorturile de sticlă alese determină forma efectivă a componentelor dubletului, formă care poate fi una dintre cele schițate în figura 1.1.

Formele *Fraunhofer*, respectiv *Steinheil* se obțin după cum ordinea sticlelor este Crown-Flint, respectiv Flint-Crown și rezultă pentru una dintre rădăcinile reale ale ecuației (1.13). Cealaltă rădăcină conduce la forma Gauss. Se preferă soluțiile *Fraunhofer*, cu sticla Crown în față pentru că aceasta este mai rezistentă la agresiunea mediului. Formele cu contact la centru în general se evită din cauza dificultăților de centrare.

Din punct de vedere al calității imaginii, forma Gauss este diferită de celelalte. Aberațiile sferice sunt cu un ordin de mărime mai ridicate, iar cele cromatice în spectrul secundar cu cca. 20%. Totuși, sferocromatismul este aproape jumătate față de celelalte variante. De asemenea, forma Gauss având curburi mari ale suprafețelor nu admite soluții pentru deschideri mari (care sunt limitate la $f'/5 \dots f'/7$). Formele *Fraunhofer* și *Steinheil* pot fi corectate până la deschideri sub $f'/3$.

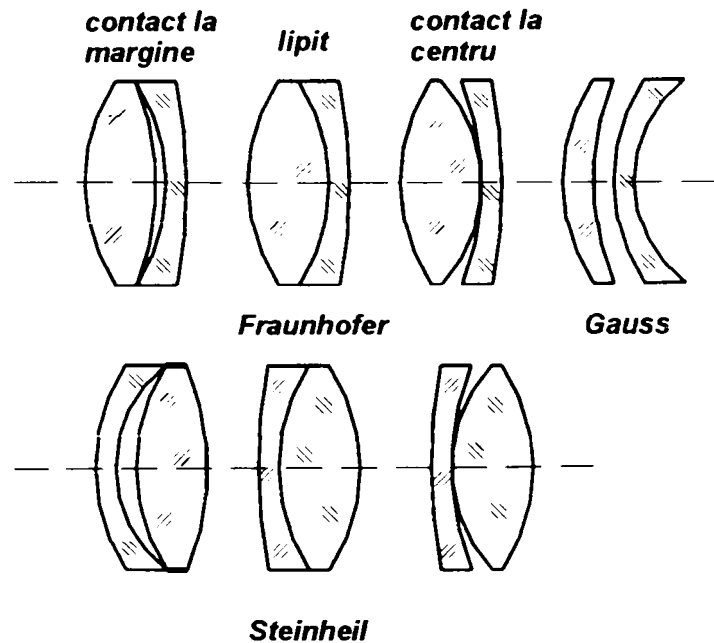


Fig. 1.1. Formele dubletului acromat

Formele lipite cu $c_2=c_3$ pot rezulta numai întâmplător prin procedeul de calcul descris. Pentru obținerea dubletului lipit s-au dezvoltat tehnici separate.

- ◆ introducerea grosimii la centru a lentilelor.

Având determinate razele și cunoscând diametrul util al lentilelor se pot calcula diametrul total și grosimile la centru și la margine conform recomandărilor din Anexele 1.1 și 1.2.

- ◆ analiza aberațiilor reziduale.

Se verifică valoarea reală a distanței focale sau a abscisei imagine și se pot face mici corecturi de raze (de regulă r_2), iterativ, până la obținerea unui rezultat situat în toleranțele impuse.

Se calculează valorile aberațiilor reziduale sferice, cromatice și de comă din teoria aberațiilor de ordinul trei sau prin drumuri. Dacă mărimea acestora nu corespunde calității impuse a imaginii se fac corecturi de raze (cele interioare sau/și r_1). Cea mai simplă metodă este cea grafo-analitică, bazată pe ipoteza liniarizării dependenței aberațiilor în raport cu variația razelor, pe intervale mici. Principial, se pornește din punctul de start A, determinat de valorile reziduale inițiale a două aberații, notate cu $aber_1$ și $aber_2$ (fig.1.2).

Se introduc corecțiile aleatoare Δc_2 și Δc_3 de ordinul $(1 \cdot 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^{-3})$ și se calculează aberațiile prin care se determină grafic poziția punctelor B și C. Considerând punctul țintă D, rezultă corecțiile necesare Δc_{2nec} și Δc_{3nec} prin proporționalitatea segmentelor.

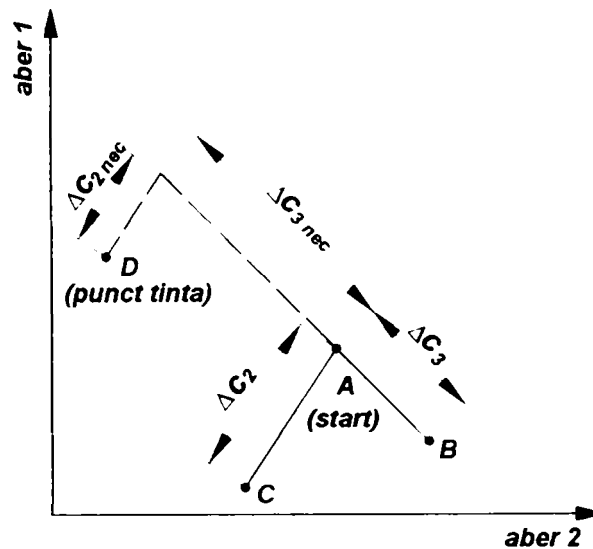


Fig. 1.2. Determinarea grafo-analitică a corecțiilor de raze

1.2.2. Dubletul acromat lipit

Un caz particular de dublet este acela cu lentile lipite, fără strat de aer separator și având suprafețele de contact conforme ($c_2=c_3$). *Dubletul lipit* rezultă urmând mersul de calcul prezentat mai sus numai întâmplător. Obținerea acestei forme necesită impunerea din prima fază de proiectare a conformității suprafețelor în contact. Pentru aceasta în relațiile (1.8) și (1.12) se introduc expresiile aberației sferice primare, respectiv comei scrise pentru curbura a doua a primei lentile și pentru prima curbura a celei de-a doua lentile. Rezultă două ecuații cu o singură necunoscută, c_2 . Se pot urma două căi: fie se utilizează numai una dintre ecuații – funcție de aberația considerată mai importantă pentru control, fie se face un studiu al variației celor două aberații funcție de curbura c_2 . Expresiile (1.8) și (1.12) descriu o dreaptă și, respectiv, o parabolă de gradul doi, care în reprezentare grafică considerând variabila independentă curbura c_1 se încadrează în una dintre variantele prezentate în figura 1.3.

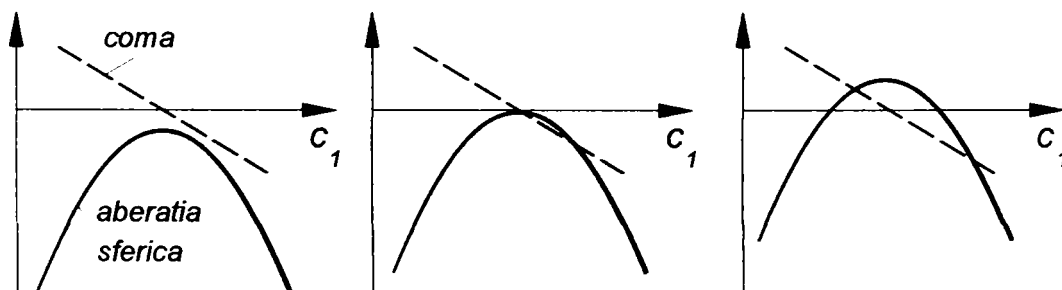


Fig. 1.3. Variația aberației sferice și a comei unui dublet pozitiv funcție de prima curbură

Desigur, este preferabil cazul prezentat în graficul din mijloc, corespunzător corecției

ambelor aberații. Găsirea sa presupune alegerea unei perechi de sticle potrivite. În general, ridicarea parabolei spre axa absciselor se obține prin selectarea unei sticle Flint cu indice de refracție mai mic și număr Abbe mai mare sau alegerea unei sticle Crown cu indice de refracție mai mare și număr Abbe mai mic. Totuși, trebuie avut în vedere faptul că sticlele cu indici apropiați conduc la soluții de tip menisc, nedorite. O pereche recomandată de sticle este BK7 (517.642) – SF2 (648.339), dar oportunitatea alegerii depinde și de apertură.

Pentru proiectarea unui *dublet lipit acromat*, corectat la sfericitate și cromatism la deschiderea maximă (sau zonală) este indicat mersul de calcul prezentat în continuare, care include o etapă distinctă de acromatizare marginală (sau zonală).

Sinteza dubletului acromat lipit cuprinde următoarele etape:

- ◆ declararea datelor de intrare: f' , D , s , 2ω , sorturile de sticle alese. Ordinea Crown-Flint conduce la soluția din figura 1.4, în timp ce ordinea inversată a sticlelor furnizează o variantă cu lentila divergentă în față.
- ◆ calculul curburilor c_a , c_b din condiția de acromatizare axială:

$$c_a = \frac{1}{f'(v_a - v_b)dn_a}, \quad (1.19)$$

$$c_b = \frac{1}{f'(v_b - v_a)dn_b}, \quad (1.20)$$

unde dn_a , dn_b reprezintă dispersia principală a sticlelor ($dn=n_F-n_C$).

- ◆ calculul curburii c_1 din condiția de minim (sau anulare) a aberației sferice primare.

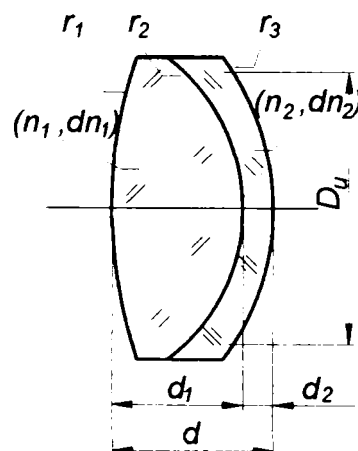


Fig.1.4. Caracteristicile geometrice ale dubletului acromat

Expresia aberației sferice primare se scrie ca sumă a aberațiilor celor două lentile componente. Pentru prima lentilă se utilizează exprimarea funcție de c_1 , iar pentru a doua lentilă tot față de prima sa curbura, care pentru dublet este c_2 . Se obține o expresie de gradul doi cu necunoscutele c_1 și c_2 în care se introduce substituția $c_2=c_1-c_a$ astfel încât forma finală a condiției de minim al aberației sferice primare este o ecuație de gradul doi în necunoscuta

c_1 :

$$k_1 c_1^2 + k_2 c_1 + k_3 = 0. \quad (1.21)$$

Coeficienții ecuației se calculează cu relațiile:

$$k_1 = G_{4a} c_a + G_{4b} c_b, \quad (1.22)$$

$$k_2 = -G_{2a} c_a^2 - G_{5a} c_a p_a - G_{2b} c_b^2 - 2G_{4b} c_a c_b - G_{5b} c_b p_b, \quad (1.23)$$

$$k_3 = G_{1a} c_a^3 + G_{3a} c_a^2 p_a + G_{6a} c_a p_a^2 + G_{1b} c_b^3 + G_{2b} c_a c_b^2 + G_{3b} c_b^2 p_b + G_{4b} c_a^2 c_b + G_{5b} c_a c_b p_b + G_{6b} c_b p_b^2 \quad (1.24)$$

- ◆ determinarea grosimii la centru a lentilelor.
- ◆ calculul curburii c_3 din condiția de acromatizare marginală, prin metoda “ $\tilde{d} - d$ ”.

Condiția de acromatizare marginală (sau zonală) se exprimă sub forma:

$$\sum (\tilde{d} - d) dn = 0 \text{ sau } (\tilde{d}_a - d_a) dn_a + (\tilde{d}_b - d_b) dn_b = 0, \quad (1.25)$$

unde \tilde{d} este lungimea geometrică a razei marginale printr-o lentilă, iar d reprezintă lungimea parcursă de raza paraxială, aproximată prin grosimea la centru.

Sunt necesare următoarele date intermediare:

$$\begin{cases} x_j = r_j [1 - \cos(\tilde{\sigma}_j - \tilde{i}_j)] \\ y_j = r_j \sin(\tilde{\sigma}_j - \tilde{i}_j). \end{cases} \quad (1.26)$$

Relațiile (1.26) se aplică pentru determinarea coordonatelor x_1, x_2, y_1, y_2 ale punctelor de incidență pe primele două suprafețe ale dubletului. Ele sunt necesare pentru calculul lungimilor parcurse de raza marginală prin prima lentilă:

$$\tilde{d}_a = (d_a + x_2 - x_1) / \cos \tilde{\sigma}'_1. \quad (1.27)$$

Coordonatele celui de-al treilea punct de incidență sunt:

$$\begin{cases} x_3 = \tilde{d}_b \cos \tilde{\sigma}'_2 + x_2 - d_b \\ y_3 = y_2 - \tilde{d}_b \sin \tilde{\sigma}'_2 \end{cases}, \quad (1.28)$$

unde \tilde{d}_b a fost determinat din expresia (1.27).

Se poate calcula a treia rază:

$$r_3 = \frac{x_3^2 + y_3^2}{2x_3}. \quad (1.29)$$

- ◆ verificarea puterii și analiza aberațiilor sferice și cromatice reziduale. Dacă soluția obținută nu se încadrează în toleranțele admise pentru distanța focală sau

aberații, se fac mici corecții iterative de raze până la obținerea preciziei dorite.

Pentru aplicarea și verificarea algoritmului descris mai sus s-a întocmit un program automat scris în limbajul Qbasic. În continuare este redată o versiune text a acestui soft.

```

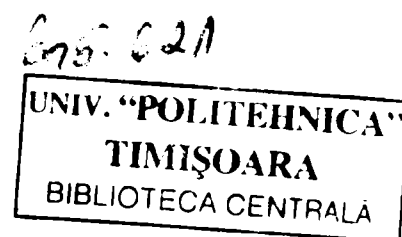
CLS
DEFDBL A-Z
OPTION BASE 1
COLOR 15, 0
INPUT "FP="; FP: INPUT "s="; s: INPUT "DU="; DU
REM sticle:BK7, F2
READ n(1), n(2), n(3)
DATA 1,1.516664,1.620057
READ np(1), np(2), np(3)
DATA 1.516664,1.620057,1
READ V1, V2
DATA 64.06,36.35
READ DN1, DN2
DATA 0.008065,0.017053
FP1 = FP * (V1 - V2) / V1
FP2 = FP * (V2 - V1) / V2
PRINT USING "FP1=####.### "; FP1;
PRINT USING "FP2=####.### "; FP2
C1 = 1 / FP / (V1 - V2) / DN1
C2 = 1 / FP / (V2 - V1) / DN2
PRINT USING "C1=##.### "; C1;
PRINT USING "C2=##.### "; C2
PRINT
FOR j = 2 TO 3
    G1(j) = n(j) * n(j) * (n(j) - 1) / 2
    G2(j) = (2 * n(j) + 1) * (n(j) - 1) / 2
    G3(j) = (3 * n(j) + 1) * (n(j) - 1) / 2
    G4(j) = (n(j) + 2) * (n(j) - 1) / n(j) / 2
    G5(j) = 2 * (n(j) * n(j) - 1) / n(j)
    G6(j) = (3 * n(j) + 2) * (n(j) - 1) / n(j) / 2
NEXT j
IF ABS(s) > 10000000000# THEN
    P1 = 0
ELSE
    P1 = 1 / s
END IF

```

```

P2 = P1 + C1 * (n(2) - 1)
ALFA = G4(2) * C1 + G4(3) * C2
BETA = -G2(2) * C1 * C1 - G5(2) * C1 * P1 - G2(3) * C2 * C2 - 2 * G4(3) * C1 * C2 -
-G5(3) * P2 * C2
GAMA = G1(2) * C1 * C1 * C1 + G3(2) * C1 * C1 * P1 + G6(2) * C1 * P1 * P1 + G1(3) * C2 * C2 *
C2 + G2(3) * C1 * C2 * C2 + G3(3) * C2 * C2 * P2 + G4(3) * C1 * C2 * C1 + G5(3) * C1 * P2 * C2 +
G6(3) * C2 * P2 * P2
PRINT "ALFA= "; ALFA; "BETA= "; BETA; "GAMA= "; GAMA
delta = (BETA) * (BETA) - (4 * (ALFA) * (GAMA)): PRINT "delta= "; delta
IF delta < 0 THEN
    PRINT "NU EXISTA SOLUTIE DELTA="; delta: STOP
END IF
PRINT
RO11 = (-BETA + SQR(delta)) / (2 * ALFA)
RO12 = (-BETA - SQR(delta)) / (2 * ALFA)
RO21 = RO11 - C1: RO22 = RO12 - C1
R11 = 1 / RO11: R12 = 1 / RO12: R21 = 1 / RO21: R22 = 1 / RO22
COLOR 11, 2
PRINT USING "R11=####.### "; R11;
PRINT USING "R21=####.### "; R21
IF DU < 10 THEN
    DT = DU + 1
END IF
IF DU >= 10 AND DU < 30 THEN
    DT = DU + 2
END IF
IF DU >= 30 THEN
    DT = DU + 3
END IF
PRINT USING "DT=##.##"; DT
r(1) = R11: r(2) = R21
100 IF r(1) > 0 AND r(2) < 0 THEN
    d(1) = 1 + r(1) - r(2) - (SQR(r(1) * r(1) - (DT * DT / 2 / 2)) + SQR(r(2) * r(2) - (DT * DT / 2 / 2)))
END IF
IF r(1) > 0 AND r(2) > 0 THEN
    d(1) = 1 + r(2) - r(1) - (SQR(r(2) ^ 2 - (DT * DT / 2 / 2)) - SQR(r(1) ^ 2 - (DT * DT / 2 / 2)))
END IF
IF r(1) < 0 AND r(2) < 0 THEN
    d(1) = 1 - (ABS(r(1)) - ABS(r(2)) - SQR(r(1) * r(1) - DT * DT / 4) + SQR(r(2) * r(2) - DT * DT /
4))

```



```

END IF
PRINT USING "d1=##.##"; d(1):
PRINT "d2=1.5"
IF ABS(s) < 100000! THEN
    SIGMA1 = ATN(DT / 2 / s)
END IF
FOR j = 1 TO 2
    IF ABS(r(j)) < 10000000000# THEN
        RO(j) = 1 / r(j)
    ELSE
        RO(j) = 0
    END IF
NEXT j
IF ABS(s) > 100000! THEN
    h = DU / 2: SIG(1) = 0
    Q(1) = h
ELSE
    SIG(1) = SIGMA1
    Q(1) = s * SIN(SIG(1))
END IF
FOR j = 1 TO 2
    IF j > 1 THEN
        Q(j) = QP(j - 1) - (d(j) - 1) * SIN(SIGP(j - 1)): SIG(j) = SIGP(j - 1)
        s(j) = Q(j) / SIN(SIG(j))
    END IF
    SINEPS(j) = SIN(SIG(j)) - Q(j) * RO(j)
    EPS(j) = ATN(SINEPS(j) / SQR(1 - (SINEPS(j)) ^ 2))
    SINEPSP(j) = n(j) * (SINEPS(j)) / np(j)
    EPSP(j) = ATN(SINEPSP(j) / SQR(1 - (SINEPSP(j)) ^ 2))
    SIGP(j) = SIG(j) - EPS(j) + EPSP(j)
    G(j) = Q(j) / (COS(EPS(j)) + COS(SIG(j)))
    QP(j) = G(j) * (COS(EPSP(j)) + COS(SIGP(j)))
    sp(j) = QP(j) / SIN(SIGP(j))
    X(j) = r(j) * (1 - COS(SIG(j) - EPS(j)))
    Y(j) = r(j) * SIN(SIG(j) - EPS(j))
NEXT j
D12 = (d(1) + X(2) - X(1)) / COS(SIGP(1))
D23 = 1.5 - (D12 - d(1)) * DN1 / DN2
X3 = D23 * COS(SIGP(2)) + X(2) - 1.5
Y3 = Y(2) - D23 * SIN(SIGP(2))

```

```

r(3) = (X3 * X3 + Y3 * Y3) / 2 / X3: PRINT USING "R3=####.###"; r(3)
COLOR 15, 0
RO31 = RO21 - C2: R31 = 1 / RO31: PRINT USING "R31informativ=####.###"; R31
d(2) = 1.5
ap(1) = np(1) * r(1) / (np(1) - n(1))
FOR j = 2 TO 3
  A(j) = ap(j - 1) - d(j - 1)
  u(j) = n(j) / A(j): v(j) = (np(j) - n(j)) / r(j): z(j) = u(j) + v(j)
  ap(j) = np(j) / z(j)
NEXT j
f = ap(1) * ap(2) * ap(3) / A(2) / A(3): COLOR 11, 2
PRINT USING "s3p=####.### "; ap(3)
PRINT USING "f=####.###"; f
IF r(1) = R12 THEN
END
END IF
r(1) = R12: r(2) = R22: PRINT USING "R12=####.### "; r(1);
PRINT USING "R22=####.### "; r(2)
COLOR 15, 0
RO32 = RO22 - C2: R32 = 1 / RO32: PRINT USING "R32informativ=####.### "; R32
COLOR 11, 2
GOTO 100

```

1.2.3. Dubletul acromat nelipit cu distanță mare între lentile

Pentru aplicații la care aberația sferică nu este foarte importantă, ci se urmărește sferocromatismul se poate utiliza *dubletul acromat nelipit cu distanță mare între lentile*. Acesta este format din două lentile separate prin aer (fig. 1.5). Prima lentilă este convergentă, iar a doua divergentă, perechea de sticle fiind atribuită tot în ordinea Crown-Flint.

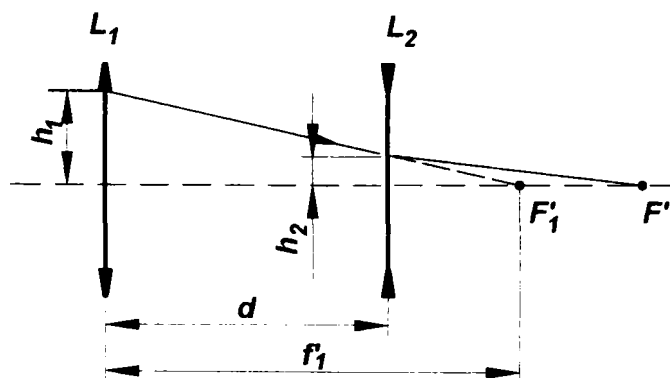


Fig. 1.5. Dubletul acromat nelipit

Mersul de calcul pentru proiectarea dubletului acromat nelipit necesită parcurgerea următoarelor etape:

- ◆ stabilirea datelor inițiale: distanța focală f' , raportul dintre distanța între lentile și focala lentilei convergente m , diametrul util D și sorturile de sticle (n_e, n_F, n_C, v_e).
- ◆ determinarea distanțelor focale ale lentilelor și a distanței dintre ele din condiția de acromatizare:

$$\begin{cases} f'_1 = f' \left[1 - \frac{v_2}{v_1(1-m)} \right] \\ f'_2 = f'(1-m) \left[1 - \frac{v_1(1-m)}{v_2} \right] \\ d = mf'_1 \end{cases} \quad (1.30)$$

Soluțiile (1.30) rezultă din condiția de acromatizare scrisă sub forma:

$$\frac{h_1^2}{f'_1 v_1} + \frac{h_2^2}{f'_2 v_2} = 0, \quad (1.31)$$

și din expresia puterii sistemului:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{f'_1 f'_2} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1-m}{f'_2}, \quad (1.31)$$

unde $h_2 = h_1 \frac{f'_1 - d}{f'_1} = h_1(1-m).$ (1.32)

- ◆ determinarea razelor utilizând sumele-G.

1.3. SINTEZA TRIPLETELOR

Tripletele sunt subansambluri formate din trei lentile lipite sau nelipite, care prin cele șase până la opt grade de libertate corespunzătoare razelor permit controlul unui număr mare de aberații.

Cel mai frecvent, tripletul lipit este utilizat ca subansamblu *apocromat*, care corectează *cromatismul axial* și *spectrul secundar*.

Calculul de gabarit al apocromatului se bazează pe trei ecuații care vizează puterea impusă, acromatizarea și corectarea spectrului secundar, utilizând teoria aberațiilor lentilelor subțiri:

$$\begin{cases} v_a c_a \Delta n_a + v_b c_b \Delta n_b + v_c c_c \Delta n_c = \frac{1}{f'} \\ c_a \Delta n_a + c_b \Delta n_b + c_c \Delta n_c = 0 \\ P_a c_a \Delta n_a + P_b c_b \Delta n_b + P_c c_c \Delta n_c = 0 \end{cases}, \quad (1.33)$$

unde a, b, c reprezintă indicii de simbolizare a celor trei lentile,

v - numărul Abbe,

Δn - dispersia principală,

c - curbura totală a fiecărei lentile,

P - dispersia parțială a celor trei materiale.

Sistemul (1.33) conduce la următoarele soluții pentru curburile totale ale lentilelor:

$$\begin{cases} c_a = \frac{1}{f'E(v_a - v_c)} \left(\frac{P_b - P_c}{\Delta n_a} \right) \\ c_b = \frac{1}{f'E(v_a - v_c)} \left(\frac{P_c - P_a}{\Delta n_b} \right), \\ c_c = \frac{1}{f'E(v_a - v_c)} \left(\frac{P_a - P_b}{\Delta n_c} \right) \end{cases} \quad (1.34)$$

unde s-a notat

$$E = \frac{v_a(P_b - P_c) + v_b(P_c - P_a) + v_c(P_a - P_b)}{v_a - v_c}. \quad (1.35)$$

Este important de observat că valoarea mărimii E nu poate fi nulă, pentru a nu obține curbură infinite. Pentru evitarea acestui caz, alegerea sticlelor trebuie făcută astfel încât într-o reprezentare $P(v)$ cele trei materiale să nu fie coliniare, ci să se afle în vârfurile unui triunghi (fig. 1.6).

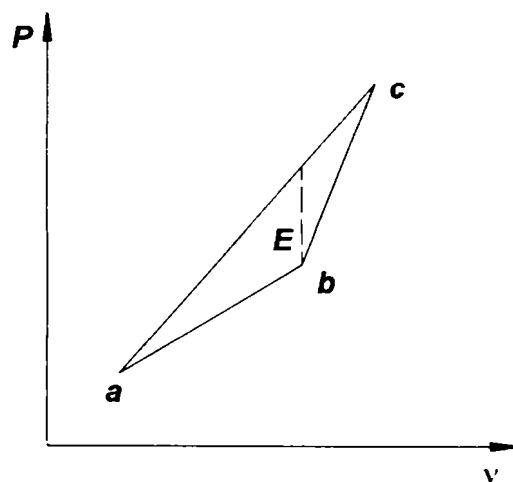


Fig. 1.6. Poziția materialelor apocromatului într-o reprezentare $P(v)$

Se poate urmări acromatizarea pe un domeniu mai larg utilizând liniile spectrale g (435.830 nm), e (546.074 nm), C (656.272 nm), numărul Abbe $v_e = (n_e - 1)/(n_g - n_c)$ și dispersia parțială relativă $P_{eg} = (n_g - n_e)/(n_g - n_c)$, sau liniile spectrale F' (479.99 nm), e (546.074 nm), C' (643.847 nm), numărul Abbe $v_e = (n_e - 1)/(n_{F'} - n_c)$ și dispersia parțială relativă $P_{eF'} = (n_{F'} - n_e)/(n_{F'} - n_c)$.

Pentru determinarea curburilor celor șase dioptri se impune o valoare oarecare pentru curbura c_1 (recomandabil $c_1=(0.6\dots 0.8)c_a$). Celelalte curbură se pot calcula din relațiile:

$$C_2=C_1-C_a, \quad (1.36)$$

$$C_3=C_2-C_b, \quad (1.37)$$

$$C_4=C_3-C_c. \quad (1.38)$$

Ultima curbura c_4 se poate afla și prin metoda de acromatizare marginală " $\tilde{d} - d$ ", după inserarea grosimilor la centru.

Se verifică puterea sistemului rezultat și se corectează razele, preferabil prin metoda scalării, până la obținerea distanței focale cu precizia impusă.

Se determină aberațiile reziduale și dacă este necesar se introduc noi corecturi iterative ale razelor.

Pentru aplicarea și verificarea algoritmului descris mai sus s-a întocmit un program automat de calcul, scris în limbajul Qbasic și redat, în continuare, în versiunea sa text.

```
CLS
DEFDBL A-Z
f = 100: D# = f / 10: se(1) = 1E+30
DIM ne(5): DIM nc(5): DIM nf(5): DIM D(3)
REM sticle FK54, LaK28, TIF6
FOR j = 1 TO 5
  READ ne(j)
NEXT j
DATA 1,1.438151,1.747779,1.621182,1
FOR j = 1 TO 5
  READ nc(j)
NEXT j
DATA 1,1.435756,1.740556,1.611684,1
FOR j = 1 TO 5
  READ nf(j)
NEXT j
DATA 1,1.440608,1.755353,1.631939,1
FOR j = 2 TO 4
  nu(j) = (ne(j) - 1) / (nf(j) - nc(j)): PRINT "nu="; nu(j)
  P(j) = (nf(j) - ne(j)) / (nf(j) - nc(j)): PRINT "P="; P(j)
NEXT j
FOR j = 2 TO 4
```

```

    dn(j) = nf(j) - nc(j)
NEXT j
e = (nu(2) * (P(3) - P(4)) + nu(3) * (P(4) - P(2)) + nu(4) * (P(2) - P(3))) / (nu(2) - nu(4))
PRINT "E="; e
ct = 1 / f / e / (nu(2) - nu(4))
ca = ct * (P(3) - P(4)) / dn(2): PRINT "ca="; ca
cb = ct * (P(4) - P(2)) / dn(3): PRINT "cb="; cb
cc = ct * (P(2) - P(3)) / dn(4): PRINT "cc="; cc
FOR j = 2 TO 4
    g2(j) = .5 * (2 * ne(j) + 1) * (ne(j) - 1): PRINT "g2="; g2(j)
    g4(j) = (ne(j) + 2) * (ne(j) - 1) / 2 / ne(j): PRINT "g4="; g4(j)
    g5(j) = 2 * (ne(j) * ne(j) - 1) / ne(j): PRINT "g5="; g5(j)
NEXT j
fa = 1 / ca / (ne(2) - 1): PRINT "fa="; fa
fb = 1 / cb / (ne(3) - 1): PRINT "fb="; fb
fc = 1 / cc / (ne(4) - 1): PRINT "fc="; fc
pa = 0: pb = 1 / fa: PRINT "pb="; pb: pc = (fa + fb) / fa / fb: PRINT "pc="; pc
c(1) = 0.03
c(2) = c(1) - ca: c(3) = c(2) - cb: c(4) = c(3) - cc: PRINT "c1="; c(1)
FOR j = 1 TO 4
    r(j) = 1 / c(j)
    PRINT "r("; j; ")="; r(j)
NEXT j
sep(1) = ne(2) * r(1) / (ne(2) - ne(1)): PRINT "s'(1)="; sep(1)
FOR j = 1 TO 3
    IF r(j) > 0 AND r(j + 1) < 0 THEN
        D(j) = 1.5 + ABS(r(j)) + ABS(r(j + 1)) - (SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) + SQR(r(j + 1) ^ 2 - D# ^ 2 / 4))
    END IF
    IF r(j) > 0 AND r(j + 1) > 0 AND ABS(r(j)) < ABS(r(j + 1)) THEN
        D(j) = 1.5 + r(j) - r(j + 1) - (SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) - SQR(r(j + 1) ^ 2 + D# ^ 2 / 4))
    END IF
    IF r(j) > 0 AND r(j + 1) > 0 AND ABS(r(j)) > ABS(r(j + 1)) THEN
        D(j) = 1.5
    END IF
    IF r(j) < 0 AND r(j + 1) > 0 THEN
        D(j) = 1.5

```

```

END IF
IF r(j) < 0 AND r(j + 1) < 0 AND ABS(r(j)) > ABS(r(j + 1)) THEN
D(j) = 1.5 + ABS(r(j + 1)) - ABS(r(j)) - (SQR(r(j + 1) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) - SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4))
END IF
IF r(j) < 0 AND r(j + 1) < 0 AND ABS(r(j)) < ABS(r(j + 1)) THEN
D(j) = 1.5
END IF
PRINT "d("; j; ")="; D(j)
NEXT j
FOR j = 2 TO 4
se(j) = sep(j - 1) - D(j - 1)
REM PRINT "s("; j; ")="; se(j)
sep(j) = ne(j + 1) * se(j) * r(j) / (r(j) * ne(j) + (ne(j + 1) - ne(j)) * se(j))
REM PRINT "s'("; j; ")="; sep(j)
NEXT j
fprim = sep(1) * sep(2) * sep(3) * sep(4) / se(2) / se(3) / se(4)
PRINT "f="; fprim: PRINT "s'(4)="; sep(4)

```

1.4. CONCLUZII

Capitolul 1 prezintă sintetic cele mai eficiente metode de sinteză pentru dubletul acromat și tripletul apocromat. Metodele au fost selectate în urma analizei unui vast material documentar de cea mai bună calitate științifică și de ultimă oră.

Subansamblurile de bază, a căror proiectare are în vedere corectarea aberațiilor cromatice sunt dubletele (lipite sau nelipite) și tripletele (lipite sau nelipite). Combinații ale acestora, în general în scheme simetrice și plasarea unor diafragme de deschidere și poziție bine determinate, conduc la sisteme mai complexe, care au corectate și coma, curbura de câmp sau astigmatismul. Este cazul subansamblurilor cu câmp obiect mare, la care aberațiile geometrice specifice fasciculelor înclinate sunt semnificative.

Sinteza dubletelor acromate, respectiv a tripletelor apocromate are la bază două principii:

1. *alegerea unor materiale optice având proprietăți dispersive diferite*
2. *asocierea lentilelor convergente cu cele divergente (atât pentru compensarea aberațiilor cromatice, cât și a celor de deschidere).*

În ceea ce privește *alegerea materialelor compatibile* pentru proiectarea dubletelor sau tripletelor, literatura de specialitate nu conține indicații clare fundamentate pe studii matematice, ci, în cel mai bun caz recomandă câteva perechi sau triplete uzuale, cu

eventuale comentarii ale influenței variației indicelui de refracție sau a coeficientului Abbe al sticlelor. Alegerea sorturilor este foarte importantă nu numai pentru corectarea aberațiilor cromatice, ci și pentru valorile reziduale ale aberațiilor geometrice, pentru că influențează forma constructivă a lentilelor care rezultă. Astfel, în cazul dubletului nelipit cu sortul crown-în-față, funcție de caracteristicile materialelor se poate obține una dintre soluțiile Fraunhofer sau Gauss. Pentru cazul flint-în-față se pot obține, de asemenea, forme constructive pentru soluțiile numite Steinheil.

Fiecare formă prezintă avantaje și dezavantaje, descrise în detaliu la expunerea algoritmului de proiectare, dar controlul formei, cel puțin în prezent, nu se face pe baze matematice, ci prin încercări, eventual pe baza experienței anterioare a proiectantului.

Oferta producătorilor de sticle optice s-a extins foarte mult în ultimul timp, astfel încât exploatarea ei ar necesita o bază rațională de selecție a sorturilor, care să conducă direct la soluțiile dorite.

În ceea ce privește tripletele, compatibilitatea sorturilor de sticlă reprezintă o condiție și mai dificil de îndeplinit. Literatura face trimiteri relativ vagi la familiile de sorturi capabile să satisfacă apocromazia, ceea ce impune mai imperativ decât în cazul dubletelor o formulare analitică a relațiilor dintre indicii de refracție și indicatorii de dispersie ai combinației de sticle, care să asigure obținerea unui triplet apocromat.

Este interesant de remarcat faptul că analiza difracțională a soluțiilor bazate pe algoritmi identici, atât în cazul dubletelor, cât și a tripletelor, cu perechi, respectiv triplete de sorturi diferite, pune în evidență caracteristici de rezoluție și contrast foarte diferite. Literatura de specialitate nu conține referiri la criteriile de alegere a materialelor, care să conducă la soluții limitate la difracție.

Al doilea principiu care inspiră algoritmi de proiectare ai subansamblurilor optice vizează, ca idee de bază, *asocierea lentilelor convergente cu cele divergente*, atât pentru compensarea aberațiilor cromatice, cât și a celor geometrice.

În prima etapă de sinteză a unui subansamblu la care se are în vedere corectarea cromatismului în sensul asigurării acromaziei sau apocromaziei, se apelează la dioptrica de ordinul I, care fumizează puterile lentilelor componente și curburile lor totale.

Problema mai complexă și nerezolvată complet până în prezent, în sensul că nu există nici un algoritm care să ofere o soluție finală, sigură, la parametri de calitate impuși, este aceea a determinării efective a razelor și grosimilor componentelor.

Razele și grosimile reprezintă grade de libertate, care sunt introduse ca necunoscute în expresii ale unor aberații vizate a fi corectate. Din punct de vedere practic, expresiile analitice exacte, conținând mărimile reale (înălțimi de incidență, unghiuri de incidență și emergență, unghiuri ale razelor incidență și emergentă cu axa optică) sunt greu sau imposibil

de scris și cu atât mai mult de rezolvat.

Practic, se apelează la simplificări bazate pe teoria lentilelor infinit subțiri și aberațiilor primare, care au forme matematice mai accesibile.

În cazul dubletului nelipit, separat cu un strat subțire de aer se apelează la expresii ale aberației sferice și comei, care permit determinarea primei razei a fiecărei lentile a dubletului. A doua rază se calculează din expresia gaussiană a puterii funcție de curbura totală determinată în prima etapă.

Pentru dubletul Fraunhofer lipit este utilizată expresia aberației sferice primare cu ajutorul sumelor-G, care conduce la determinarea primei raze. Pentru ultima, se poate apela la metoda Conrady de acromatizare marginală.

În cazul tripletului, care este un subansamblu mai complex, ca și în cazul tripletului Cook (la care cele trei lentile sunt separate prin aer) nu s-au dezvoltat metode de determinare analitică a razelor. Toate sursele bibliografice indică *alegerea unei valori arbitrare a primei raze și determinarea celorlalte trei din expresia puterii gaussiene*.

Sistemele reale, calculate pe baza relațiilor din dioptrica de ordinul I și III, au caracteristici mai mult sau mai puțin diferite față de cele impuse și necesită corecturi iterative ale curburilor. Această problemă a condus la dezvoltarea unei teorii a funcțiilor de merit, prin care fiecărei aberații i se atribuie un factor de pondere și se urmărește o minimizare a funcției rezultate. De subliniat este faptul că funcțiile de merit nu au semnificație fizică și, deși s-au dezvoltat în numeroase variante, nu au asigurat succesul în proiectare a sistemelor optice.

Metodele de sinteză bazate pe dioptrica de ordinul I și III conduc la soluții cu aberații reziduale, care de cele mai multe ori nu sunt acceptabile.

În comparație cu ritmul relativ încet al evoluției în sinteză, analiza calității sistemelor optice s-a dezvoltat mult mai rapid, până la nivelul determinării componentelor funcției optice de transfer și a parametrilor derivați din acestea, care pot stabili valorile erorilor de formare a imaginii la scară nanometrică.

Analiza foarte rapidă, practic instantanee pentru orice parametru de calitate a imaginii a permis un studiu, cel puțin intuitiv, al influenței parametrilor geometrici ai componentelor. Aceste studii pot fi utilizate în scopul optimizării unui sistem dat, dar numai în limite relativ restrânse. De exemplu, variația grosimilor sau a curburilor unui triplet lipit nu modifică cromatismul secundar și alura curbelor de sferocromatism, ci le deplasează pe axa optică, ceea ce permite stabilirea celui mai bun plan de punere la punct a imaginii și respectiv o minimizare a aberației de undă, care este hotărâtoare pentru caracteristicile difracționale ale sistemului. Metoda este totuși limitată, pentru că nu poate modifica valorile absolute ale aberației sferice.

Având în vedere cele de mai sus, prezentate ca observații la metodele de proiectare actuale, descrise în prezentul capitol, rezultă următoarele direcții de cercetare:

- ◆ *elaborarea unor algoritmi de compatibilitate a materialelor optice în scopul obținerii unor soluții constructive impuse dubletului acromat și tripletului apocromat*
- ◆ *aplicarea algoritmilor deduși analitic prin programe originale pe baze de date constituite din cataloagele unor firme producătoare de sticlă optică, astfel încât alegerea sorturilor să asigure corectarea cromatismului, respectiv spectrului secundar*
- ◆ *dezvoltarea metodelor actuale de sinteză a tripletului acromat prin algoritmi care să orienteze alegerea a razelor subansamblului*
- ◆ *studiul influenței perechii, respectiv tripletului de materiale asupra rezoluției, contrastului și iluminării în planul imagine*
- ◆ *sinteza unor triplete apocromate limitate la difracție cu deschidere mare, în condițiile în care, în prezent, tripletele au deschidere limitată la $f/8...f/10$ și nu îndeplinesc condițiile de analiză difracțională datorită aberațiilor geometrice foarte mari.*

Contribuțiile originale ale autoarei în prezentul capitol pot fi formulate astfel:

- ◆ Sinteza bibliografică a unui material foarte bogat privind metodele de proiectare a subansamblurilor acromate și apocromate, metode care nu fac obiectul unui standard nici în România, nici pe plan internațional
- ◆ Selectarea, conform experienței proprii de proiectare, a celor mai eficiente metode pentru sinteza dubletului acromat lipit și nelipit și a tripletului apocromat lipit
- ◆ Elaborarea unor programe automate originale, scrise în limbajul QBasic, pentru sinteza dubletului acromat și a tripletului apocromat

Bibliografie: [C3], [D2], [G1], [G2], [G3], [G13], [H2], [H4], [J1], [K1], [M4], [N1], [N2], [N3], [N5], [O1], [P3], [P5], [R1], [S2], [S4], [S6], [S7], [S10], [W3], [W4], [W8], [W14]

CAP.2. INDICATORI DE EVALUARE A CALITĂȚII IMAGINII

2.1.GENERALITĂȚI

Evaluarea calității imaginii este o etapă consecutivă sintezei sau alegerii subansamblurilor unui sistem optic.

Din punct de vedere calitativ, imaginea formată de un sistem optic este corespunzătoare dacă este asemenea cu obiectul – nu prezintă imperfecțiuni geometrice – și reproduce fidel culoarea acestuia în toate punctele componente. La modul absolut, asemănarea perfectă, la o scară constantă pentru orice punct din planul imagine, este realizată numai de sistemele optice ideale, descrise prin dioptrica de ordinul I. Doar în domeniul gaussian formarea imaginii are atribute ideale (este stigmatică, aplanatică și ortoscopică - adică sistemul optic transmite în spațiul imagine forma identică obiectului punctiform, liniar, respectiv plan).

Sistemele optice reale lucrează cu fascicule de deschidere și înclinare mari față de axa optică pentru a asigura câmpurile obiect impuse și luminozitatea corespunzătoare în planul imagine. În consecință, imaginile formate de sistemele optice reale sunt afectate de erori geometrice, a căror mărime nu depinde numai de deschiderea și înclinarea fasciculelor luminoase, ci și de forma dioptrilor și densitatea optică a mediilor, ceea ce determină diferențe de drum între punctele aparținând aceleiași front de undă și, ca urmare, deformarea acestuia.

Din punct de vedere al reproducerii culorii, numai utilizarea luminii pur monocromatice asigură un răspuns spectral ideal. În realitate, majoritatea aparatelor optice lucrează cu lumină albă, în domeniul vizibil sau cu lumină policromatică în domeniul IR sau UV. Sistemele laser sunt singurele pentru care analiza cromatică a imaginii poate fi omisă.

În mod tradițional, parametrii de calitate a imaginii s-au confundat cu aberațiile geometrice și cromatice reziduale, ale căror valori, funcție de aplicația dată, erau interpretate și reprezentau elementul hotărâtor în aprecierea soluției analizate.

De remarcat este faptul că determinarea aberațiilor se bazează exclusiv pe un calcul pur

geometric, care nu permite relevarea unor aspecte importante de natură ondulatorie sau energetică. Aceste aspecte vizează în special distribuția iluminării – atât din punct de vedere fotometric, cât și spectral – în planul imagine și, de asemenea, rezoluția asigurată de sistemul optic – ceea ce necesită evaluarea caracteristicilor petelor de difracție.

Tendința actuală este de a completa analiza tradițională pe baza aberațiilor determinate geometric cu parametri hibridi geometric-ondulatorii și geometric-energetici.

Calculul optic a evoluat și în sensul că metoda cea mai completă, în ceea ce privește informația furnizată, este drumuirea vectorială, care permite trasarea razelor cu orice orientare spațială (drumuirea trigonometrică tradițională modelează trasarea razelor numai în plan meridian). Cu ajutorul drumuirii vectoriale se pot determina coordonatele spațiale ale punctelor imagine pentru orice punct din spațiul obiect. Având la dispoziție această unealtă, se poate calcula o eroare globală de formare a imaginii, cu cele trei proiecții ale sale pe axele unui sistem de referință. În acest context, aberațiile geometrice tradiționale își pierd semnificația, cel puțin din punct de vedere matematic, având în vedere că ele, de fapt, reprezintă componente ale erorii totale. Suprapunerea și interdependența lor este evidențiată în întreaga literatură și reprezintă un punct slab în metodologia clasică de apreciere a calității imaginii.

Dacă din punct de vedere numeric, aberațiile tradiționale ar putea fi înlocuite cu rezultatele drumuirilor vectoriale, totuși, din punct de vedere calitativ, păstrarea lor este încă necesară datorită expresivității în a face legătura între cauza erorii (deschidere, înclinare) și efectul asupra formei imaginii (neclaritate, distorsiune).

În prezent, analiza calității imaginii se realizează cu ajutorul unor softuri dedicate, care furnizează date complete despre sistemul optic studiat: caracteristici de referință, aberații longitudinale și transversale, primare, de ordinul cinci și totale, diagrama spot, funcția imagine a punctului, funcția optică de transfer.

2.2. ABERAȚII OPTICE

2.2.1. Generalități

Sistemele optice formează imagini cu caracteristici ideale numai în domeniul paraxial (pentru care fasciculele care intră în sistemul optic au deschidere și înclinare față de axa optică mici) și în lumină monocromatică.

Practic, condițiile de mai sus nu sunt regăsite în funcționarea sistemelor optice reale. Ca urmare, sistemele optice reale formează imagini cu erori de geometrie și de culoare, denumite *aberații*. Numeric, aberațiile reprezintă diferențe între valorile reale ale unor parametri (abscise, înălțimi de incidență, înălțimi ale imaginilor) și valorile de referință ale aceluiași parametri, determinați în dioptrica de ordinul I.

Deschiderea largă a fasciculelor conduce la manifestarea unor aberații specifice: *aberația de sfericitate* (sau *de deschidere*) și *coma*.

Înclinarea mare a fasciculelor față de axa optică determină apariția unui grup de trei aberații caracteristice: *astigmatismul*, *curbura de câmp* și *distorsiunea*.

Cele cinci tipuri de aberații enumerate mai sus se numesc *aberații geometrice* și se manifestă și în lumină monocromatică.

Policromatismul sursei stă la baza *aberațiilor cromatice*, care se asociază aberațiilor geometrice.

2.2.2. Aberația de undă

Toate aberațiile pot fi descrise în termeni care apelează natura ondulatorie a luminii. În mod generic, abaterile de la forma și poziția frontului de undă ideal sunt denumite *aberație de undă* sau *diferență de drum optic*. Toate tipurile de aberații pot fi tratate ca aberații de undă și pot fi exprimate prin valori având ca unitate de măsură lungimea de undă.

Refracția luminii poate fi explicată prin raționamente bazate pe concepte ondulatorii. Obiectul reprezintă o sursă de unde sferice, incidente pe sistemul optic, care poate avea efect convergent sau divergent. Locul geometric al punctelor care oscilează în fază reprezintă un *front de undă*, care are forma unei sfere centrate în punctul obiect. Traseul geometric al unui punct pe fronturile de undă succesive corespunde conceptului de rază din optica geometrică și are direcția normalei la sferele centrate în punctul obiect.

La sistemele optice care prezintă aberații geometrice, fronturile de undă reale diferă de cele ideale sferice și centrate în punctul imagine. Fronturile de undă reale pot fi sferice dar au curbura mai mare sau mai mică decât cea a sferei de referință sau pot avea forme asferice, funcție de aberația care se manifestă în sistem.

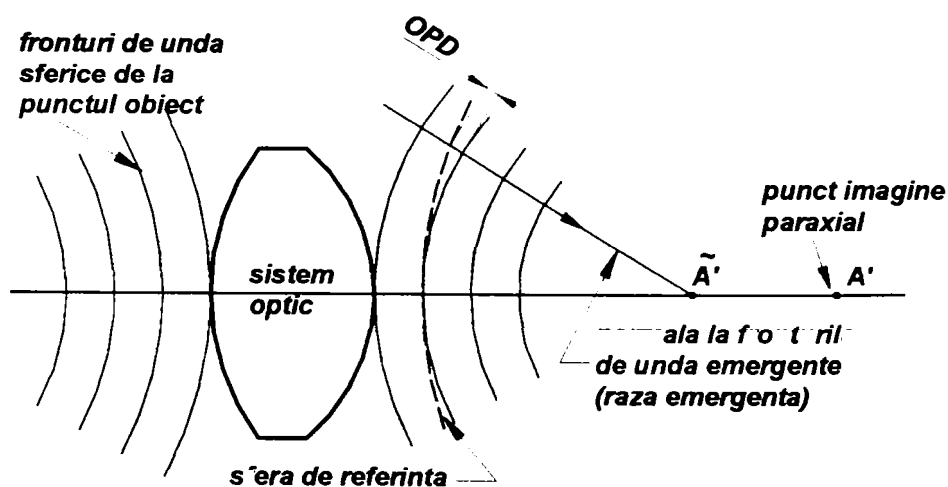


Fig.2.1. Aberația sferică a unei lentile convergente (sistem optic convergent) determină curbura suplimentară a fronturilor de undă emergente

În figura 2.1 este prezentat, spre exemplificare, efectul aberației sferice introduse de o lentilă convergentă biconvexă, asupra fronturilor de undă emergente. Acestea își păstrează forma sferică, dar au raza de curbură mai mică decât cea a sferei de referință.

În figură este reprezentată sfera de referință centrată în punctul imagine paraxial A' și sferile având curburi mai accentuate, corespunzătoare deschiderii maxime. Raza emergentă marginală este locul geometric al unui punct pe fronturile succesive, are direcția normală la fronturi și intersectează axa optică în punctul imagine extraaxial \tilde{A}' . Pe direcția razei sferei de referință, distanța dintre sfera reală și cea de referință reprezintă *aberația de undă* sau *diferența de drum optic (OPD)*.

Fronturile de undă asociate aberațiilor axiale, cum ar fi aberația sferică, reprezintă figuri de rotație simetrice. În cazul aberațiilor care se referă la puncte extraaxiale – coma, astigmatismul – fronturile de undă au forme asimetrice sau cu două plane de simetrie (în cazul astigmatismului, forma torică). Pentru punctele extraaxiale, sfera de referință se consideră centrată în centrul pupilei de ieșire și, în mod curent, i se asociază o rază infinită.

Aberația de undă se exprimă în număr de lungimi de undă și, ca urmare, apelarea ei în interpretarea celorlalte aberații are sens numai dacă acestea au valori mici, de ordinul de mărime al lungimilor de undă.

Pentru determinarea numerică a OPD, în figura 2.2 se pot urmări elementele geometrice de care depinde aberația. Se consideră o sferă de referință centrată în focarul paraxial F' și sfera reală centrată în focarul extraaxial \tilde{F}' . Raza sferei reale este \tilde{s}' , iar a celei de referință $\tilde{s}'+\delta$, δ fiind distanța între cele două focare.

Diferența de drum geometric (OPD/n') - egală cu diferența de drum optic în aer – se poate scrie:

$$\frac{OPD}{n'} = \tilde{s}'+\delta - \delta \cos \tilde{\sigma}' - \tilde{s}' = \delta(1 - \cos \tilde{\sigma}'). \quad (2.1)$$

$$\text{Cu aproximarea } \cos \tilde{\sigma}' = 1 - \frac{1}{2} \sin^2 \tilde{\sigma}', \text{ OPD devine:} \quad (2.2)$$

$$OPD = \frac{1}{2} n' \delta \sin^2 \tilde{\sigma}'. \quad (2.3)$$

Relația (2.3) poate fi utilizată pentru a analiza defocusarea sistemelor optice, respectiv pentru a stabili toleranțele admise pentru defocusare. Utilizând criteriul Rayleigh $\lambda/4$ se pune condiția:

$$OPD = \pm \frac{\lambda}{4}, \quad (2.4)$$

ceea ce conduce la o adâncime admisă a focarului:

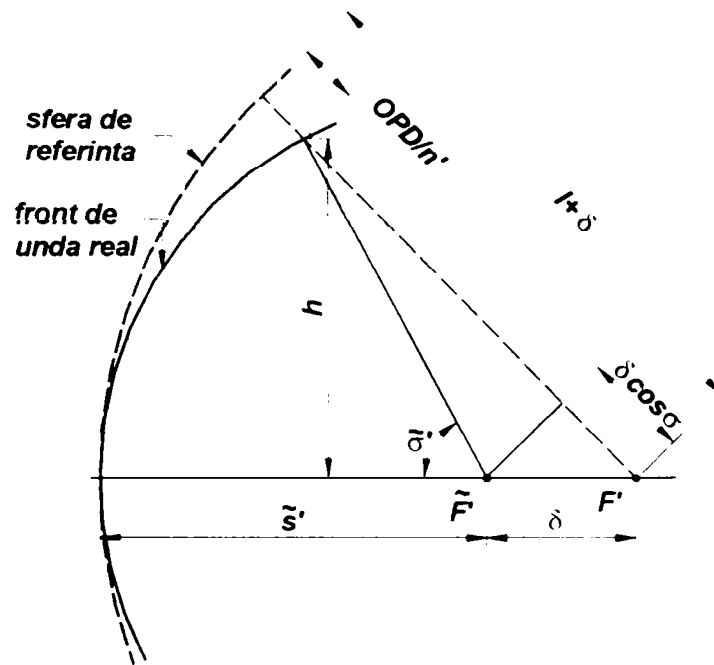


Fig.2.2. Diferența de drum optic (OPD) introdusă de poziția deplasată a focarului real față de cel de referință

$$\delta = \pm \frac{\lambda}{2n' \sin^2 \tilde{\sigma}'} = \pm 2\lambda \left(\frac{f'}{D} \right)^2. \quad (2.5)$$

În relația (2.5) s-a considerat $n'=1$ (în mediul imagine aer) și s-a utilizat aproximarea:

$$\sin \tilde{\sigma}' \cong \text{tg} \tilde{\sigma}' \cong \frac{h_{\max}}{f'} = \frac{D}{2f'}, \quad (2.6)$$

unde D este deschiderea sistemului. Relația (2.6) este scrisă pentru deschiderea maximă a sistemului.

Defocusarea transversală δ_t admisă se poate deduce utilizând aceeași aproximație:

$$\delta_t = \delta \text{tg} \tilde{\sigma}' = \frac{\lambda}{2n' \sin \tilde{\sigma}'} = \lambda \left(\frac{f'}{D} \right). \quad (2.7)$$

2.2.3. Efectul de difracție al diaframelor

Din punctul de vedere al opticii geometrice, un sistem ideal, descris prin dioptica de ordinul I, formează imaginea unui punct obiect tot într-un punct.

Pentru un studiu riguros al distribuției iluminării în planul imagine însă, chiar în cazul sistemelor optice ideale, lipsite complet de aberații, trebuie avute în vedere și manifestările ondulatorii ale luminii.

Difracția, care denumește generic fenomenele care au loc atunci când lumina întâlnește orice tip de obstacol, se manifestă pe muchiile diaframelor și monturilor lentilelor și are influență semnificativă asupra caracteristicilor punctului imagine. Acesta este, de fapt o pată

de difracție, cu dimensiuni finite și o distribuție energetică neuniformă.

Demonstrația are la bază Principiul lui Huygens, care arată că fiecare punct al unui front de undă este o sursă sferică secundară de unde, fronturile principale succesive fiind înfășurători ale fronturilor secundare. Din punct de vedere energetic, generarea fronturilor succesive are loc prin interferența undelor provenite de la sursele secundare.

Se consideră o lentilă perfectă L , fără aberații, în fața căreia se află diafragma D , pe care este incident un front de undă plan. Se urmărește distribuția iluminării în planul focal, în care este plasat ecranul E (fig.2.3).

Lentila fiind lipsită de aberații, razele paralele sunt perfect focalizate în punctul axial F' , ceea ce din punct de vedere ondulatoriu este echivalent cu a constata că drumurile optice AF' , BF' și CF' sunt egale, undele ajung în fază în punctul F' , unde interferează constructiv, determinând iluminarea zonei. Fronturile secundare, care pleacă din frontul plan incident, în direcția oarecare α , au drumuri optice diferite (diferența de drum între drumul AM și CM este CH).

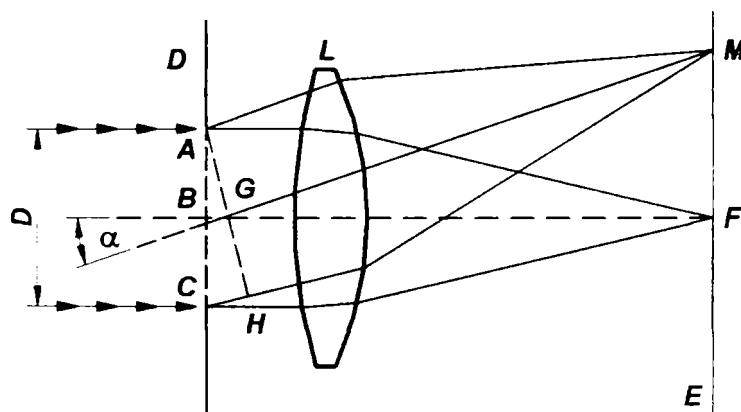


Fig.2.3. Schemă pentru analiza fenomenelor ondulatorii introduse de apertura finită a diafragmei

Într-un punct oarecare M , al ecranului undele secundare provenite din punctele A și C vor interfera constructiv, producând iluminarea punctului, dacă diferența de drum CH este egală cu un număr întreg de lungimi de undă. Pentru o diferență de drum egală cu un număr impar de jumătăți de lungime de undă, interferența este distructivă, undele se anulează reciproc și zona nu este iluminată. Iluminarea totală în punctul M va fi o sumă a contribuțiilor undelor provenite de la întreaga suprafață a diafragmei.

Iluminarea în planul ecranului este distribuită într-o serie de inele luminoase și întunecate alternante. În mijlocul figurii de difracție este un cerc de luminozitate maximă.

Pentru deschiderea circulară a diafragmei, distribuția intensității luminoase în planul imagine esre de forma:

$$I = I_0 \left[1 - \frac{1}{2} \left(\frac{m}{2} \right)^2 + \frac{1}{3} \left(\frac{m^2}{2^2 2!} \right)^2 - \frac{1}{4} \left(\frac{m^3}{2^3 3!} \right)^2 + \frac{1}{5} \left(\frac{m^4}{2^4 4!} \right)^2 - \dots \right]^2 = I_0 \left[\frac{2J_1(m)}{m} \right]^2 \quad (2.8)$$

unde $m = \frac{\pi D \sin \alpha}{\lambda}$, (2.9)

iar $J_1(m)$ este funcția Bessel de ordinul I.

Studiul relației (2.8) indică o scădere rapidă a iluminării de la pata luminoasă centrală numită *cercul* sau *pata Airy* la inelele luminoase concentrice dinspre periferia figurii de difracție.

În tabelul 2.1 sunt prezentate caracteristicile numerice privind dimensiunile și iluminarea petei Airy și a inelelor înconjurătoare.

Tabelul 2.1

Nr. de ordine al inelului	r	Iluminare relativă	Energia luminoasă a inelului
maxim central	0	1.000	83.9%
primul inel întunecat	$0.61\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
primul inel luminos	$0.82\lambda/n'\sin\sigma'$	0.017	7.1%
al doilea inel întunecat	$1.12\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
al doilea inel luminos	$1.33\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0041	2.8%
al treilea inel întunecat	$1.62\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
al treilea inel luminos	$1.85\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0016	1.5%
al patrulea inel întunecat	$2.12\lambda/n'\sin\sigma'$	0.0	
al patrulea inel luminos	$2.36\lambda/n'\sin\sigma'$	0.00078	1.0%

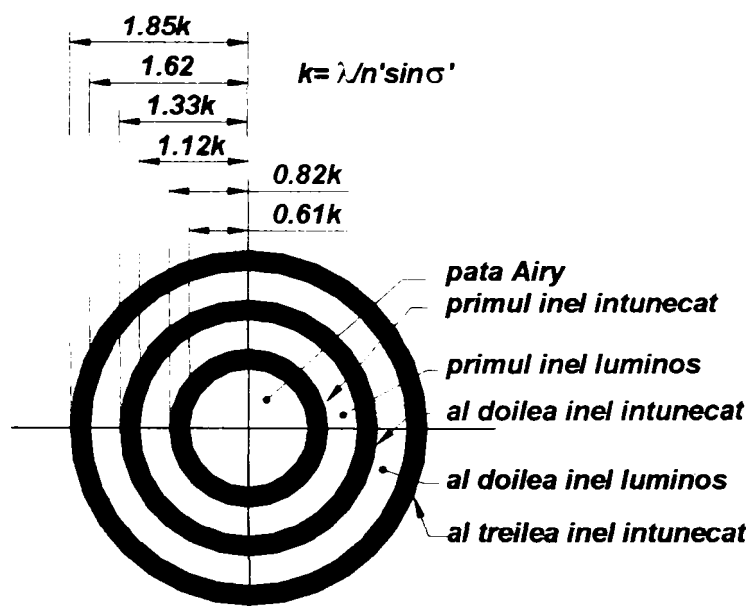


Fig.2.4. Distribuția iluminării în figura de difracție obținută pentru un sistem optic ideal

Se observă că 84% din energia totală a figurii de difracție se află în pata Airy, unde

iluminarea este de aproape 60 de ori mai intensă decât în primul inel luminos. În general, sunt semnificative pata centrală și primele două inele (fig.2.4), celelalte fiind prea slabe pentru a mai fi sesizate, indiferent care ar fi receptorul.

De reținut este faptul că prezența aberațiilor conduce la modificări ale formei, dimensiunilor și distribuției energetice a figurilor de difracție descrise anterior și caracteristice numai sistemelor optice ideale.

Valoarea normată a raportului dintre iluminarea în pata Airy obținută cu un sistem optic dat și iluminarea în pata Airy a sistemului ideal (limitat la difracție, conform demonstrației de mai sus) reprezintă un parametru de calitate a imaginii numit *Raportul Strehl*.

2.2.4. Aberații geometrice

2.2.4.1. Aberația sferică

Aberația sferică (de deschidere sau de apertură) apare la formarea imaginii în fascicule largi și are ca efect variația abscisei imagine funcție de apertură.

Datorită acestei aberații, conul luminos drept cu vârful într-un punct obiect axial, este transformat de sistemul optic într-o figură având generatoare curbă, numită *caustică*. Pe un ecran plasat perpendicular pe axa optică, în diverse puncte pe axa optică, în spațiul imagine, se pot vizualiza pete circulare difuze de diverse mărimi și intensități luminoase (fig.2.5).

Aberația de sfericitate se redă grafic printr-o curbă reprezentând variația abscisei imagine sau a distanței focale imagine (pentru obiect situat la infinit) în funcție de deschiderea sistemului. Analitic, *aberația de sfericitate axială sau longitudinală* se exprimă prin diferența maximă a absciselor sau a distanțelor focale ce provin de la un fascicul incident:

$$ds' = \tilde{s}' - s' \text{ sau } ds' = \tilde{f}' - f'. \quad (2.10)$$

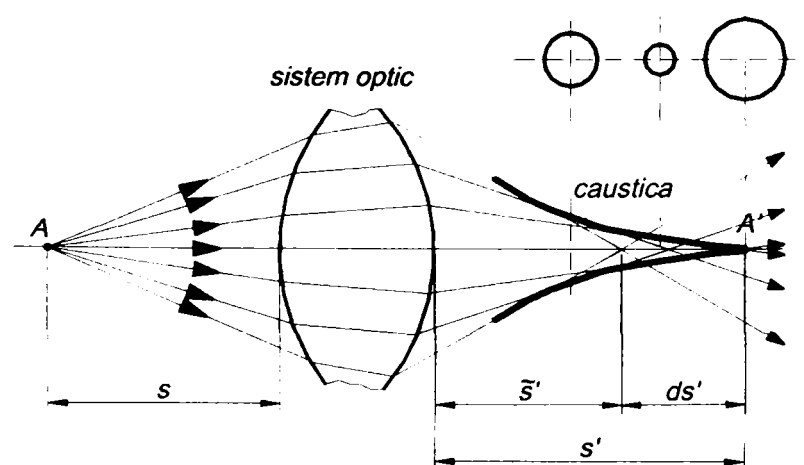


Fig.2.5. Forma fasciculului emergent la sisteme optice reale afectate de aberație sferică

În cazul lentilelor convergente, aberația este negativă și lentila se numește *subcorectată*

(fig.2.6.a).

În cazul lentilelor divergente aberația se consideră pozitivă și lentila se numește *supracorectată*, curba fiind orientată în sensul propagării razelor (fig.2.6.b).

Pentru aceeași distanță focală și deschidere, aberația de sfericitate se schimbă în funcție de forma lentilei și de orientarea acesteia față de planele conjugate obiect-imagini.

Printre metodele de corectare a aberației sferice se numără și următoarele:

- ◆ Asocierea unei lentile convergente (subcorectate) cu o lentilă divergentă (supracorectată), calculate astfel încât aberația negativă a lentilei convergente să fie compensată de aberația pozitivă a lentilei divergente, cel puțin pentru o înălțime de incidență (în general, înălțimea maximă sau zonală). Prin alegerea corespunzătoare a indicilor de refracție ai celor două lentile se poate realiza totodată și acromatizarea sistemului (corectarea aberațiilor cromatice), rezultând un acromat.

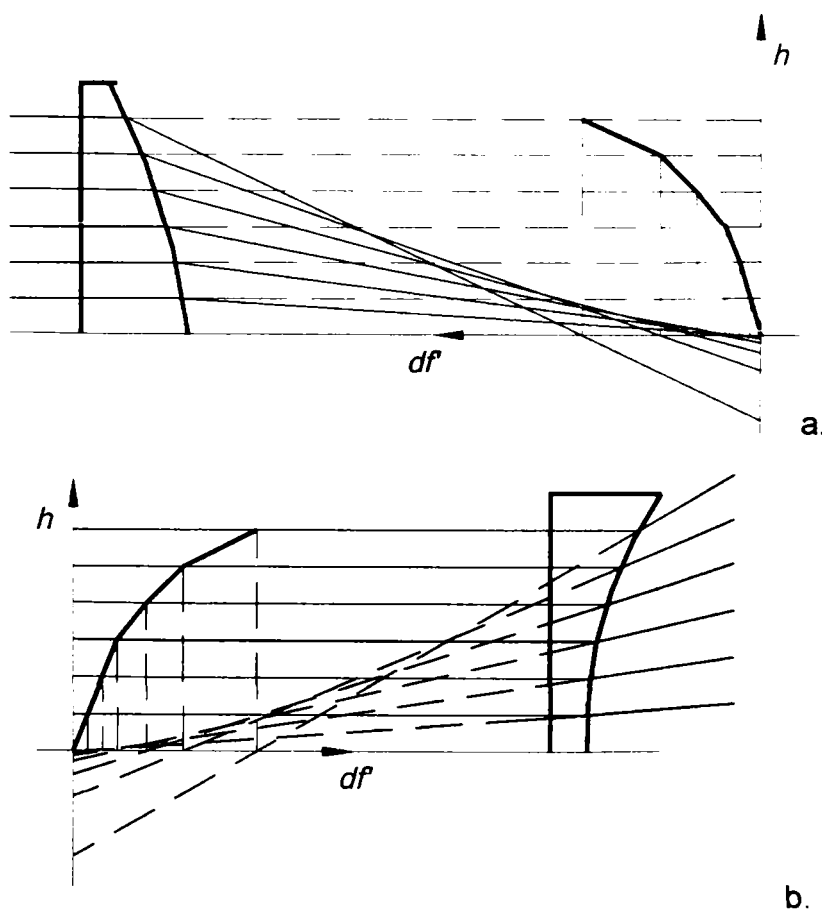


Fig.2.6. Aberația sferică axială a lentilei convergente (a) și divergente (b)

Chiar și în cazul dubletului acromat, aberația de sfericitate nu poate fi corectată pentru toate deschiderile fasciculului. O anulare a aberației se poate realiza numai pentru două zone ale lentilei, zona paraxială și una marginală, sau intermediară cu focar comun. Pentru restul zonelor se manifestă o aberație remanentă (reziduală), dar de o valoare considerabil mai mică față de cea a lentilei simple necorectate.

- ◆ Înlocuirea unei componente unice cu un sistem format din mai multe lentile, având raze de curbură mai mari decât cele ale lentilei echivalente. În acest caz devierea razelor prin sistem fiind distribuită pe mai multe suprafețe, unghiurile de incidență vor fi mai mici iar aberația de sfericitate redusă corespunzător.
- ◆ Utilizarea lentilelor cu suprafețe asferice, astfel încât razele luminoase care traversează lentila prin diverse zone să prezinte un focar comun.

Aberația de sfericitate transversală se notează cu dy' (fig.2.7) și se exprimă prin relația:

$$dy' = ds' \cdot \text{tg} \tilde{\sigma}'_k \quad (2.11)$$

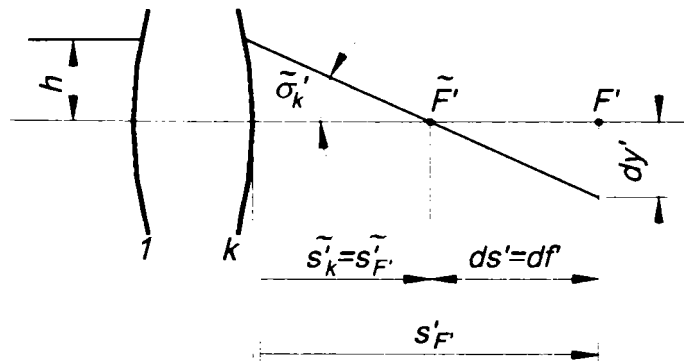


Fig.2.7. Aberația sferică transversală

Aberația sferică transversală se reprezintă grafic funcție de tangenta unghiului σ'_k (fig.2.8).

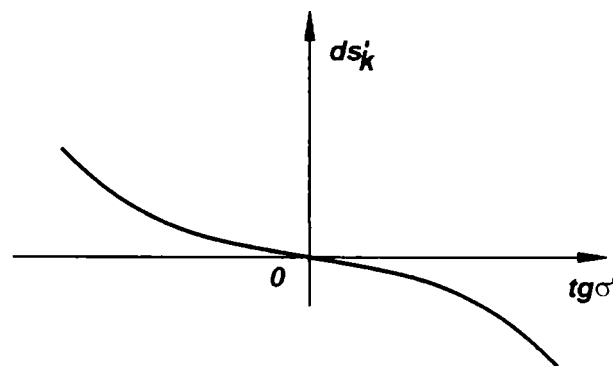


Fig.2.8. Reprezentarea aberației sferice transversale

Aberația sferică transversală reprezintă un parametru important de calitate a imaginii pentru că mărimea sa este o măsură a neclarității imaginii.

Stabilirea toleranțelor pentru aberația sferică se poate face implicând diferența de drum optic OPD. Aplicând criteriul Rayleigh, se impune condiția ca OPD să nu depășească $\lambda/4$ și se obține valoarea admisibilă a aberației sferice longitudinale:

$$ds'_{M\max} = \pm \frac{4\lambda}{n' \sin^2 \tilde{\sigma}'_M} = \pm 16\lambda \left(\frac{f'}{D} \right)^2. \quad (2.12)$$

Aberația sferică transversală admisă va fi:

$$ds'_{kM\max} = \pm \frac{4\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'_M} = \pm 8\lambda \left(\frac{f'}{D} \right). \quad (2.13)$$

Dacă sistemul este bine corectat și $ds'_M=0$, toleranțele pentru aberația sferică zonală longitudinală și transversală sunt:

$$ds'_{z\max} = \pm \frac{6\lambda}{n' \sin^2 \tilde{\sigma}'_M}, \quad (2.14)$$

$$ds'_{kz\max} = \pm \frac{4.2\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'_M}. \quad (2.15)$$

2.2.4.2. Coma

Coma este o aberație geometrică determinată de înclinarea și deschiderea mare a fasciculelor care pornesc de la puncte extraaxiale. Ea poate fi privită ca o aberație sferică în cazul punctelor extraaxiale.

În figura 2.9 este prezentată o lentilă pe care este incident un fascicul paralel înclinat.

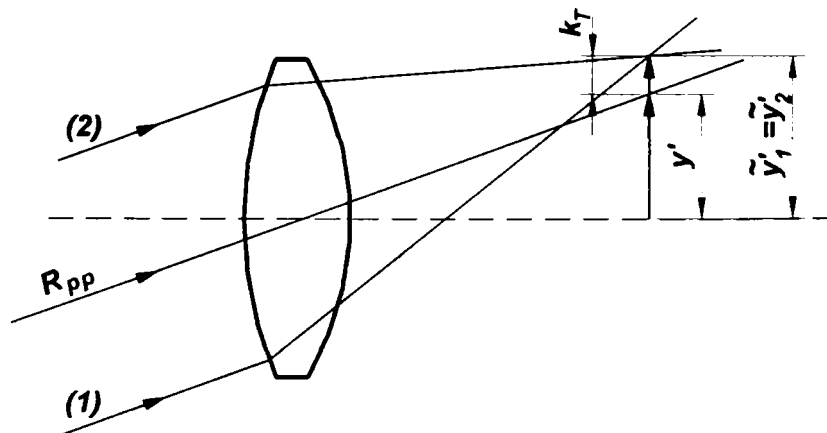


Fig.2.9. Coma tangențială în cazul unui fascicul paralel înclinat

Razele marginale (1) și (2) determină imaginile de înălțime $\tilde{y}'_1 = \tilde{y}'_2$ diferită de y' - înălțimea corespunzătoare imaginii formate cu ajutorul razei pupilare principale. Diferența dintre înălțimile imaginilor $\tilde{y}'_{1,2}$ și y' definește coma tangențială:

$$k_T = \tilde{y}'_{1,2} - y'. \quad (2.16)$$

În figura 2.10 se poate urmări forma petei de difracție din planul imagine pentru un punct obiect extraaxial S. Raza pupilară principală determină în planul Σ al imaginii, punctul P, cel mai apropiat de axa optică. Razele înclinate față de raza pupilară principală, de tipul S1, S1',

formează puncte imagine situate pe o dreaptă care trece prin punctul P și are direcția proiecției acestuia pe axa optică. Poziția punctelor imagine este cu atât mai îndepărtată de P, cu cât raza incidentă este mai înclinată, respectiv aparține unui fascicul de deschidere mai mare.

Pata de difuzie are o formă specifică, de cometă – care a inspirat și numele aberației – cu un nucleu luminos de dimensiuni reduse de la care se împrăștie o pată tot mai extinsă cu luminozitate tot mai slabă, corespunzătoare cozii cometei.

Coma este o aberație cu efecte puternic spoliatoare a calității imaginii datorită formei asimetrice a petei luminoase și a distribuției neuniforme a luminii în această pată.

Mărimea aberației este influențată de forma lentilelor și de poziția tuturor monturilor din sistemul optic. De asemenea, este direct proporțională cu depărtarea punctului obiect față de axa optică în planul xy. Ca urmare, coma este una dintre aberațiile care limitează câmpul util obiect, respectiv imagine, deoarece, de la centru spre margine, imaginea devine tot mai neclară.

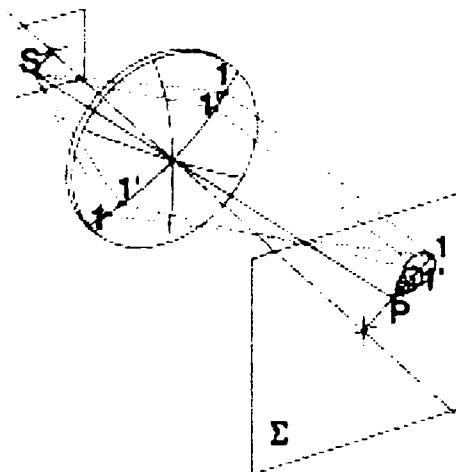


Fig.2.10. Imaginea afectată de comă a unui punct obiect extraaxial

Pentru calculul comei sunt necesare trei drumuri trigonometrice meridiane, și anume pentru raza pupilară principală și cele două raze marginale care definesc deschiderea fasciculului. Relația pentru calculul comei tangențiale este de forma:

$$k_T = \tilde{y}'_1 - y'_p + \frac{(\tilde{y}'_1 - \tilde{y}'_2)(\operatorname{tg}\tilde{\sigma}'_1 - \operatorname{tg}\tilde{\sigma}'_p)}{\operatorname{tg}\tilde{\sigma}'_2 - \operatorname{tg}\tilde{\sigma}'_1} \cong \frac{\tilde{y}'_1 + \tilde{y}'_2}{2} - y'_p. \quad (2.16)$$

Coma sagitală se poate determina funcție de cea tangențială:

$$k_s = \frac{1}{3} k_T. \quad (2.17)$$

Pentru a caracteriza coma în cazul unghiurilor mici ale razei pupilare principale se utilizează și *aberația de izoplanetism*:

$$\Delta F'_k = \frac{k_s}{y'} = \frac{\tilde{y}' - y'_p}{y'_p} = \frac{\tilde{y}'}{y'_p} - 1. \quad (2.18)$$

Pentru calculul acestei aberații, se trasează o rază paraxială, una marginală de la punctul obiect axial și raza pupilară principală, iar cu datele rezultate din drumuri se determină:

$$\Delta F'_k = \frac{\sin \tilde{\sigma}}{\sigma} \cdot \frac{\sigma'}{\sin \tilde{\sigma}'} \cdot \frac{(s' - s'_p)}{(\tilde{s}' - s'_p)} - 1. \quad (2.19)$$

Dacă se impune anularea aberației de izoplanetism rezultă condiția sinusurilor sau condiția de izoplanetism. Punctele pentru care aberația sferică este nulă și satisfac condiția sinusurilor se numesc aplanetice, atribut care se transferă și asupra lentilelor sau sistemului care asigură îndeplinirea condițiilor.

Toleranța pentru aberația de comă, stabilită pe baza criteriului Rayleigh $\lambda/4$ aplicat OPD, este:

$$k_T = \pm \frac{1.5\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'}. \quad (2.20)$$

Valorile indicate de relația (2.20) sunt rareori respectate practic, fiind extrem de dificil de corectat un sistem optic la un astfel de nivel pentru un câmp obiect rațional. În majoritatea aplicațiilor, coma depășește mult această toleranță.

2.2.4.3. Astigmatismul și curbura de câmp

Astigmatismul este o aberație geometrică datorată înclinării mari a fasciculelor înguste față de axa optică. În figura 2.11 este reprezentată o lentilă care formează imaginea unui obiect liniar AB. Din punctul extraaxial B pornește un fascicul luminos incident pe suprafața lentilei după un cerc ale cărui diametre în plan tangențial și sagital au fost notate M_1M_2 și S_1S_2 . Planul meridian sau tangențial este determinat de axa optică și raza pupilară principală. Planul sagital este perpendicular pe planul tangențial și conține raza pupilară principală.

Datorită asimetriei celor două plane față de axa optică refracțiile sunt diferite formându-se două imagini distincte ale punctului B în B'_M , la intersecția razelor marginale meridiene și, respectiv B'_S , la intersecția razelor marginale sagitale.

Dacă în spațiul obiect fasciculul incident are secțiune circulară, după refracția pe sistemul optic, în spațiul imagine secțiunea acestuia este variabilă. Imediat după lentilă, fasciculul emergent are secțiune circulară, care devine eliptică, având axa mare în plan sagital. În punctul B'_M elipsa devine o dreaptă $S'_1S'_2$. În continuare, secțiunea are formă circulară (și reprezintă pata de cea mai mică difuzie), apoi devine eliptică, având axa mare în plan tangențial. Pentru obiect situat la infinit, liniile $M'_1M'_2$ și $S'_1S'_2$ reprezintă liniile de focar tangențial, respectiv sagital (*focarele Sturm*).

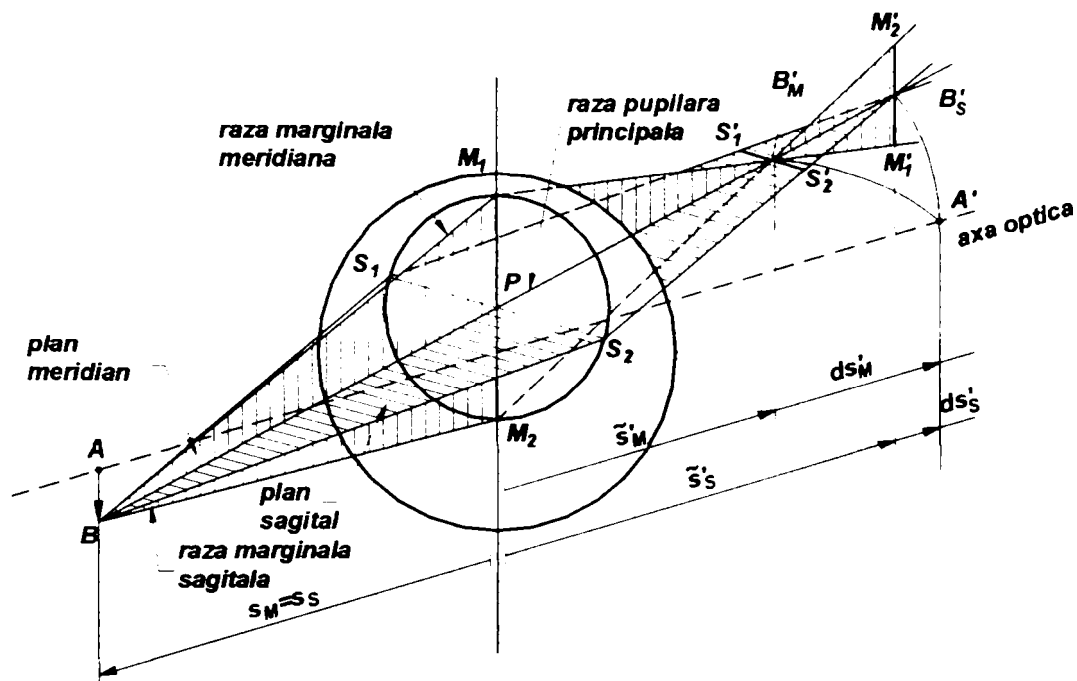


Fig.2.11. Manifestarea aberației de astigmatism la formarea imaginii unui punct extraaxial de la care pornește un fascicul puternic înclinat

Astigmatismul se manifestă prin neclaritatea imaginii și are efecte minime într-o secțiune situată între liniile de focar, într-o zonă de difuzie minimă.

Dacă se construiește imaginea tuturor punctelor obiectului AB se constată că se obțin două imagini separate, corespunzătoare planelor tangențial și sagital, de formă neliniară și având curburi diferite (arcele $A'B'_M$ și $A'B'_S$ în figura 2.11).

Astigmatismul se consideră corectat dacă se realizează suprapunerea suprafețelor imagine curbe tangențială și sagitală. Curbura suprafeței imagine, în absența astigmatismului, reprezintă un alt tip de aberație geometrică numită *curbură de câmp*. Suprafața curbă imagine poartă numele de *suprafață Petzval*. Spre deosebire de aceasta, care are formă sferică, suprafețele tangențială și sagitală generate de astigmatismul primar au formă de paraboloid. Suprafața tangențială se află la o distanță de trei ori mai mare decât cea sagitală (fig.2.12).

Pentru punctele axiale astigmatismul nu se manifestă. În cazul punctelor extraaxiale este cu atât mai accentuat cu cât depărtarea acestora față de axa optică este mai mare. Mărimea aberației de astigmatism depinde de puterea și forma lentilei, dar și de poziția și deschiderea diafragmei de apertură care determină pupila de intrare.

Pentru o lentilă singulară astigmatismul este numeric aproximativ egal cu raportul y'^2/f' .

Din figura 2.12 se observă că suprafețele imagine tangențială și sagitală se găsesc de aceeași parte a suprafeței Petzval, ceea ce constituie o regulă generală. Considerând suprafața Petzval ca referință, dacă suprafețele astigmatice sunt curbate spre sistemul optic

(ca în figura 2.12) astigmatismul se numește negativ sau subcorectat. În caz contrar, este pozitiv sau supracorectat (cele două suprafețe astigmatice au curburile inverse celor din figura 2.12).

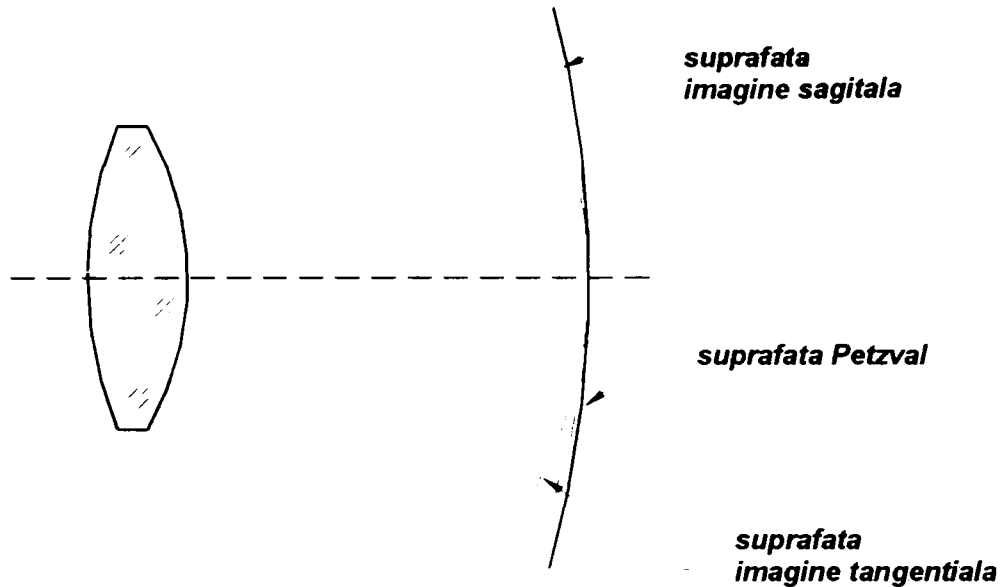


Fig.2.12. Suprafața Petzval și suprafețele imagine tangențială și sagitală

Curvura de câmp poate fi, de asemenea, pozitivă sau negativă, după cum centrul său de curbură se află între lentilă și suprafață, respectiv după aceasta. Curvura de câmp are numai o măsură axială sau longitudinală și reprezintă distanța dintre suprafața imagine de referință plană și suprafața Petzval. Pentru o lentilă singulară curvura de câmp este aproximativ $y^2/2nf'$.

Astigmatismul se apreciază prin curburile de câmp astigmatice tangențială z_t și sagitală z_s , determinate pentru diverse înclinări ale razei pupilare principale (pornind de la mai multe puncte de pe înălțimea obiectului). Mărimile z_t și z_s exprimă de fapt diferențele dintre proiecțiile pe axa optică a razelor tangențială și sagitală infinit apropiate razei pupilare principale și distanța imagine determinată de raza pupilară principală, raportată la axa optică. Aceste diferențe sunt asimilate cu distanțele de la punctele imagine astigmatice la suprafața imagine ideală plană, perpendiculară pe axa optică într-un punct corespunzător abscisei imagine meridiene date de raza pupilară principală.

Toleranțele pentru curburile astigmatice de câmp sunt date de toleranța la adâncimea focarului. În majoritatea aplicațiilor această precizie nu este atinsă, aberațiile reale fiind mult mai mari decât cele prescrise din criteriul ondulatoriu Rayleigh $\lambda/4$.

2.2.4.4. Distorsiunea

Distorsiunea este o aberație geometrică determinată de faptul că poziția imaginii punctelor extraaxiale, măsurată pe axa y diferă de poziția imaginii ideale, paraxiale. Distorsiunea se

poate exprima fie prin diferența dintre înălțimea reală \tilde{y}' a imaginii extraaxiale și înălțimea de referință paraxială a imaginii y' :

$$dy' = \tilde{y}' - y', \quad (2.21)$$

fie procentual – adimensional – cu raportare la înălțimea imaginii paraxiale:

$$dy'_{\%} = \frac{\tilde{y}' - y'}{y'} \cdot 100. \quad (2.22)$$

Aberația poate fi interpretată ca o variație a măririi transversale cu înălțimea obiectului. Această variație are ca efect formarea unor imagini care nu sunt asemenea cu obiectele.

Distorsiunea poate fi pozitivă sau negativă, după cum imaginea punctului extraaxial se formează mai aproape, respectiv mai departe de axa optică în raport cu punctul imagine de referință.

În figura 2.13 este reprezentată imaginea unui obiect de formă pătrată. Imaginea ideală, trasată cu linie întreruptă este asemenea cu obiectul. Pe imaginea reală, laturile rectilinii ale pătratului, datorită variației măririi liniare cu depărtarea de axa optică, sunt linii curbe. Sistemul optic poate introduce un efect de curbare spre exterior, cu distorsiune pozitivă (fig.2.13.a) sau de curbare spre interior, cu distorsiune negativă (fig.20.b). Se poate demonstra că distorsiunea este proporțională cu cubul înălțimii obiectului (iar distorsiunea procentuală cu pătratul acesteia). Din această observație rezultă că punctele din colțurile pătratului sunt afectate de o distorsiune de $2\sqrt{2}$ ori mai mare decât punctele de la mijlocul laturilor, ceea ce explică forma imaginii și descrie, cel puțin calitativ curburile.

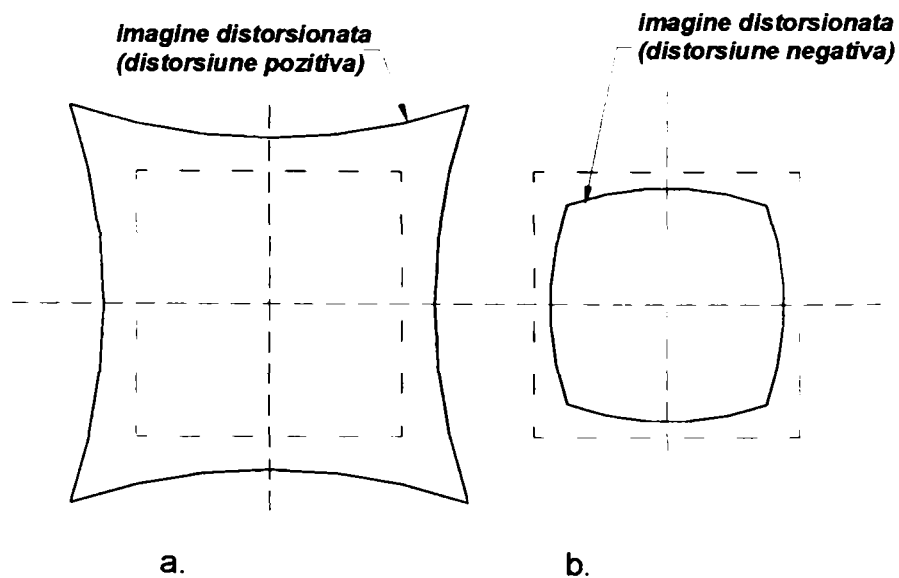


Fig.2.13. Imagini distorsionate pozitiv (a) și negativ (b) ale unui obiect de formă pătrată

Calculul distorsiunii presupune trasarea meridiană a razei pupilare principale, pentru

determinarea înălțimii \tilde{y}'_p și trasarea paraxială a unei raze obiective și a razei pupilare principale, pentru calculul înălțimii de referință y' .

2.2.5. Aberații cromatice

Aberațiile cromatice sunt determinate de policromatismul luminii albe în care lucrează majoritatea aparatelor optice. Aceste erori de formare a imaginii însoțesc aberațiile geometrice, dar nu depind de acestea și se manifestă chiar și în domeniul paraxial.

Aberațiile cromatice apar ca urmare a manifestării fenomenului de dispersie. Prin dispersie se înțelege descompunerea luminii policromatice în radiațiile monocromatice componente – fenomen generat de variația indicelui de refracție cu lungimea de undă a radiației. Ca urmare a acestei variații, abscisele imagine pentru diferite lungimi de undă nu coincid – refracția pe dioptrii sistemului optic având loc sub unghiuri diferite, funcție de lungimea de undă. De asemenea, mărimea imaginii diferă pentru culori diferite, astfel încât un alt efect al aberației cromatice este mărirea transversală variabilă cu lungimea de undă.

Dispersia materialelor optice în domeniul vizibil – numită *dispersie normală* - este monoton descrescătoare dar neliniară de la albastru spre roșu - (fig.2.14) - și, ca urmare, nu poate fi caracterizată printr-un singur parametru.

Indicatorii de dispersie utilizați în proiectarea componentelor optice sunt:

- ◆ dispersia medie (principală):

$$\Delta n = n_F - n_C \text{ sau } \Delta n = n_F - n_C \quad (2.23)$$

- ◆ numărul Abbe:

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C}; v_D = \frac{n_D - 1}{n_F - n_C}; v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (2.24)$$

- ◆ dispersii parțiale:

$$n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2}, \quad (2.25)$$

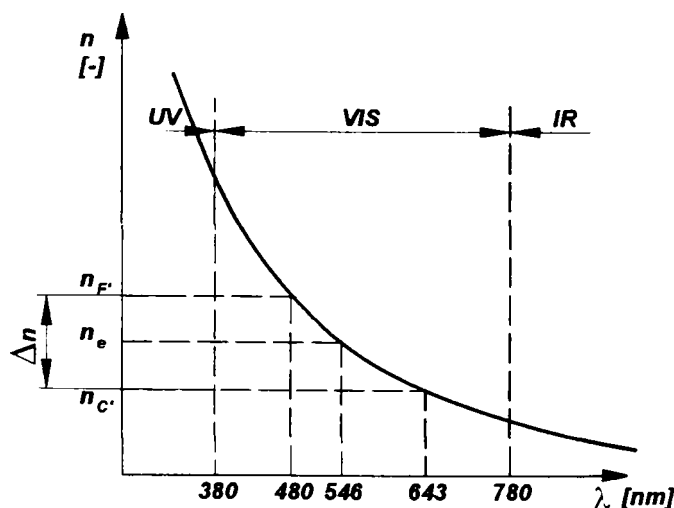


Fig.2.14. Dispersia în domeniul vizibil

- ◆ dispersii parțiale relative:

$$g_{\lambda} = \frac{n_{F'} - n_{\lambda}}{n_{F'} - n_{C'}} \quad (2.26)$$

Indicii Fraunhofer e, F', C' corespund liniilor spectrale cu lungimea de undă 546.074 nm (din spectrul Hg), 479.992 nm (din spectrul Cd) și respectiv 643.850 nm (din spectrul Cd), care definesc radiații de culoare verde – considerată de referință - , albastră și respectiv roșie. Radiațiile e, F' și C' reprezintă liniile de referință, respectiv de delimitare a domeniului vizibil de calcul, preferate în literatura de specialitate germană și, în general europeană. Sistemul american de calcul mai admite și setul spectral de bază d (sau D), F și C. De remarcat este faptul că, în cele două grupuri de radiații implicate direct în calcule, liniile sunt foarte apropiate (d – 587.56 nm – linie galbenă din spectrul He, D – 589.28 nm – linie galbenă din spectrul Na, F – 486.13 nm – linie albastră din spectrul H, C – 656.27 nm - linie roșie din spectrul H).

Se observă că în calculul de analiză și sinteză a sistemelor optice se utilizează linii spectrale de delimitare a domeniului vizibil diferite de cele care mărginesc domeniul și pentru care sensibilitatea spectrală a ochiului este nulă. Alegerea perechii de linii F'-C' sau F-C este justificată prin faptul că între cele două linii, albastră și roșie, se găsește aproape întreaga energie luminoasă din vizibil.

Aberația cromatică de poziție (longitudinală sau axială) determină formarea imaginii unui punct obiect axial sau poziția focarului în locuri distincte pe axa optică pentru lungimi de undă diferite.

Având în vedere relația dintre indicii de refracție:

$$n_{F'} > n_e > n_{C'} \quad (2.27)$$

rezultă aceeași relație de ordine între puterile unei lentile pentru cele trei linii spectrale:

$$\Phi_{F'} > \Phi_e > \Phi_{C'} \quad (2.28)$$

(considerând lentila infinit subțire cu puterea $\Phi=(n-1)c$) sau

$$f'_F < f'_e < f'_{C'} \quad (2.29)$$

Prin urmare, că planele focale ale unei lentile sunt situate la abscise diferite pe axa optică pentru lungimi de undă diferite (fig.2.15).

Eliminarea cromatismului presupune egalitatea absciselor imagine pentru toate lungimile de undă și pentru orice înălțime de incidență, ceea ce, practic, este imposibil. În proiectarea sistemelor optice, în mod curent, se urmărește suprapunerea a două sau trei abscise imagine (pentru două sau trei lungimi de undă), ceea ce se dovedește suficient pentru o bună calitate a imaginii.

Egalitatea absciselor imagine sau a distanțelor focale pentru două lungimi de undă se

numește *acromazie* sau *dicromazie*, iar sistemul care îndeplinește această condiție se numește *acromat* sau *dicromat*. Această egalitate se regăsește, în general, numai pentru o singură înălțime de incidență. Considerând ca referință abscisa comună $F'-C'$, diferențele dintre abscisele imagine pentru orice linie spectrală și abscisa comună de referință determină *spectrul secundar*.

Egalitatea absciselor imagine sau a distanțelor focale pentru trei lungimi de undă se numește *apocromazie* sau *tricromazie*, iar sistemul care îndeplinește această condiție se numește *apocromat* sau *tricromat*.

Tricromatele au spectrul secundar redus față de acromate. Apocromatele sunt compuse din cel puțin trei lentile.

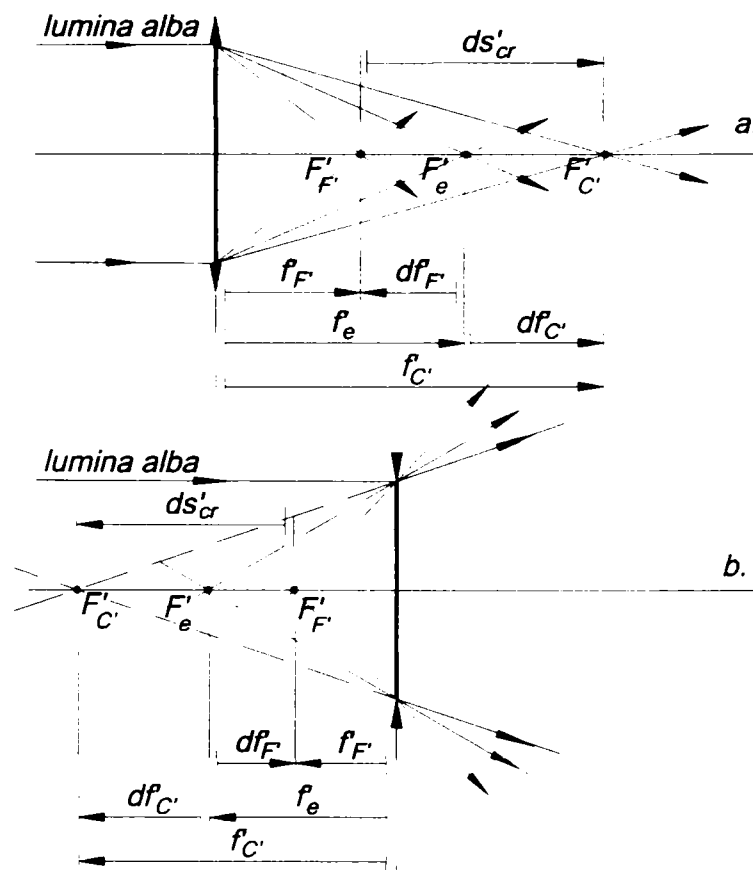


Fig.2.15. Aberația cromatică pentru lentila convergentă (a) și divergentă (b)

Egalitatea absciselor imagine sau a distanțelor focale pentru mai mult de trei lungimi de undă se numește *policromazie*, iar sistemul care îndeplinește această condiție se numește *policromat*.

Determinarea aberației cromatice axiale presupune calculul *aberației cromatice paraxiale* și al *aberației cromatice extraaxiale*.

Aberația cromatică axială paraxială, pentru domeniul vizibil, este reprezentată de diferența absciselor imagine paraxiale pentru liniile de la marginea domeniului:

$$ds'_{cr} = s'_F - s'_C \quad (2.30)$$

Aberația cromatică axială extraaxială se exprimă ca diferență a absciselor imagine extraaxiale de la marginile spectrului vizibil, la diverse înălțimi de incidență:

$$d\tilde{s}'_{cr} = \tilde{s}'_F - \tilde{s}'_C \quad (2.31)$$

Cu ajutorul punctelor determinate cu relația (2.30) și (2.31) se trasează o curbă de variație a aberației cromatice cu apertura (fig.2.16).

Având în vedere faptul că aberația cromatică este influențată de înălțimea de incidență, variația sa poate fi privită ca o aberație sferică în dependență de lungimea de undă. Cele două aberații, sferică și cromatică se analizează de obicei împreună, cu denumirea de *sferocromatism*. Curbele care definesc sferocromatismul au expresiile:

$$ds'_e = \tilde{s}'_e - s'_e \quad (2.32)$$

$$ds'_F = \tilde{s}'_F - s'_e \quad (2.33)$$

$$ds'_{C'} = \tilde{s}'_{C'} - s'_e \quad (2.34)$$

și au ca variabilă independentă înălțimea de incidență h (fig.2.17.a). Curbele exprimă o *variație cromatică a aberației sferice*.

O altă formă a sferocromatismului este exprimarea aberației cromatice pentru anumite aperturi precizate (în general, înălțimea maximă de incidență, zona și paraxialul) având ca variabilă independentă lungimea de undă (fig.2.17.b).

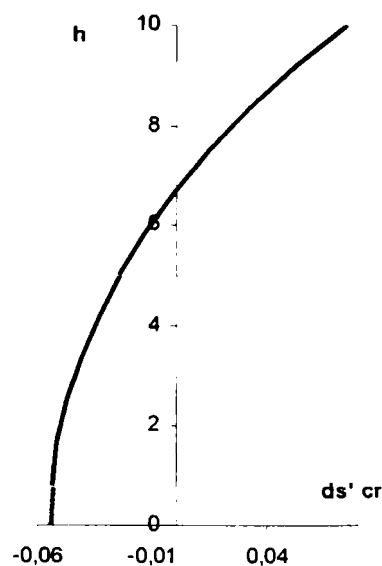


Fig.2.16. Variația aberației cromatice cu apertura

Figurile 2.16 și 2.17 sunt ilustrative pentru alurile posibile ale curbelor de variație a aberațiilor, dar nu pun în discuție, în această fază, un sistem optic anume.

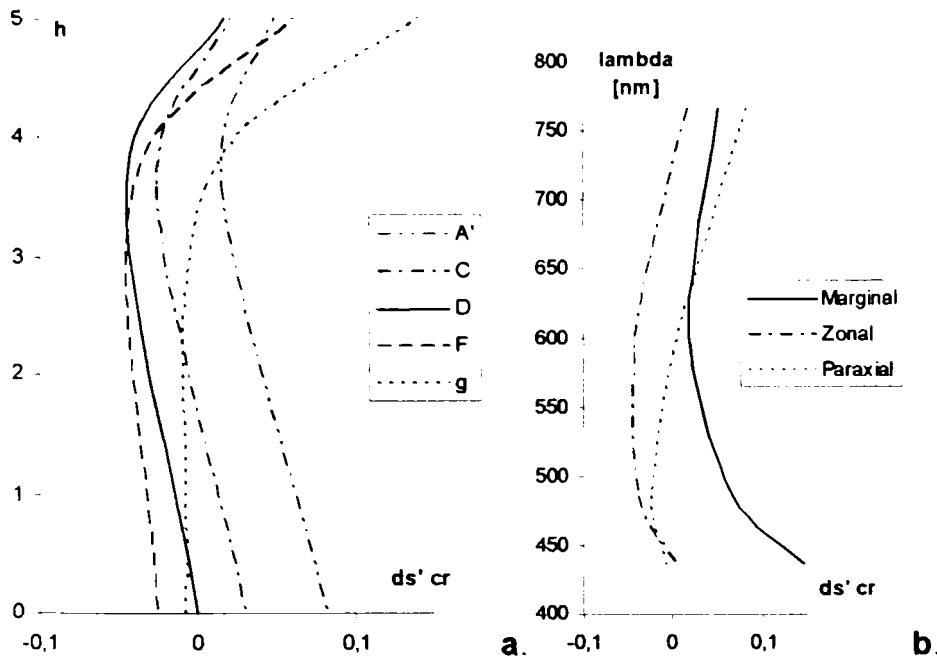


Fig.2.17. Sferocromatismul caracterizat prin variația cromatică a aberației sferice (a), respectiv prin variația aberației cromatice funcție de lungimea de undă la diverse aperturi

Curbele (2.33) și (2.34) au un punct de intersecție care semnifică egalitatea absciselor imagine pentru radiațiile albastră și roșie la o anumită înălțime de incidență. Faptul că pentru celelalte lungimi de undă abscisele imagine nu se suprapun este interpretat ca o formă a aberației cromatice care poartă numele de *spectru secundar*. Considerând ca referință abscisa imagine comună roșu-albastru, spectrul secundar se definește numeric ca diferență între abscisele imagine pentru oricare altă lungime de undă și abscisa de referință, la înălțimea de incidență pentru care este realizată acromatizarea.

Spectrul secundar poate fi apreciat pe baza curbelor care caracterizează sferocromatismul. Un policromat ideal, la care abscisele imagine se suprapun pentru toate lungimile de undă și, ca urmare, este lipsit total de spectru secundar, prezintă curbele din figura 2.17.b ca drepte verticale.

Se definesc și forme transversale de exprimare a aberației cromatice, prin diferența dintre înălțimile imaginilor paraxiale, respectiv extraaxiale pentru liniile albastră și roșie:

$$dy'_{cr} = y'_F - y'_{C'} = ds'_{cr} \sigma', \quad (2.35)$$

$$d\tilde{y}'_{cr} = \tilde{y}'_F - \tilde{y}'_{C'} \operatorname{tg} \tilde{\sigma}'. \quad (2.36)$$

unde σ' și $\tilde{\sigma}'$ reprezintă unghiul dintre axa optică și raza emergentă paraxială, respectiv extraaxială pentru linia de referință de la mijlocul spectrului.

Toate expresiile aberației sferice descrise anterior se bazează pe date obținute prin trasări paraxiale și trigonometrice ale razelor obiective.

Dacă se trasează raza pupilară principală se pot obține încă doi indicatori transversali de

caracterizare a cromatismului: *aberația cromatică laterală paraxială*:

$$dy'_{crp} = y'_{pF} - y'_{pC}, \quad (2.37)$$

respectiv *aberația cromatică laterală extraaxială*:

$$d\tilde{y}'_{crp} = \tilde{y}'_{pF} - \tilde{y}'_{pC}. \quad (2.38)$$

Toleranțele pentru aberația cromatică după criteriul Rayleigh $\lambda/4$ sunt de forma:

$$d\tilde{s}'_{cr} = \pm \frac{\lambda}{n' \sin^2 \tilde{\sigma}'}, \quad (2.39)$$

$$d\tilde{y}'_{cr} = \pm \frac{\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'}, \quad (2.40)$$

$$d\tilde{y}'_{crp} = \pm \frac{0.5\lambda}{n' \sin \tilde{\sigma}'}. \quad (2.41)$$

Aceste toleranțe sunt mai puțin semnificative decât în cazul aberațiilor geometrice monocromatice. Încadrarea în intervalele prescrise indică respectarea criteriului pentru liniile extreme ale spectrului vizibil, pentru lungimile de undă intermediare diferența de drum optic fiind mai mică sau mult mai mică decât $\lambda/4$. Având în vedere sensibilitatea spectrală a ochiului, cu maxim la mijlocul spectrului, în aplicațiile curente se poate admite o majorare a valorilor date de relațiile (2.39-2.41) cu un factor de [1.8...2.5].

2.2.6. Interpretarea aberațiilor ca parametri de calitate a imaginii

Aberațiile, ca măsură a erorilor geometrice și cromatice de formare a imaginilor, pot fi controlate în procesul de proiectare prin forma dioptrilor, poziția diaframelor și sorturile de sticlă. Metodele de sinteză a componentelor și subansamblurilor optice operează cu aceste variabile, funcție de care se impun condiții de minimizare a aberațiilor. Cel mai general principiu de sinteză indică asocierea lentilelor convergente, care au aberații geometrice și cromatice subcorectate sau negative cu lentile divergente, caracterizate prin aberații supracorectate sau pozitive, în scopul compensării reciproce a aberațiilor. În cazul cromatismului, fiind importante și caracteristicile dispersive ale materialelor optice, se urmărește asocierea rațională din acest punct de vedere a sorturilor de sticlă.

Indiferent care ar fi metoda de sinteză aplicată, se obține anularea aberațiilor vizate pentru un număr limitat de puncte de apertură, în general unul singur. Pentru celelalte puncte ale câmpului se înregistrează aberații numite *reziduale*, a căror prezență deși este nedorită, este acceptabilă pentru că valorile aberațiilor reziduale sunt mult mai reduse decât ale unei componente echivalente ca putere, dar neproiectată pe principii care vizează aberațiile.

Studiul aberațiilor reziduale funcție de apertură, de unghiul de câmp obiect sau imagine, de înălțimea imaginii în planul paraxial – după cum aberația analizată depinde semnificativ de una dintre aceste variabile - face obiectul analizei calității imaginii din punct de vedere

aberațional.

Analiza se aplică asupra unor forme grafice, reprezentând variații ale aberațiilor. Se interpretează atât forma, cât și valorile numerice ale extremelor locale ale curbelor.

Formulele axiale de exprimare a aberațiilor se utilizează pentru aberația sferică și cromatică sau, în formă combinată - sferocromatism. Se trasează curba $ds'(h)$, care pentru majoritatea sistemelor optic corect proiectate are forma din figura 2.18.

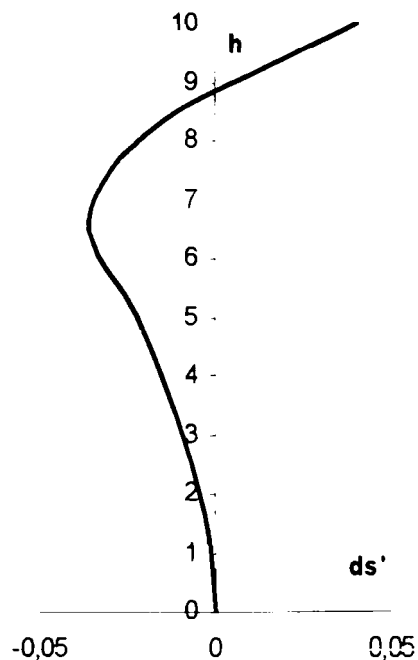


Fig.2.18. Forma specifică variației aberației sferice longitudinale reprezentate funcție de înălțimea de incidență

Aberația se anulează pentru două puncte: pe axă și la o înălțime din apropierea aperturii maxime. Sub această înălțime sistemul este subcorectat, iar deasupra sa este supracorectat. Valoarea maximă a aberației reziduale se înregistrează în apropierea zonei, la aproximativ $0.707h_{\max}$.

Aberația cromatică longitudinală este caracterizată prin curbele din figurile 2.16 și 2.17.a și b, ultimele două având o semnificație mai cuprinzătoare, prin furnizarea unor informații despre sferocromatism și spectrul secundar. Pentru caracterizarea acestuia se mai poate trasa și o variație a focarului (sau abscisei imagine) în raport cu lungimea de undă. În figura 2.19 se prezintă un exemplu de astfel de reprezentare, din care rezultă că sistemul analizat este un acromat pentru care s-a obținut un focar comun $F'-C'$. Diferențele măsurate pe direcția abscisei pentru celelalte puncte ale curbei, în raport cu focarul comun reprezintă spectrul secundar.

Pentru celelalte aberații geometrice – coma, astigmatismul și distorsiunea – care depind mai ales de unghiul de câmp se preferă analiza aberațiilor transversale. Se trasează curbe caracteristice, care descriu intersecția razelor unui fascicul înclinat cu planul imagine, în

funcție de panta razelor emergente.

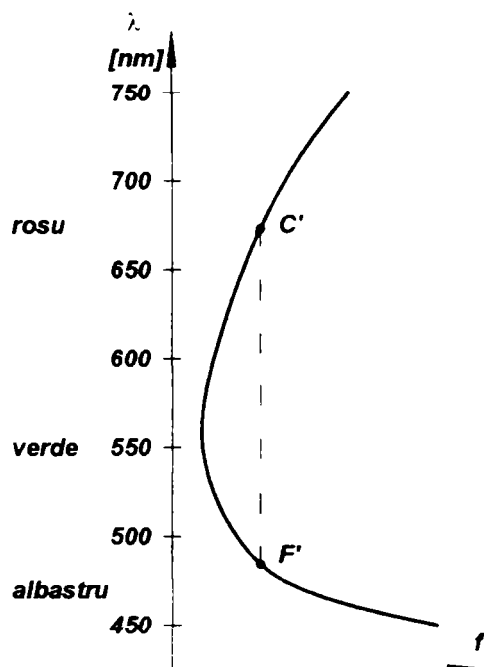


Fig. 2.19. Variația distanței focale imagine caracteristică sistemelor acromate, cu spectru secundar maxim în zona verde-galben

Aceste curbe de interceptare a razelor (curbe laterale sau tangențiale) descriu numeric difuzia sau neclaritatea în planul imagine și, calitativ, semnalează prezența sau absența tipurilor de aberații.

Trasarea curbelor de interceptare a razelor respectă două convenții: se construiesc pentru imagini cu înălțimi pozitive (deasupra axei optice), respectiv raza marginală determină punctul de pe curbă din extrema sa dreaptă. Aceste convenții permit recunoașterea imediată a semnului aberațiilor care afectează sistemul analizat. De exemplu, aberația sferică subcorectată determină curbe de interceptare cu ordonate negative în dreapta axei și pozitive la stânga acesteia. În figurile 2.20-2.23 sunt prezentate câteva curbe tipice pentru aberația sferică, coma și curbura astigmatică tangențială de câmp.

Aberația de undă, respectiv diferența de drum optic OPD poate fi dedusă din curbele de interceptare a razelor. OPD între două raze ale fasciculului analizat este egală numeric cu aria de sub curbă, cuprinsă între verticalele care trec prin abscisele corespunzătoare lor. Din punct de vedere matematic OPD este integrala funcției $\tilde{y}'(\text{tg}\tilde{\sigma}')$, în timp ce defocusarea este prima ei derivată.

Curbelor de tipul celor prezentate în figura 2.20 și trasate pentru lungimea de undă de referință, li se pot asocia cele corespunzătoare, trasate pentru lungimile de undă de la marginea domeniului spectral de interes (fig.2.21).

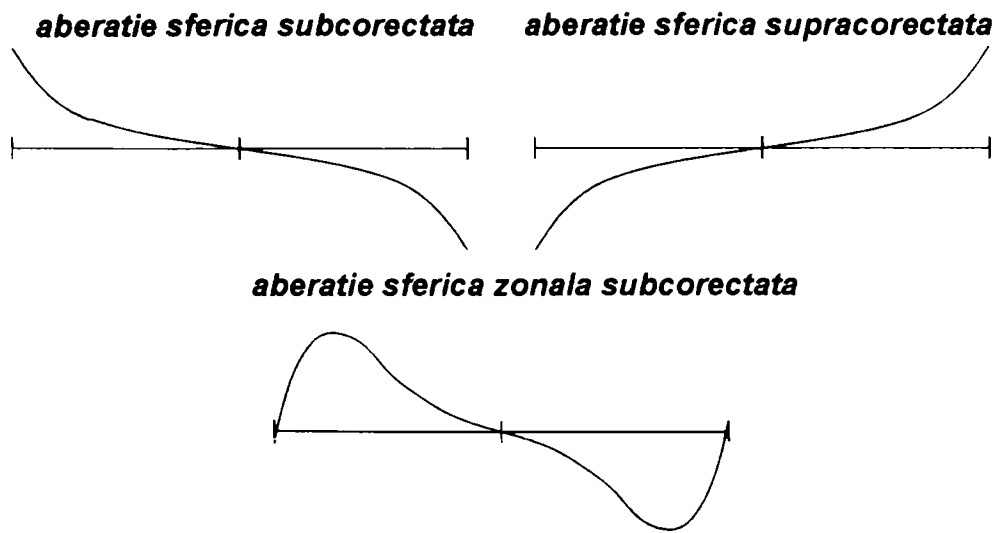


Fig.2.20. Curbe tangențiale indicând semnul și mărimea aberației sferice

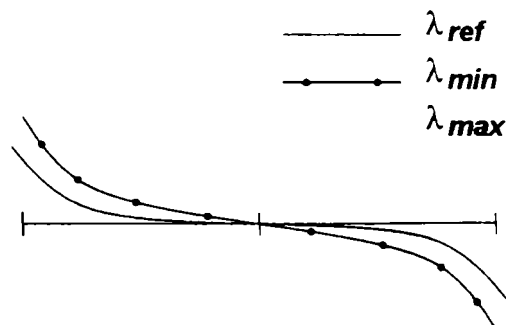


Fig.2.21. Curbe tangențiale indicând mărimea aberației cromatice axiale

Aberația cromatică paraxială axială, ca expresie a variației focarului sau abscisei imagine funcție de lungimea de undă, este reflectată în figura 2.21 prin diferența pantelor curbelor în origine. Corectarea aberației cromatice axiale primare determină suprapunerea curbelor corespunzătoare lungimilor de undă extreme în vecinătatea originii, iar diferența dintre panta lor comună și panta curbei pentru mijlocul spectrului este o măsură a spectrului secundar.

Pentru caracterizarea aberațiilor specifice punctelor extraaxiale, reprezentării meridiane i se alătură o trasare sagitală a razelor. Dacă obiectul se află în plan meridian, reprezentarea sagitală este simetrică față de axa ordonatelor și este suficientă numai trasarea unei jumătăți a câmpului sagital (fig.2.22).

Curba meridiană simbolizată 0.0 corespunde punctului axial al obiectului, pentru care raza pupilară principală coincide cu axa optică. Celelalte două reprezentări meridiane corespund razei pupilare principale pentru puncte extraaxiale aflate la 70% din mărimea câmpului obiect, respectiv pentru deschiderea maximă a acestuia. Se observă că pentru înclinări mari ale razei pupilare principale, lungimea curbelor scade, ceea ce corespunde

vignetării fasciculului, pentru unghiuri mai mari decât cel analizat. Alăturat, se găsesc reprezentările sagitate. La unghiuri mari ale câmpului obiect, analiza se poate extinde pentru mai multe puncte extraaxiale.

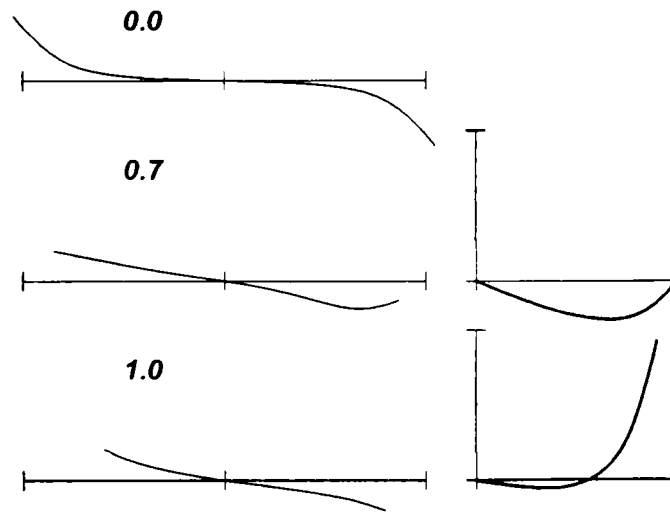


Fig.2.22. Curbe tangențiale trasate pentru puncte extraaxiale

Pentru toate curbele, sunt reprezentate diferențe față de o referință asociată razei pupilare principale.

Diferența pantelor curbelor din plan meridian și sagital semnaleză prezența astigmatismului. În figura 2.22, de exemplu, astigmatismul este prezent și la 0.7 din câmp și la câmpul maxim. Totuși, se observă că diferența pantelor are semne inverse la cele două mărimi ale câmpului, ceea ce indică faptul că, undeva între 0.7 și 1 există un unghi de câmp pentru care aberația este nulă. Semnul pantei din reprezentarea meridiană indică și semnul curburii astigmatice tangențiale (fig.2.23).

Variația pantei fiecărei curbe este un indiciu privind prezența curburii de câmp.

Pentru a pune în evidență și cromatismul extraaxial se adaugă în aceleași sisteme de referință reprezentările corespondente pentru lungimile de undă de la marginile spectrului.

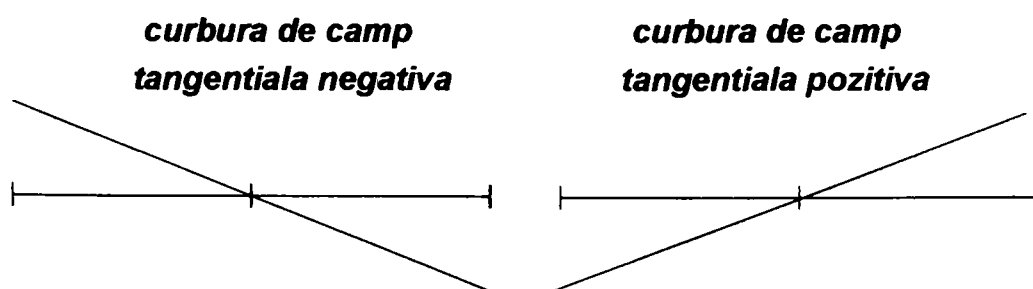


Fig.2.23. Curbe tangențiale indicând semnul și mărimea curburii tangențiale de câmp

Curbele de interceptare a razelor permit evaluarea unor aberații numai pentru un număr limitat de puncte al câmpului obiect. O reprezentare având ca variabilă independentă unghiul de câmp se obișnuiește în cazul aberațiilor care depind mai ales de acest parametru și anume distorsiunea, curbura de câmp și cromatismul de mărire. Unghiul de câmp este marcat pe ordonată, în timp ce valoarea aberației corepunde abscisei de pe grafic. În figurile 2.24-2.26 sunt exemple de astfel de curbe.

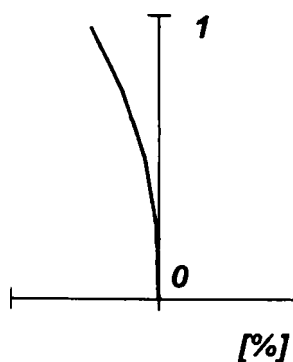


Fig. 2.24. *Reprezentarea distorsiunii procentuale în raport cu unghiul de câmp*

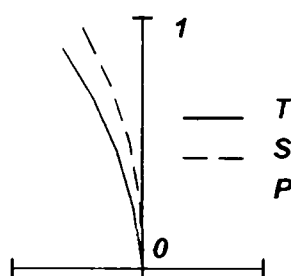


Fig. 2.25. *Reprezentarea curburilor de câmp astigmatice și a suprafeței Petzval funcție de unghiul de câmp*

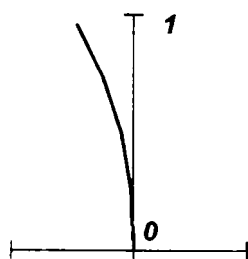


Fig. 2.26. *Reprezentarea cromatismului de mărire (diferența între mărimea imaginii determinate de raza pupilară principală pentru liniile spectrale extreme) funcție de unghiul de câmp*

2.2.7. Criterii de evaluare a calității imaginii bazate pe OPD

Diferența de drum optic OPD, definită ca distanță între frontul de undă real și cel sferic de referință și măsurată în lungimi de undă, reprezintă o măsură a aberației de undă în cazul fronturilor de undă netede, cu geometrie monotonă, fără neregularități locale. Pentru fronturi de undă puternic deformate local, o mai bună măsură a erorilor este *rădăcina medie pătratică a OPD*, determinată pe întreaga apertură. Între OPD și rădăcina medie pătratică a OPD (simbolizată *RMS OPD*), pentru fronturi de undă reale netede există relația aproximativă:

$$\text{RMS OPD} = \frac{\text{OPD}}{3.5} \quad (2.42)$$

Pentru fronturi de undă reale neregulate, așa cum rezultă în cazul componentelor cu erori de fabricație, numitorul relației (2.42) este mai mare, cu valori cuprinse între 4 și 5, astfel încât criteriul Rayleigh $\lambda/4$ aplicat RMS OPD corespunde unei diferențe de drum admise de $\lambda/14 \dots \lambda/20$.

Un alt criteriu de apreciere a calității imaginii referitor la distribuția energiei în pata de difuzie imagine este *Raportul Strehl*, care reprezintă iluminarea discului Airy pentru sistemul optic cu aberații, exprimată ca fracțiune din iluminarea corespunzătoare unui sistem optic perfect.

Un Raport Strehl de 80% este echivalent cu OPD $\lambda/4$. În general se poate scrie relația de corespondență:

$$\text{Raport Strehl} = e^{-(2\pi\omega)^2}, \quad (2.43)$$

unde $\omega = \text{RMS OPD}$, exprimat în lungimi de undă.

Tabelul 2.2 prezintă relațiile între criteriile de calitate a imaginii bazate pe OPD. CU notația RL s-a simbolizat criteriul Rayleigh.

Tabelul 2.2

OPD	RMS OPD	Raport Strehl	Energie [%]	
			Disc Airy	Inele
0.0	0.0	1.00	84	16
0.25 RL= $\lambda/16$	0.018 λ	0.99	83	17
0.5 RL= $\lambda/8$	0.036 λ	0.95	80	20
1.0 RL= $\lambda/4$	0.07 λ	0.80	68	32
2.0 RL= $\lambda/2$	0.14 λ	0.40	40	60
3.0 RL=0.75 λ	0.21 λ	0.10	20	80
4.0 RL= λ	0.29 λ	0.00	10	90

Valorile mici ale Raportului Strehl nu mai descriu corect calitatea imaginii, astfel încât sunt de preferat alte criterii în aceste cazuri.

2.2.8. Diagrama spot

Diagrama spot reprezintă o metodă geometrică de evaluare a distribuției de energie în planul imagine. Principial, fasciculul incident pe pupila de intrare a unui sistem optic este discretizat printr-un număr mare de raze, ale căror puncte de incidență sunt uniform distribuite pe suprafața pupilei. Fiecărei raze îi corespunde o mică arie din suprafața pupilei, iluminarea acesteia fiind egal distribuită pe anile elementare. Trasând razele prin sistemul optic și intersectând fasciculul emergent cu planul imagine se obține o figură plană alcătuită din puncte corepunzătoare razelor. Împrăștierea punctelor semnalează prezența aberațiilor sistemului analizat și este invers proporțională cu iluminarea zonei pe care o ocupă. Punctele echidistante de pe suprafața pupilei de intrare se vor găsi în planul imaginii cu o densitate de suprafață diferită și variabilă, care indică de fapt distribuția energiei în imaginea punctului.

Trasarea razelor din conul luminos incident se realizează cu ajutorul drumului vectoriale, care permite modelarea matematică tridimensională a razelor.

Diagrama spot, în general, reprezintă un indicator sintetic și sugestiv al aberațiilor sistemului analizat. Fără a parcurge calculul analitic laborios și defalcat pe fiecare tip de aberație, trasarea diagramei spot permite o evaluare imediată a prezenței aberațiilor care conduc la forme caracteristice ale petei de răspândire a punctelor imagine. Astfel, aberația sferică este indicată printr-o pată circulară, cu diametru mare și densitate de puncte descrescătoare de la centru spre periferie; coma determină o formă asimetrică, specifică aberației, cu evidențierea nucleului și cozii cometei prin densitate mare, respectiv redusă a punctelor; astigmatismul introduce asimetrie în raport cu axa y a petei imagine. Aceste aspecte conferă diagramei spot un caracter de indicator prin excelență calitativ. Totuși, prin prelucrări ulterioare, diagrama spot poate fi utilizată pentru determinarea unor indicatori difracționali de calitate a imaginii, derivați din teoria opticii Fourier, care definește conceptele și demonstrează relațiile caracteristice funcției optice de transfer.

2.3. METODE DE ANALIZĂ A CALITĂȚII IMAGINII

2.3.1. Generalități

Analiza calității imaginii include toate procedurile necesare determinării caracteristicilor de referință ale sistemului și indicatorilor de calitate a imaginii. În funcție de modelarea matematică a sistemului optic, metodele de analiză utilizează algoritmi specifici și furnizează elemente de caracterizare de natură foarte diversă. În tabelul 2.3 este prezentată, în formă sintetică, o clasificare a metodelor de analiză, a tipului de model matematic pe care se bazează algoritmul de calcul și parametrii caracteristici rezultați.

Tabelul 2.3

Metoda	Model matematic generator al algoritmului	Parametrii caracteristici sistemului optic
Trasarea paraxială meridiană a razelor	Optica de ordinul I (gaussiană), caracteristică sistemelor optice ideale	Caracteristicile de referință ale sistemelor optice: -distanța focală imagine și obiect (puterea optică) -distanța frontifocală imagine și obiect -abscisele planelor principale și nodale -măririle obiective ale sistemului (transversală, unghiulară și axială) -abscisa imagine de referință (pentru obiecte situate la distanță finită)
Trasarea extraaxială (meridiană și sagitală) și vectorială a razelor	Optica geometrică (și geometria analitică)	Caracteristicile reale ale imaginii formate de sistemele optice: -abscisa imagine reală tangențială și sagitală -aberațiile geometrice (sferică axială și transversală, coma, curbunile astigmatice de câmp, distorsiunea) -aberațiile cromatice axială paraxială, extraaxială (longitudinală și transversală – sau laterală) -diagrama spot
Metode grafo-analitice și numerice	Optica ondulatorie și Fourier	-aprecierea globală a sistemului în raport cu atributul de "limitat la difracție" -parametri ondulatorii și bazați pe funcția optică de transfer (aberația de undă, PSF, LSF, MTF, PTF, KED, raportul Strehl, contrast, rezoluție, iluminare) -optimizare având ca țintă sistemul limitat la difracție

2.3.2. Trasarea razelor în domeniul paraxial

Domeniul paraxial conține punctele și razele din vecinătatea axei optice. Relațiile valabile în domeniul paraxial rezultă din ecuațiile de formare a imaginii în domeniul extraaxial, în care funcțiile trigonometrice se dezvoltă în serie MacLaurin și se păstrează termenii până la puterea întâi. Din acest motiv, studiul în paraxial face obiectul *opticii de ordinul întâi*. Legile formării imaginii în paraxial au fost deduse de C.F.Gauss. În acest context, domeniul paraxial se mai numește și *domeniu gaussian sau domeniul lui Gauss*.

În domeniul paraxial, formarea imaginilor are un caracter ideal. Proprietățile imaginilor date de sisteme optice ideale sunt *stigmatismul* (imaginea unui punct obiect oarecare este tot un punct), *planeitatea* (imaginea unui segment obiect perpendicular pe axa optică este un segment de dreaptă perpendicular pe axa optică) și *ortoscopia* (imaginea este asemenea cu obiectul).

Relațiile din paraxial se utilizează pentru definirea punctelor caracteristice ale componentelor și sistemelor optice (focare, puncte principale și antiprinicipale etc.), în calcule primare de gabarit.

Ecuațiile de formare a imaginii și expresiile măririlor dioptrului se bazează pe *invariantul paraxial (invariantul Abbe)* exprimat sub una dintre formele:

$$Q_s \equiv n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right). \quad (2.44)$$

$$A_s \equiv n \left(\frac{h}{r} - \sigma \right) = n' \left(\frac{h}{r} - \sigma' \right) \quad (2.45)$$

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}. \quad (2.46)$$

și invariantul Helmholtz-Lagrange:

$$\frac{ny}{s} = \frac{n'y'}{s'} = L. \quad (2.47)$$

$$ny\sigma = n'y'\sigma' = H. \quad (2.48)$$

Există doi algoritmi de trasare paraxială a razelor. Cel mai simplu, care conține explicit numai abscisele obiect și imagine, rezultă din Invariantul Abbe, exprimat sub forma (2.46).

Funcție de forma particulară a dioptrului, ecuația de formare a imaginii, are una dintre expresiile:

◆ *Suprafață sferică refractantă*

$$s' = \frac{n'}{\frac{n}{s} + \frac{n'-n}{r}}, \quad (2.49)$$

◆ *Suprafață sferică reflectantă*

$$s' = \frac{rs}{2s - r}, \quad (2.50)$$

◆ *Suprafață plană refractantă*

$$s' = \frac{n'}{n} s, \quad (2.51)$$

◆ *Suprafață plană reflectantă*

$$s' = -s. \quad (2.52)$$

Într-un sistem optic centrat, trecerea de la un dioptru la următorul se face cu relația

$$s_+ = s' - d, \quad (2.53)$$

unde s_+ simbolizează abscisa obiect a dioptrului următor, iar d – distanța dintre dioptri.

Pornind de la expresia (2.45.) a invariantului Abbe se poate dezvolta metoda de trasare paraxială a razelor “ $h-\sigma$ ”, care pune în evidență înălțimile de incidență și unghiurile dintre raza incidentă, respectiv emergentă și axa optică:

◆ *Suprafață sferică refractantă*

$$\sigma' = \frac{h}{r} \frac{n'-n}{n'} + \frac{n}{n'} \sigma, \quad (2.54)$$

- ◆ *Suprafață sferică reflectantă*

$$\sigma' = \frac{2h}{r} - \sigma. \quad (2.55)$$

- ◆ *Suprafață plană refractantă*

$$\sigma' = \frac{n}{n'} \sigma, \quad (2.56)$$

- ◆ *Suprafață plană reflectantă*

$$\sigma' = -\sigma. \quad (2.57)$$

Într-un sistem centrat, trecerea la dioptrul următor de face cu ajutorul relațiilor

$$\begin{cases} h_+ = h - d \frac{n'}{n} \sigma' \\ \sigma_+ = \sigma' \end{cases} \quad (2.58)$$

Trasarea paraxială a razelor cu abscise infinite permite determinarea distanțelor focale, principalele caracteristici optice a dioptrilor și respectiv a sistemelor optice.

În cazul general al dioptrului sferic refractant, distanțele focale imagine, respectiv obiect au expresiile:

$$f' = \frac{n'r}{n'-n}. \quad (2.59)$$

$$\bar{f} = -\frac{nr}{n'-n}. \quad (2.60)$$

Cazuri particulare se obțin prin introducerea unor condiții specifice în relațiile (2.59) și (2.60):

- ◆ *Dioptru plan refractant ($r = \infty$):*

$$f' = -\bar{f} = \infty. \quad (2.61)$$

- ◆ *Dioptru sferic reflectant ($n' = -n$):*

$$f' = \bar{f} = \frac{r}{2}. \quad (2.62)$$

- ◆ *Dioptru plan reflectant ($n' = -n, r = \infty$):*

$$f' = \bar{f} = \infty. \quad (2.63)$$

Distanțele focale determină *puterea optică* a dioptrilor, a componentelor sau a sistemelor optice:

$$\Phi = \frac{1}{f'} [\text{dpt.}] \text{ dacă } \langle f' \rangle = [\text{m}]. \quad (2.64)$$

sau
$$\Phi = \frac{1000}{f'} [\text{dpt.}] \text{ dacă } \langle f' \rangle = [\text{mm}] \quad (2.65)$$

În cazul unui sistem centrat, format din k dioptri, distanțele focale imagine și obiect se determină cu relațiile:

$$f' = s_1 \frac{s_2' s_3' \dots s_k'}{s_2 s_3 \dots s_k} = s_1 \prod_{j=2}^k \frac{s_j'}{s_j} \quad \wedge \quad s_1 = \infty. \quad (2.66)$$

$$\bar{f} = \frac{h_1 h_2 \dots h_k}{\sigma_1 h_1 h_{k-1}} = \frac{s_1 \sigma_1 s_2 s_3 \dots s_k}{\sigma_1 s_1 s_2 s_{k-1}} = s_k \prod_{j=1}^{k-1} \frac{s_j}{s_j'} \quad \wedge \quad s_k' = \infty, \quad (2.67)$$

Trasarea paraxială a razelor permite și determinarea măririlor obiective ale dioptrului și, respectiv, sistemelor optice, după cum urmează:

◆ *Mărirea transversală (sau liniară)*

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n s'}{n' s} = -\frac{\bar{f}}{z} = -\frac{z'}{f'}. \quad (2.68)$$

$$\beta = \frac{s_1' s_2' \dots s_k' n_1}{s_1 s_2 \dots s_k n_k} = \frac{n_1}{n_k} \prod_{j=1}^k \frac{s_j'}{s_j}. \quad (2.69)$$

◆ *Mărirea unghiulară*

$$\gamma = \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{s}{s'} = \frac{\bar{f}}{z'} = \frac{z}{f'}. \quad (2.70)$$

$$\gamma = \frac{\sigma_k}{\sigma_1} = \frac{\sigma_1' \sigma_2' \dots \sigma_k'}{\sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_k} = \gamma_1 \gamma_2 \dots \gamma_k = \prod_{j=1}^k \gamma_j = \frac{s_1 s_2 \dots s_k}{s_1' s_2' \dots s_k'} = \prod_{j=1}^k \frac{s_j}{s_j'}. \quad (2.71)$$

◆ *Mărirea longitudinală*

$$\alpha = \frac{dz'}{dz} = -\frac{z'}{z} = \frac{n s'^2}{n' s^2}. \quad (2.72)$$

$$\alpha = \prod_{j=1}^k \alpha_j = \left(\frac{s_1' s_2' \dots s_k'}{s_1 s_2 \dots s_k} \right)^2 \frac{n_1}{n_k} = \frac{n_1}{n_k} \prod_{j=1}^k \left(\frac{s_j'}{s_j} \right)^2 \quad (2.73)$$

Dioptrica de ordinul I poate pune în evidență și punctele și planele cardinale ale sistemelor optice. *Punctele cardinale* (fig.2.27) sunt perechi de puncte conjugate pe axa optică, pentru care măririle au valori unitare:

$$\beta = \pm 1; \quad \gamma = \pm 1. \quad (2.74)$$

Se definesc:

◆ *Puncte și plane principale* (caracterizate prin mărire liniară egală cu +1)

$$-\frac{\bar{f}}{z_H} = +1 \Rightarrow z_H = -\bar{f}, \quad -\frac{z_{H'}}{f'} = +1 \Rightarrow z_{H'} = -f', \quad (2.75)$$

◆ *Puncte și plane antiprinipale* (caracterizate prin mărire liniară egală cu -1)

$$-\frac{\bar{f}}{z_{AH}} = -1 \Rightarrow z_{AH} = \bar{f}, \quad -\frac{z'_{AH'}}{f'} = -1 \Rightarrow z'_{AH'} = f' \quad (2.76)$$

- ◆ *Puncte și plane nodale* (caracterizate prin mărire unghiulară egală cu +1)

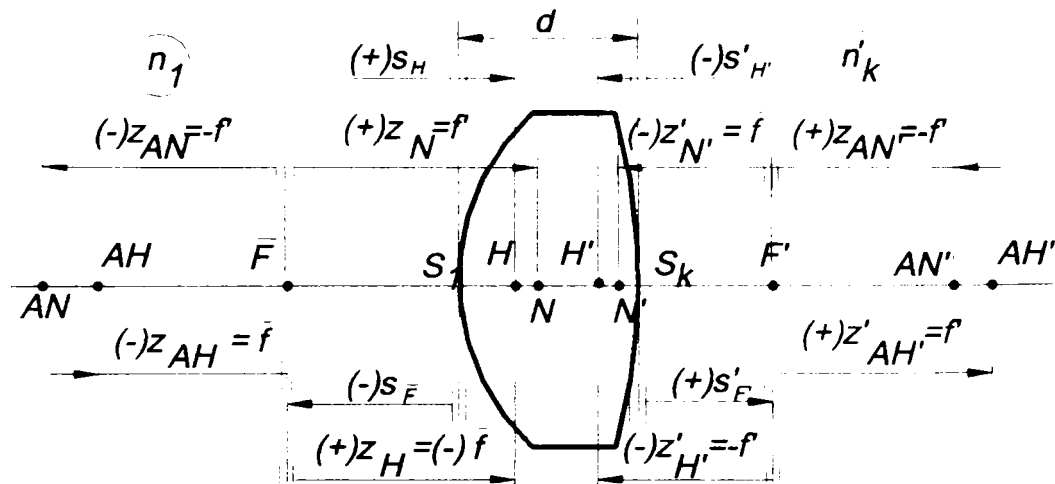


Fig.2.27. Puncte și plane cardinale

$$\frac{\bar{f}}{z_N} = +1 \Rightarrow z_N = \bar{f}, \quad \frac{z_N}{f'} = +1 \Rightarrow z_N = f'. \quad (2.77)$$

- ◆ *Puncte și plane antinodale* (caracterizate prin mărire unghiulară egală cu -1)

$$\frac{\bar{f}}{z_{AN}} = -1 \Rightarrow z_{AN} = -\bar{f}, \quad \frac{z_{AN}}{f'} = -1 \Rightarrow z_{AN} = -f'. \quad (2.78)$$

În cazul particular al sistemelor optice situate în aer, distanțele focale sunt egale în modul, astfel încât punctele nodale se suprapun peste cele principale, iar cele antinodale peste cele antiprinicipale. În figura 2.27 este reprezentat cazul general în care mediul obiect și mediul imagine au indici de refracție diferiți.

Abscisele punctelor, respectiv planelor principale pot fi determinate și în raport cu vârful primului, respectiv ultimului dioptru, după trasarea razelor prin sistem, cu ajutorul relațiilor:

$$s'_H = s'_F - f', \quad (2.79)$$

$$s_H = s_F - \bar{f}. \quad (2.80)$$

2.3.3. Trasarea razelor în domeniul extraaxial

Determinarea coordonatelor reale ale punctelor imagine necesită aplicarea uneia dintre următoarele metode de trasare a razelor:

- ◆ Trasarea razelor în plan meridian (metoda trigonometrică)
- ◆ Trasarea oblică a razelor (ecuațiile Coddington)
- ◆ Trasarea vectorială a razelor.

Trasarea razelor în plan meridian are la bază raționamente geometrice și legea refracției. Elementele implicate în metodă sunt puse în evidență în figura 2.28. Drumuirea se realizează parcurgând patru pași pentru fiecare dioptru:

$$\sin \tilde{\varepsilon} = -\frac{(\tilde{s} - r)\sin \tilde{\sigma}}{r}, \tag{2.82}$$

$$\sin \tilde{\varepsilon}' = \frac{n}{n'} \sin \tilde{\varepsilon}. \tag{2.83}$$

$$\tilde{\sigma}' = \tilde{\sigma} - \tilde{\varepsilon} + \tilde{\varepsilon}'. \tag{2.84}$$

$$\tilde{s}' = r \left(1 - \frac{\sin \tilde{\varepsilon}'}{\sin \tilde{\sigma}'} \right). \tag{2.85}$$

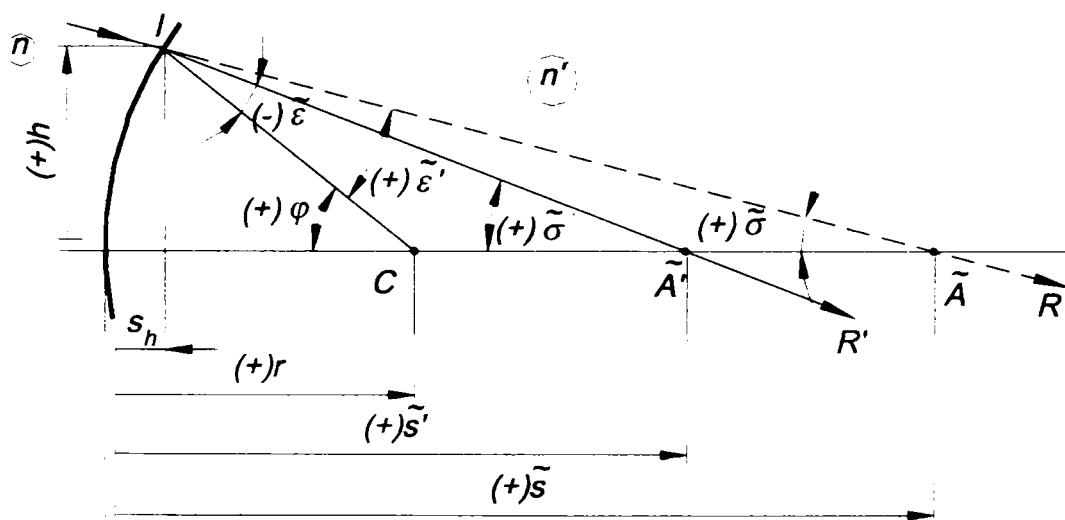


Fig.2.28. Refracția pe un dioptru sferic

Trecerea la dioptrul următor, se face după relațiile care rezultă conform figurii 2.29.

$$\tilde{s}_+ = \tilde{s}' - d, \quad \tilde{\sigma}_{j+1} = \tilde{\sigma}'. \tag{2.86}$$

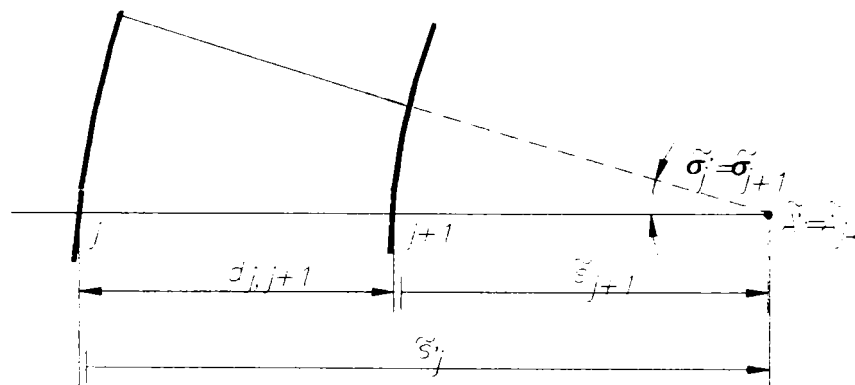


Fig.2.29. Trecerea de la un dioptru la dioptrul următor

Trasarea oblică a razelor în plan tangențial și sagital este echivalentă cu trasarea

paraxială a razelor în cele două plane, având ca referință raza pupilară principală care pornește de la punctul obiect extraaxial și trece prin centrul pupilei de intrare a sistemului optic. Aceste drumuri specifice necesită rezultatele trasării trigonometrice a razei obiective și a razei pupilare principale. Cu ajutorul acestora se aplică ecuațiile Coddington, care, de fapt determină lungimile reale ale razelor în spațiul obiect și imagine în cele două plane, tangențial și sagital, raportate la raza pupilară principală. Rezultatele drumuirii oblice sunt utilizate în scopul determinării curburilor astigmatice de câmp în cele două plane.

Presupunând realizate trasările trigonometrice ale razei obiective și pupilare principale se pot aplica Ecuațiile Coddington după cum urmează:

- ◆ determinarea datelor intermediare necesare drumuirii oblice:

$$\Phi = c(n' \cos \tilde{i}' - n \cos \tilde{i}), \quad (2.87)$$

$$z = \frac{1 - \cos(\tilde{i}' - \tilde{\sigma}_p)}{c_1}, \quad (2.88)$$

$$\tilde{d} = \frac{d - z + z'}{\cos \tilde{\sigma}'}, \quad (2.89)$$

- ◆ determinarea lungimilor razelor tangențiale obiect și imagine în plan tangențial:

$$t = \frac{\tilde{s}_p - z}{\cos \tilde{\sigma}_p}, \quad (2.90)$$

$$\frac{n' \cos^2 \tilde{i}'}{t'} = \frac{n \cos^2 \tilde{i}}{t} + \Phi \Rightarrow t', \quad (2.91)$$

- ◆ determinarea lungimilor razelor tangențiale obiect și imagine în plan sagital:

$$s = \frac{\tilde{s}_p - z}{\cos \tilde{\sigma}_p}, \quad (2.92)$$

$$\frac{n'}{s'} = \frac{n}{s} + \Phi \Rightarrow s'. \quad (2.93)$$

În relațiile anterioare s-au utilizat următoarele notații: Φ - puterea dioptrului, c - curbura ($1/r$), z - abscisa punctului de incidență a razei pe dioptru (în rel. (2.88) pentru primul dioptru), \tilde{d} - lungimea geometrică parcursă de rază între doi dioptri consecutivi între care distanța măsurată pe axa optică este d , t - lungimea razei incidente în plan tangențial, t' - lungimea razei emergente în plan tangențial, s - lungimea razei incidente în plan sagital, s' - lungimea razei emergente în plan sagital.

Trasarea vectorială a razelor permite modelarea matematică tridimensională a oricărei raze din conul luminos care pornește de la un punct obiect.

Principal, fasciculul incident pe pupila de intrare a unui sistem optic este discretizat

printr-un număr mare de raze, ale căror puncte de incidență sunt uniform distribuite pe suprafața pupilei. Fiecărei raze îi corepunde o mică arie din suprafața pupilei, iluminarea acesteia fiind egal distribuită pe anile elementare. Trasând razele prin sistemul optic și intersectând fasciculul emergent cu planul imagine se obține o figură plană alcătuită din puncte corepunzătoare razelor. Împrăștierea punctelor semnalează prezența aberațiilor sistemului analizat și este invers proporțională cu iluminarea zonei pe care o ocupă. Punctele echidistante de pe suprafața pupilei de intrare se vor găsi în planul imaginii cu o densitate de suprafață diferită și variabilă, care indică de fapt distribuția energiei în imaginea punctului.

Discretizarea pupilei de intrare se poate face după un caroiaj ortogonal (fig.2.30.a) sau polar (fig.2.30.b), în nodurile cărui sunt incidente razele obiective.

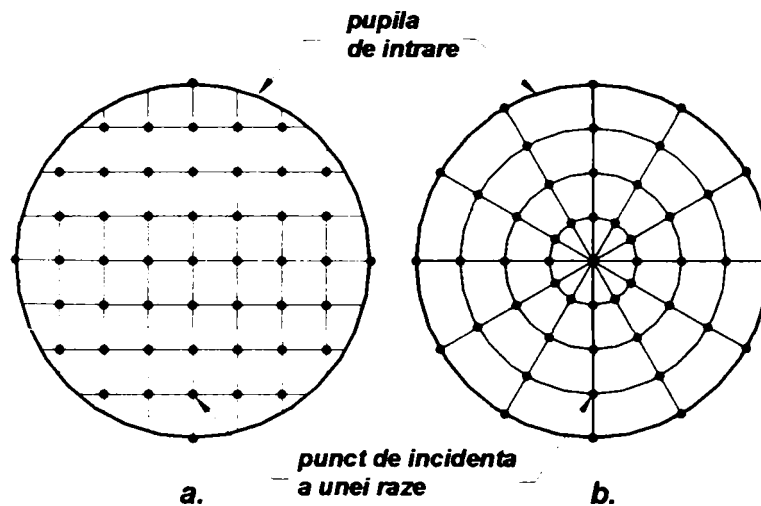


Fig.2.30. Discretizare ortogonală (a) și polară (b) a pupilei de intrare

Se consideră un punct oarecare în spațiul obiect $A(x_A, y_A, z_A)$ de la care pornește o rază spre punctul $P(x_P, y_P, z_P)$ din planul pupilei de intrare (fig.2.31).

Pentru trasarea vectorială a razei se parcurg etapele indicate în tabelul 2.4.

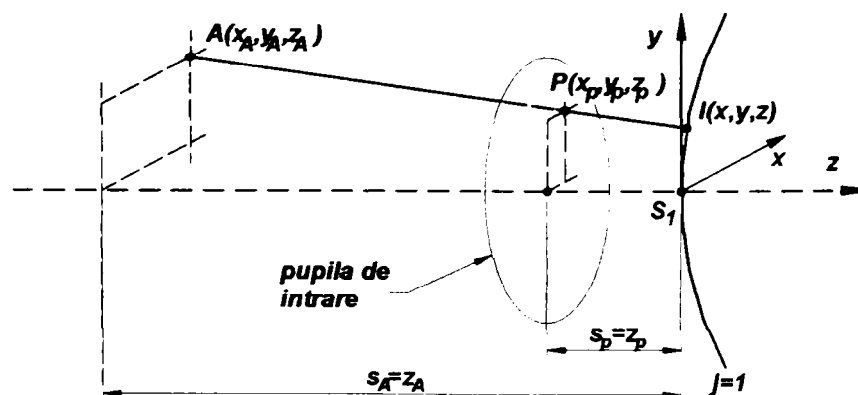
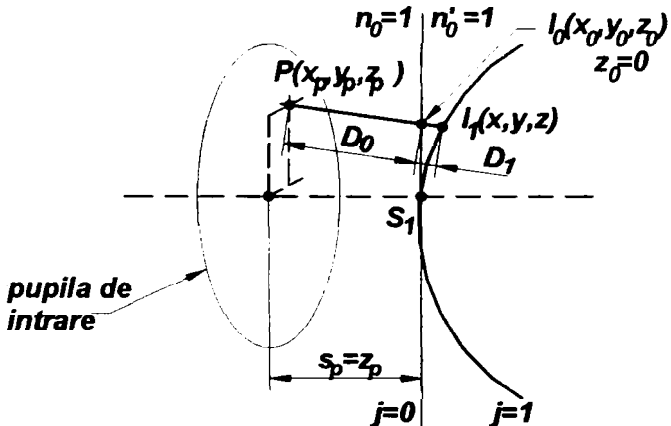


Fig.2.31. Raza incidentă pornită din punctul obiect A , traversând pupila de intrare prin punctul P

Tabelul 2.4

Mărimi	Relația
Ecuatii de deschidere a drumuirii (fig.2.31)	
Lungimea razei între punctul obiect și punctul din planul pupilei de intrare	$L = \sqrt{(x_A - x_p)^2 + (y_A - y_p)^2 + (z_A - z_p)^2}$ pentru $s_A = -\infty$ L nu se calculează
Cosinuzii directori ai razei incidente	$\cos \alpha = \frac{x_p - x_A}{L}; \cos \beta = \frac{y_p - y_A}{L}; \cos \gamma = \frac{z_p - z_A}{L}$ pentru $s_A = -\infty$ $\cos \alpha = 0, \cos \beta = -\sin \sigma_p, \cos \gamma = \cos \sigma_p$ unde σ_p este unghiul dintre raza pupilară principală și axa optică
Lungimea razei incidente între punctul obiect și punctul de incidență pe primul dioptru	$D_1 = r_1 \left(F \pm \sqrt{F^2 - \frac{G}{r_1}} \right), \text{ unde } F = \cos \gamma - \frac{\cos \gamma (z_A - z_p) + \cos \beta y_A + \cos \alpha x_A}{r_1}$ $G = \frac{(z_A - z_p)^2 + y_A^2 + z_A^2}{r_1} - 2(z_A - z_p).$ Ecuția are două soluții. Convine soluția pozitivă sau cea mai mică dacă ambele sunt pozitive. Pentru $r_1 = \infty$ $D_1 = (z_1 - z_A) / \cos \gamma$. Pentru $s_A = -\infty$ se introduce un dioptru de calcul plan tangent la primul dioptru al sistemului, pe care practic nu are loc refracție ($n_0 = n_0' = 1$), dar care servește la determinarea coordonatelor celui de-al doilea punct necesar pentru calculul lungimii D_1 (fig.2.32)
 <p>Fig.2.32. Introducerea unui plan de calcul tangent la primul dioptru pentru distanță obiect infinită</p>	
Coordonatele punctului de incidență pe primul dioptru	$x_1 = D_1 \cos \alpha + x_A; y_1 = D_1 \cos \beta + y_A; z_1 = D_1 \cos \gamma + z_A - z_p$
Ecuțiile drumuirii pe dioptrii sistemului	
Unghiul de incidență	$\cos i = F - \frac{D}{r}; \text{ pentru } r = \infty \cos i = \cos \gamma$
Unghiul de emergență	$\cos r = \sqrt{1 - \left(\frac{n}{n'}\right)^2 (1 - \cos^2 i)}$

<p>Cosinușii directori ai razei emergente</p>	$\cos' \alpha = \frac{1}{n'} \left(n \cos \alpha - x \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \right), \cos' \beta = \frac{1}{n'} \left(n \cos \beta - y \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \right),$ $\cos' \gamma = \frac{1}{n'} \left(n \cos \gamma - (z - r) \frac{n' \cos i' - n \cos i}{r} \right),$ <p>unde x, y și z sunt coordonatele punctului de incidență pe dioptrul de rază r ;</p> <p>pentru $r = \infty$ $\cos' \alpha = \frac{n}{n'} \cos \alpha, \cos' \beta = \frac{n}{n'} \cos \beta, \cos' \gamma = \cos i'$.</p>
---	--

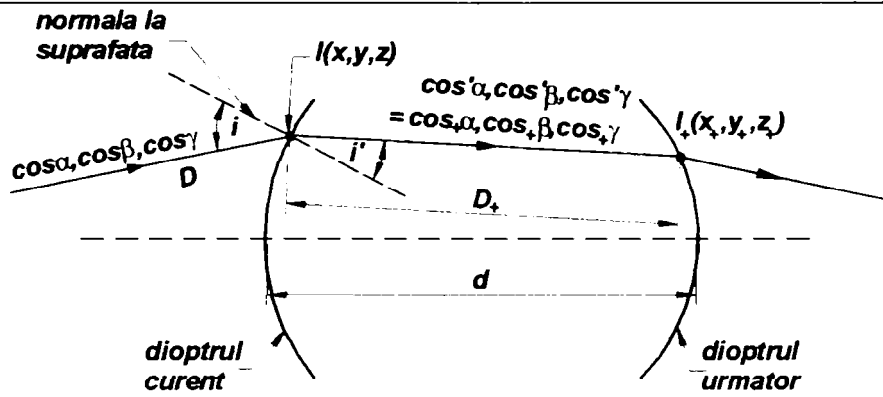


Fig.2.33. Elementele caracteristice dioptrelor curente și transferul la dioptrul următor

Transferul la dioptrul următor (fig.2.33)

<p>Cosinușii directori ai razei incidente</p>	$\cos \alpha_+ = \cos' \alpha, \cos \beta_+ = \cos' \beta, \cos \gamma_+ = \cos' \gamma.$
<p>Lungimea razei între dioptri</p>	$D_+ = r \left(F \pm \sqrt{F^2 - \frac{G}{r}} \right),$ <p>unde $F = \cos \gamma - \frac{\cos \gamma (z - d) + \cos \beta y + \cos \alpha x}{r}$</p> $G = \frac{(z - d)^2 + y^2 + z^2}{r} - 2(z - d),$ <p>unde d este distanța dintre dioptri</p> <p>Ecuția are două soluții. Convine soluția pozitivă sau cea mai mică dacă ambele sunt pozitive ; pentru $r = \infty$ $D_+ = (d - z) / \cos \gamma$</p>
<p>Coordonatele punctului de incidență pe dioptrul următor</p>	$x_+ = D_+ \cos \alpha_+ + x; y_+ = D_+ \cos \beta_+ + y; z_+ = D_+ \cos \gamma_+ + z - d$

Ecuțiile de închidere a drumurii

Se introduce planul imagine la abscisa s' paraxială, față de care se calculează lungimea razei D .

Drumuirea vectorială este utilizată pentru obținerea diagramei spot, care reprezintă un criteriu în sine de evaluare a calității imaginii sau poate fi prelucrată pentru calculul geometric al funcției de transfer de modulație.

2.3.4. Metode de analiză bazate pe optica ondulatorie și Fourier

Introducerea pe scară largă a calculului automat a permis utilizarea curentă a parametrilor ondulatorii de calitate a imaginii derivați din funcția optică de transfer, ale cărei baze teoretice existau încă din prima jumătate a secolului trecut.

Funcția optică de transfer descrie capacitatea unui sistem optic de a transfera distribuția

spațială a luminii din planul obiect în planul imagine.

Conceptul de funcție optică de transfer a apărut prin analogie cu funcția de transfer a sistemelor electronice, pentru care exista suportul matematic teoretic de descriere a răspunsului sistemului la acțiunea unui semnal de intrare impuls sau de formă sinusoidală. Prin analogie, sistemul optic răspunde la un impuls dreptunghiular - care modelează un obiect luminos punctiform - printr-o funcție de transfer numită *funcția imagine a punctului* sau *PSF* (point spread function) – sau la un semnal constituit de diverse frecvențe spațiale care pot fi asociate obiectelor luminoase extinse. În cazul acestora, sistemul optic se comportă ca un filtru spațial care permite transmiterea unor frecvențe anumite (detalii ale obiectului) în imagine, în timp ce restul frecvențelor vor fi tăiate de sistem.

Funcția optică de transfer, descrie, principial, efectele de difracție ale sistemului optic asupra frontului de undă incident. Analiza difracțională are sens pentru fronturi de undă care nu sunt puternic deformate din cauza aberațiilor geometrice și, cel puțin teoretic, este aplicată numai *sistemelor optice limitate la difracție*. Prin sistem optic limitat la difracție se înțelege un sistem optic care transformă o undă sferică provenită de la o sursă obiect punctiformă tot într-o undă sferică centrată într-un punct imagine. Sistemele optice reale prezintă într-o măsură mai mare sau mai mică întotdeauna aberații, ceea ce înseamnă că pot primi atributul de limitat la difracție doar cu oarecare aproximație și, eventual, pe zone limitate ale câmpului obiect.

Analiza energetică a imaginii pune în evidență faptul că o importanță deosebită pentru caracteristicile acesteia o are și modul de iluminare a obiectului, care impune tratări matematice diferite ale problemelor. În principiu, omițând aspectul spectral, se pot identifica două moduri de iluminare a obiectelor: *spațial incoerentă* și *spațial coerentă*. Iluminarea spațial incoerentă caracterizează sursele extinse, la care oscilațiile provenite de la diversele puncte componente ale sursei au faze decalate aleator, statistic. Intensitatea luminoasă în planul imagine rezultă în fiecare punct prin însumarea intensităților provenite de la punctele sursei. Admițând acest principiu, sistemele optice iluminate incoerent sunt *liniare în intensitate*.

Iluminarea spațial coerentă (eventual o sursă laser) asigură în toate zonele obiectului oscilații luminoase cu diferențe de fază constante în timp. În acest caz se admite că în planul imagine se însumează amplitudinile oscilațiilor luminoase, sistemele fiind considerate *liniare în amplitudine*.

În principiu, în cazul *sistemelor optice liniare* – care la acțiunea unor stimuli simultani dă un răspuns egal cu suma răspunsurilor independente determinate de fiecare stimul – efectul componentelor optice și al diafragmenilor poate fi descris complet determinând imaginile surselor punctiforme care alcătuiesc câmpul obiect. Fiecărui punct i se asociază ca modelare

matematică o funcție Dirac ($\delta(x,y) = \infty$, pentru $x = y = 0$ și $\delta(x,y)=0$ pentru $\forall x,y \neq 0$), care are semnificația unui semnal foarte puternic și foarte îngust.

Funcția de răspuns a sistemului optic la un semnal Dirac se numește *funcție imagine a punctului* (PSF – point spread function [mm^{-2}]) și descrie *distribuția normalizată a iluminării în imaginea punctului*.

Obiectului luminos extins i se asociază *funcția obiect* $I_o(x,y)$, care descrie distribuția intensității luminoase în planul obiect, considerat iluminat incoerent, iar imaginii i se asociază *funcția imagine* $I_i(x,y)$, ca expresie a distribuției iluminării în planul imagine. Proprietatea de liniaritate a sistemului permite considerarea distribuției intensității luminoase în planul imagine ca sumă a efectelor fiecărui punct obiect. Răspunsul sistemului optic în cazul obiectelor extinse va depinde deci de funcția obiect și de răspunsul PSF. Din punct de vedere matematic funcția imagine este un *produs de convoluție* a funcției obiect și a PSF.

Transformata Fourier a funcției imagine a obiectului extins, iluminat incoerent, este egală cu produsul transformatelor Fourier ale PSF și funcției obiect. Funcția optică de transfer (OTF – optical transfer function), este prin definiție, transformata Fourier a PSF și reprezintă răspunsul impulsional al sistemului optic.

OTF este o funcție complexă adimensională al cărei modul este unitar pentru frecvența spațială nulă. OTF(r,s) și PSF(x,y) sunt două funcții care formează o pereche Fourier, se pot deduce reciproc, una din cealaltă, leagă spațiul real (x,y) de spațiul Fourier (r,s) și au spectre reciproce.

Modulul funcției optice de transfer se numește *funcție de transfer de modulație, MTF* (modulation transfer function), funcție adimensională și, în cazul particular, dar frecvent, al mirei sinusoidale cu frecvență constantă are semnificația raportului dintre *modulația imaginii* și *modulația obiectului*. Modulația, cu semnificația optică de *contrast* se definește funcție de valorile minimă și maximă ale unei mărimi radiometrice (intensitate, iluminare, strălucire):

$$M = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (2.94)$$

Argumentul funcției optice de transfer se numește *funcție de transfer de fază, PTF* (phase transfer function) - funcție adimensională. PTF are valoarea nulă pentru frecvența spațială zero.

De interes este și *distribuția iluminării în imaginea unei linii, LSF* (line spread function [mm^{-1}]), care are semnificatia distribuției normalizate a iluminării în imaginea unei surse liniare de radiație incoerentă. Din punct de vedere matematic LSF se exprimă ca produs de convoluție a răspunsului impulsional PSF și a unei drepte, aflate în regiunea izoplanatică (pentru aplicarea proprietăților de invarianță).

În practică, analiza Fourier bidimensională și policromatică este arareori utilizată, dat fiind

că rezultate suficient de curpinzătoare se pot obține prin analize unidimensionale repetate pentru diverse orientări ale axei de referință (axa optică, raza pupilară principală la diverse deschideri ale câmpului obiect) și pentru câteva lungimi de undă monocromatice (de obicei, cele trei de referință, de la extremitățile și mijlocul spectrului de interes).

Ca urmare, majoritatea softurilor dedicate analizei sistemelor optice vor pune la dispoziția utilizatorului, sub formă numerică și grafică, funcția de transfer de modulație și de fază funcție de o frecvență spațială relativă la o singură direcție, precizată de utilizator, eventual un set de curbe, care să caracterizeze planul tangențial și sagital, în raport cu axa de referință impusă.

Un alt motiv pentru care relațiile generale deduse din optica ondulatorie și Fourier nu pot fi direct aplicate este acela că descrierea obiectului printr-o funcție analitică privind distribuția energetică spectrală este imposibil de scris, cu excepția unor obiecte de formă foarte simplă. Acest lucru, însă, nu reprezintă un impediment și chiar ar constitui un efort inutil, având în vedere faptul că funcția optică de transfer este o caracteristică a sistemului optic, independentă de forma, culoarea și contrastul obiectului și pentru a determina componentele sale (modulația și diferența de fază) poate fi utilizat, de fapt, orice fel de obiect. Standardele prevăd funcții obiect sinusoidale.

În tabelul 2.5 sunt redați sintetic parametri de calitate a imaginii obținuți din analiza difracțională și semnificația lor.

Tabelul 2.5

<i>Parametru difracțional</i>	<i>Caracteristici descrise din planul imagine</i>
MTF	Rezoluția, cu precizarea frecvenței de tăiere Iluminarea globală a imaginii
PTF	Contrastul (inversări de contrast), distorsiuni ale imaginii
PSF	Distribuția iluminării în imaginea punctului, strălucirea și claritatea imaginii extinse

PSF este o caracteristică numerică normată a fiecărui sistem optic. Valoric, PSF este egal cu raportul Strehl, care mai poate fi definit și în raport cu MTF :

$$\text{Strehl} = \frac{\iint \text{MTF}_{\text{sistem real}}}{\iint \text{MTF}_{\text{sistem limitat la difracție}}}, \quad (2.95)$$

Expresia (2.95) corespunde, de fapt, raportului dintre aria de sub curba MTF a sistemului cu aberații și aria de sub curba MTF a aceluiași sistem perfect. Dacă sistemul real este caracterizat printr-o aberație de undă OPD, se pot utiliza relațiile aproximative de legătură :

$$\text{Strehl} = e^{-(2\pi \text{RMS OPD})^2} \cong 1 - (2\pi \text{RMS OPD})^2, \quad (2.96)$$

unde RMS OPD este exprimat în lungimi de undă.

MTF și PTF se analizează, în general sub formă grafică. Ambii parametri au valorile normate maxime egale cu unitatea și se reprezintă în funcție de frecvența spațială pe o direcție dată (frecvența spațială poate fi normată în raport cu frecvența de tăiere sau rămâne exprimată în perechi de linii/mm).

În figura 2.34 este exemplificată o reprezentare MTF(r). Valoarea maximă a MTF corespunde frecvenței spațiale nule și scade până la zero pentru o frecvență spațială limită, numită de tăiere, care caracterizează capacitatea sistemului de a rezolva detalii, respectiv rezoluția acestuia.

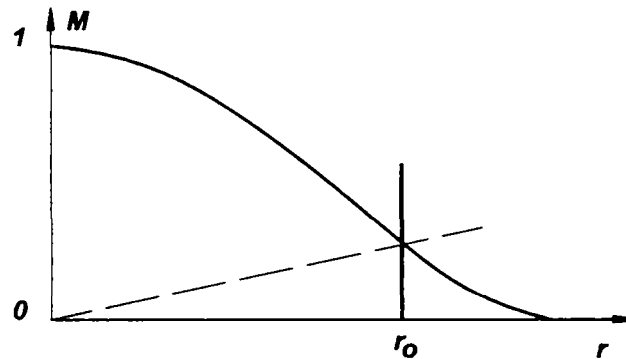


Fig.2.34. Curba de variație a MTF cu frecvența și limita de rezoluție impusă sistemului r_0 .
Suprafața de sub curbă este proporțională cu iluminarea imaginii

Limita de rezoluție sau frecvența de tăiere, r_{lim} , este de forma:

$$r_{lim} = \frac{2n' \sin \tilde{\sigma}'}{\lambda} = \frac{1}{\lambda(f'/D)}, \quad (2.97)$$

unde λ este măsurată în milimetri, iar f'/D este numărul de deschidere.

În mod practic, frecvența de tăiere nu reprezintă un criteriu de performanță în sine. Pentru fiecare aplicație, rezoluția sistemului optic este rațional să corespundă rezoluției receptorului de imagine.

Informativ, tabelul 2.6 redă rezoluțiile curente ale unor sisteme optice specifice și a receptorului natural.

Tabelul 2.6

Sistem	Rezoluție	
	Distanța între două puncte rezolvate [μm]	Frecvență spațială [perechi de linii/mm]
Fax	125	4
Ochiul uman	16 (pe retină)	≈ 31
Obiectiv f/8	2.5	200
Sistem asociat scannerului	1	500
Sistem asociat microlitografiei	0.5	1000

Considerând $r=r_0$ pragul de sensibilitate al receptorului, interesează porțiunea de curbă

reprezentând modulația pe domeniul $r=[0...r_0]$. Suprafața cuprinsă între axele de coordonate, curba de modulație și dreapta prag de sensibilitate a receptorului, este, la o anumită scară, proporțională cu contrastul și, în final, luminozitatea globală a imaginii. Rezultă că este importantă de urmărit și forma curbei de modulație.

Funcția optică de transfer de modulație, în cazul semnalului sinusoidal unidirecțional este egală cu raportul modulațiilor imagine și obiect:

$$MTF(r) = \frac{M_i}{M_o} \quad (2.98)$$

și reprezintă o măsură aproape universală de caracterizare nu numai a sistemelor optice formate din lentile, ci și a filemlor, ochiului, a diverși receptori fizici.

În principiu, poate fi utilizată proprietatea de multiplicare a MTF a subansamblurilor care alcătuiesc un sistem mai complex, deși rezultatele pot, în general, să subestimeze caracteristicile ansamblului (pentru că, de exemplu, iluminarea este incoerentă numai pentru primul subansamblu sau lentilă și devine parțial coerentă pentru următoarele).

Partea imaginară a funcției optice de transfer - PTF – indică o deplasare a imaginii, concretizată prin distorsiune, de exemplu, dacă este liniară în frecvență. Neliniaritatea PTF poate avea și efecte vizibile în ceea ce privește distribuția energiei, în sensul că o defazare de 180° este echivalentă cu inversarea contrastului (față de figura obiect, figura imagine are poziția benzilor luminoase și întunecate inversată).

Pentru iluminarea coerentă, MTF este o dreaptă orizontală, situată la nivelul unității, pentru un domeniu de frecvențe spațiale cuprinse între 0 și frecvența de tăiere r_0 (fig.2.35).

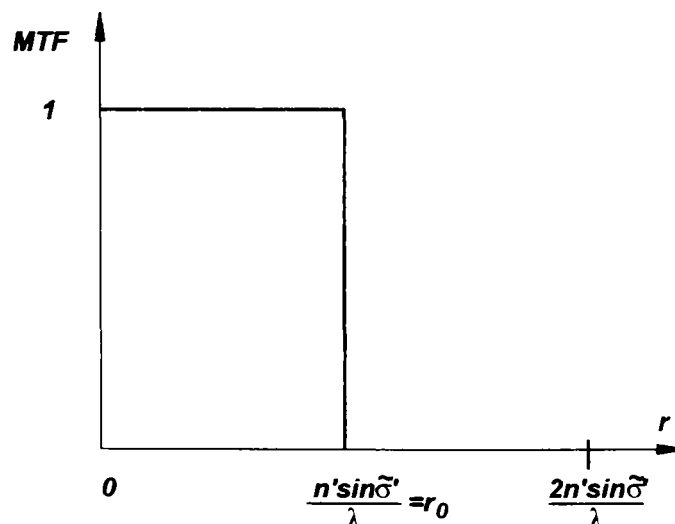


Fig.2.35. MTF în cazul iluminării coerente

Frecvența de tăiere are doar jumătate din valoarea care ar caracteriza sistemul în

iluminare incoerentă:

$$r_0 = \frac{n' \sin \tilde{\sigma}'}{\lambda} \quad (2.99)$$

Rezultă că iluminarea coerentă asigură contrast mai bun, iluminare globală mai mare a imaginii, dar rezoluție limită înjumătățită față de performanțele aceluiași sistem iluminat incoerent.

2.4. CONCLUZII

În capitolul 2 au fost prezentați sintetic parametri utilizați pentru a evalua calitatea imaginii sistemelor optice și metodele pe care se bazează algoritmi de calcul ai acestora.

În mod tradițional, analiza sistemelor optice se rezuma la determinarea aberațiilor geometrice și cromatice reziduale, al căror calcul are la bază numai optica geometrică. În prezent, se apelează și modelul ondulatoriu al luminii, conceptul central fiind frontul de undă. Deformația acestuia în raport cu o sferă ideală se definește ca aberație de undă sau diferență de drum optic. Acest parametru poate fi asociat aberațiilor geometrice, astfel încât se pot face interpretări imediate ale influenței aberațiilor asupra frontului de undă sau se pot impune toleranțe ale aberației de undă, care implicit stabilesc și valorile admise ale aberațiilor.

Cei mai sensibili parametri de calitate a imaginii rezultă prin analiză Fourier, respectiv prin determinarea elementelor funcției optice de transfer.

Tabelul 2.7 prezintă, în esență, parametri de calitate a imaginii și metodele necesare deducerii lor. Pe parcursul capitolului sunt descrise și analizate pe larg elementele înscrise în tabel.

Tabelul 2.7

<i>Nr.crt.</i>	<i>Parametru de calitate a imaginii</i>	<i>Simbol</i>	<i>Metode de calcul</i>
1	Aberația sferică transversală și axială	dy', ds'	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiective
2	Coma tangențială și sagitală	k_T, k_S	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiectivă și pupilară principală
3	Curburile astigmatice de câmp tangențială și sagitală	z_T, z_S	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiectivă și pupilară principală; Trasarea oblică a razelor
4	Distorsiunea	$d\tilde{y}'_{\%}$	Trasare paraxială și trigonometrică a razelor obiectivă și pupilară principală
5	Aberația de undă	OPD, RMS OPD	Calcul geometric
6	Diagrama spot	-	Trasare vectorială a razelor
7	Funcția imagine a punctului	PSF	Analiză Fourier

8	Funcția optică de transfer de modulație	MTF	Analiză Fourier
9	Funcția optică de transfer de fază	PTF	Analiză Fourier
10	Funcția imagine a liniei	LSF	Analiză Fourier
11	Raportul Strehl	Strehl	Funcție de OPD sau MTF
12	Criteriul Rayleigh	RL	Impune valoarea minimă OPD= $\lambda/4$ pentru sisteme limitate la difracție

Valorile efective ale parametrilor de calitate a imaginii determină calificativul de apreciere a sistemului optic analizat. În tabelul 2.8 este redată o clasificare a sistemelor optice, pe criteriul calității, conform standardelor actuale.

Tabelul 2.8

Parametru	Toleranțe pentru sistem optic comercial	Toleranțe pentru sistem optic precis	Toleranțe pentru sistem optic limitat la difracție
RMS OPD	0.25λ	0.1λ	$<0.07\lambda$
OPD	2λ	0.5λ	$<0.25\lambda$

Se observă faptul că cea mai importantă caracteristică pentru analiză este considerată aberația de undă, care reprezintă elementul de legătură atât cu parametrii geometrici, cât și cu parametrii Fourier. Rezultă, de asemenea, că atributul de limitat la difracție revine sistemelor care îndeplinesc criteriul Rayleigh. Echivalența informativă între criteriul Rayleigh, Raportul Strehl, OPD, RMS OPD și toleranțele aberațiilor geometrice (pentru criteriul Rayleigh $\lambda/4$) sunt prezentate în tabelul 2.9.

Tabelul 2.9

OPD	RMS OPD	Raport Strehl	ds'	k_T	z_T, z_S	Calitatea sistemului
0.0	0.0	1.00				ideal
0.25 RL= $\lambda/16$	0.018λ	0.99				
0.5 RL= $\lambda/8$	0.036λ	0.95				
1.0 RL= $\lambda/4$	0.07λ	0.80	$ds'_{Mmax} = \pm 16\lambda \left(\frac{f'}{D}\right)^2$	$k_T = \pm \frac{1.5\lambda}{n' \sin \sigma'}$	$\delta = \pm 2\lambda \left(\frac{f'}{D}\right)^2$	limitat la difracție
2.0 RL= $\lambda/2$	0.14λ	0.40				precis
3.0 RL= 0.75λ	0.21λ	0.10				comercial
4.0 RL= λ	0.29λ	0.00				

Analiza completă a unui sistem optic, cuprinzând toate elementele descrise mai sus impune cu necesitate utilizarea calculului automat, atât datorită volumului foarte mare de lucru, cât și metodelor numerice iterative utilizate în rezolvarea integralelor necesare pentru analiza Fourier.

Printre contribuțiile originale ale autorului se pot menționa:

- ◆ Sinteza cu un grad ridicat de compresie a informației dintr-un material extrem de vast, eterogen ca metodă de abordare, de largă acoperire privind școlile europene și americane de inginerie optică, având în vedere metodele moderne de apreciere a calității sistemelor optice
- ◆ Adaptarea metodelor de calcul la convențiile de semne din standardul românesc STAS 3003-79
- ◆ Sinteza criteriilor geometrice și ondulatorii de apreciere a calității și echivalarea acestora

Bibliografie: [C2], [C3], [C5], [D1], [D2], [G1], [G2], [G4], [G5], [G9], [G11], [G13], [H2], [K1], [M1], [M3], [M4], [N1], [N2], [N5], [N6], [O1], [O2], [P1], [P6], [S1], [S3], [S4], [S6], [S7], [S9], [S10], [S12], [S13], [W1], [W2], [W5], [W8], [W10], [W13], [W14]

CAP.3. CRITERII DE COMPATIBILITATE A SORTURILOR DE STICLE OPTICE PENTRU ACROMAZIE ȘI APOCROMAZIE

3.1.MATERIALE OPTICE

Materialele utilizate ca medii optice se pot încadra în trei mari categorii: *sticle minerale amorse, mono sau policristale și sticle organice.*

Sticlele optice minerale amorse sunt utilizate datorită transmitanței ridicate în VIS, omogenității, turnării ușoare și prelucrării la costuri relativ reduse, precum și potențialei disponibilități la orice indice de refracție într-o gamă dată. Tehnologia de obținere a semifabricatului sub forma unui bloc, presupune realizarea unui amestec omogen, în stare topită, a compoziției specifice sortului de sticlă și răcirea lentă, pentru solidificarea fără cristalizare.

Sticlele amorse, care nu prezintă nici un fel de simetrie structurală, sunt considerate, teoretic, izotrope. În acest sens, proprietățile materialului optic depind de viteza de răcire și distribuția vitezei de răcire în masa semifabricatului. Temperaturile neuniforme conduc la variații locale de densitate, care induc tensiuni remanente ca surse de anizotropie.

Indicii de refracție, caracteristicile de dispersie, proprietățile termice și mecanice diferite rezultă prin adăugarea în proporții controlate de oxizi de litiu, bariu, bor, fosfor, plumb etc. unei mase de bază constituite din bioxid de siliciu (SiO_2).

De exemplu, oxidul de bariu (BaO) determină obținerea unor indici de refracție mari și coeficienți de dispersie mici, în timp ce un oxid al borului (B_2O_3) – indice mic și dispersie foarte redusă. Indicii foarte mici și dispersii foarte reduse rezultă prin adaosuri de fluoruri în locul oxizilor. Pentru indici foarte mari la dispersii relativ mici este specific adaosul de pământuri rare, cu precădere lanthanul. Alți oxizi, cum ar fi ai aluminiului și metalelor alcaline contribuie la stabilitatea chimică, rezistența la umezeală a sticlelor.

Extinderea domeniului spectral în zona ultravioletă a fost posibilă prin introducerea în

masa de bază a flor-fosfaților și florurilor. Sticlele fără oxizi cu adaosuri de sulfură de arseniu (As_2S_3) și flori ale metalelor grele cum ar fi florura de zirconiu (ZrF_4) sunt utilizate pentru infraroșul mediu și îndepărtat.

Sorturile de sticlă optică se identifică printr-o simbolizare alfanumerică. În simbol este inclus un grup de litere reprezentând sortul sticlei urmat de un număr format din șase cifre. Primele trei cifre corespund primelor trei zecimale ale indicelui de refracție de referință, iar următoarele trei numărului Abbe înmulțit cu 10.

Densitatea sticlelor minerale variază între $(2.4...5.4)\text{g/cm}^3$, funcție de cantitatea și densitatea elementelor de adaos.

În Anexa 3.1 sunt prezentate câteva sorturi reprezentative de sticle minerale și caracteristicile lor.

Transmitanța sticlei optice are valori ridicate într-o regiune largă a spectrului electromagnetic, ceea ce o recomandă ca material utilizabil pentru domeniile ultraviolet apropiat, vizibil și infraroșu apropiat ($\lambda=350\text{nm}...2.5\mu\text{m}$).

Cristalele mono sau policristaline, naturale sau artificiale pot fi utilizate pe scară largă pentru execuția componentelor optice. Monocristalele rezultă prin creșterea din topitură a unui cristal prin diverse tehnologii. Policristalele se obțin prin sinterizare sau depunere de vapori, rezultând conglomerate de microcristale (cca. 50 micrometri), având orientări aleatoare și frontiere bine delimitate prin lipsa de continuitate a rețelelor cristaline. Policristalele sunt mai rezistente mecanic, mai dure, dar introduc pierderi prin difuzie mai mari decât monocristalele. Industria cristalelor optice s-a dezvoltat ca urmare a aplicațiilor tot mai numeroase în domeniul UV și, mai ales, IR, în care sticla optică tradițională are transmitanță scăzută sau este absorbantă, funcție de sort.

În Anexa 3.2 sunt prezentate câteva tipuri de cristale optice și principalele lor caracteristici optice.

Sticla organică este un material optic neconvențional, inclus în construcția aparatelor optice doar în ultimii ani. Avantajele maselor plastice, dintre care primează densitatea redusă - $(0.7...1.3)\text{g/cm}^3$ – și tehnologia ieftină de obținere a piesei optice finite (o singură operație de turnare sau matritare, fără finisare ulterioară), au determinat o extindere rapidă a utilizării sticlelor organice.

Câteva dintre cele mai importante mase plastice utilizate ca materiale optice sunt prezentate în Anexa 3.3.

Sticlele organice au indici de refracție mai mici ($n_d=1.4...1.7$) decât sticla minerală și un domeniu spectral de lucru limitat la vizibil (în UV și IR polimerii bazați pe carbon sunt puternic absorbanți).

Un avantaj al sticlelor organice este faptul că pot fi colorate, practic în orice culoare, fie

prin depunerea stratului filtrant spectral pe suprafața lentilei, fie prin colorarea în masă.

Rezistența scăzută la acțiunea factorilor mecanici nu mai reprezintă un dezavantaj datorită tratamentelor de durificare superficială care s-au dezvoltat și care aduc proprietățile mecanice ale componentelor din plastic la nivelul celor din sticlă.

Totuși, din punct de vedere optic, cea mai importantă caracteristică este uniformitatea indicelui de refracție în masa materialului. O ierarhizare pe acest criteriu clasează pe primul loc monocristalele, urmate de sticlele amorfe, policristale și apoi sticlele organice.

Proprietățile materialelor optice pot fi analizate din punct de vedere optic, mecanic, termic, electric etc. Cele mai importante, care impun alegerea materialului, sunt cele optice.

Caracteristicile mediilor optice se raportează la fenomenele de refracție, transmisie, dispersie, reflexie și absorbție a luminii.

a) *Refracția* unui sort de sticlă optică este definită prin indicele de refracție, n , al sticlei, în raport cu aerul. Întrucât indicele de refracție este variabil cu lungimea de undă λ a radiației luminoase, în cataloagele firmelor producătoare de sticlă optică se precizează valoarea acestuia pentru diferite lungimi de undă. În cataloagele recente, acești indici sunt specificați pentru lungimile de undă ale mai multor linii spectrale ale unor elemente chimice (23 sunt mai frecvent folosite) și pentru 12 lungimi de undă generate de cei mai utilizați laseri. Cataloagele pe suport electronic, permit determinarea indicelui de refracție pentru orice lungime de undă prin indicarea, la fiecare sort de sticlă, a polinomului de interpolare pentru funcția indice de refracție, având ca variabilă independentă lungimea de undă.

Indicele de refracție n_e corespunzător lungimii de undă $\lambda_e=546.074\text{nm}$, din spectrul mercurului este cunoscut ca *indice de refracție de referință (principal)*, întrucât această linie spectrală se află cel mai aproape de radiația având $\lambda = 555 \text{ nm}$, pentru care ochiul uman prezintă sensibilitatea maximă. Linia de referință e a fost impusă în Europa de cel mai mare și prestigios producător de sticlă optică, firma Schott. În Statele Unite se lucrează și cu linia d ca referință spectrală.

Prima determinare analitică a dependenței indicelui de refracție de lungimea de undă a fost realizată de Sellmeier (și independent de Maxwell) și avea în vedere influența absorbției electronice și a vibrațiilor din nodurile rețelei cristaline. Diverse aproximări sau completări aduse formulei inițiale au condus la îmbogățirea literaturii cu mai multe expresii de polinoame de interpolare, după cum urmează:

$$\text{Cauchy} \quad n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots \quad (3.1)$$

$$\text{Hartmann} \quad n(\lambda) = a + \frac{b}{c - \lambda} + \frac{d}{e - \lambda} \quad (3.2)$$

$$\text{Conrady } n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda} + \frac{c}{\lambda^{3.5}} \quad (3.3)$$

$$\text{Kettler-Drude } n^2(\lambda) = a + \frac{b}{c - \kappa^2} + \frac{d}{e - \lambda^2} + \dots \quad (3.4)$$

$$\text{Sellmeier } n^2(\lambda) = a + \frac{b\lambda^2}{c - \lambda^2} + \frac{d\lambda^2}{e - \lambda^2} + \frac{f\lambda^2}{g - \lambda^2} + \dots \quad (3.5)$$

$$\text{Herzberger } n(\lambda) = a + b\lambda^2 + \frac{e}{\lambda^2 - 0.035} + \frac{d}{(\lambda^2 - 0.035)^2} \quad (3.6)$$

$$\text{Old Schott } n^2(\lambda) = a + b\lambda^2 + \frac{c}{\lambda^2} + \frac{d}{\lambda^4} + \frac{e}{\lambda^6} + \frac{f}{\lambda^8}. \quad (3.7)$$

Catalogul Schott nou utilizează ecuația Sellmeier (3.5) și precizează valorile numerice ale coeficienților a...g pentru toate sorturile de sticlă din catalog. Relația (3.7) utilizată de firma Schott pentru datele prezentate în cataloagele mai vechi introducea o eroare de ordinul $3 \cdot 10^{-6}$ în vizibil și $5 \cdot 10^{-6}$ în UV și IR. Expresia putea fi corectată prin introducerea unui termen în λ^4 pentru UV și în λ^{-10} pentru IR. Introducerea în fabricație a sorturilor de sticlă noi, cu transmitanță ridicată pe domenii spectrale largi, care se extind mult în afara vizibilului a impus reconsiderarea alegerii polinomului de interpolare în scopul rigurozității determinării indicelui de refracție și pentru utilizarea corectă, la parametrii potențiali ai materialului optic respectiv.

Binoamele de la numitorii din polinoamele de interpolare evidențiază prin constantele specifice liniile de absorbție caracteristice fiecărui sort de sticlă. Formularea Cauchy și Old Schott plasează benzile de absorbție la lungimi de undă nule, neglijându-le de fapt.

Formula Herzberger aproximează corect până la aproximativ $1 \mu\text{m}$ și în ultimele sale lucrări a înlocuit linia 0.035 cu 0.026.

Apariția sticlelor minerale performante, cu acoperire spectrală largă a impus una dintre interpolările Sellmeier (rel.3.5).

b) *Dispersia* luminii reprezintă fenomenul de dependență a indicelui de refracție al sticlei optice de lungimea de undă a radiației luminoase și matematic se exprimă prin raportul $dn/d\lambda$.

Reprezentarea grafică a dependenței $n=n(\lambda)$ definește *curba de dispersie* a mediului optic respectiv.

În figura 3.1 este prezentată, spre exemplificare, curba de dispersie pentru sticla TF5 în domeniul vizibil.

Dispersia materialelor optice în domeniul vizibil este monoton descrescătoare (*dispersie normală*) dar neliniară de la albastru spre roșu și nu poate fi caracterizată printr-un singur

parametru. În afara vizibilului *dispersia* este *anormală*, curba prezentând extreme locale, corespunzătoare absorbției unor linii sau benzi spectrale.

Caracterul nelinier al dispersiei face imposibilă descrierea proprietăților dispersive ale materialului printr-un singur parametru numeric.

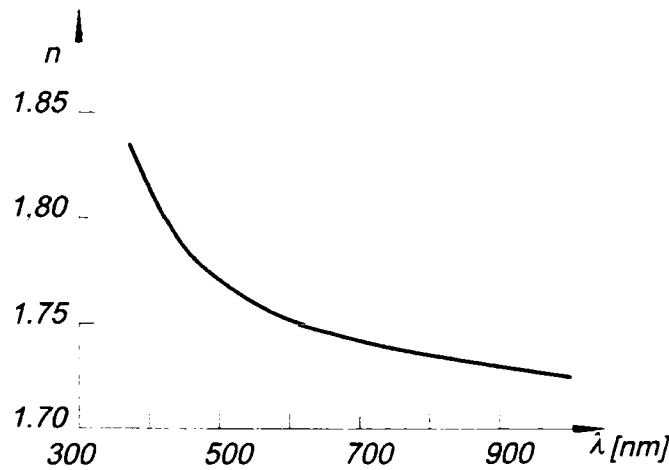


Fig.3.1. Curba de dispersie a sticlei TF5

Se definește următorul set de parametri dispersivi:

- *dispersia principală (medie)*:

$$\Delta n \cong dn = n_{F'} - n_{C'} = (6...70) \cdot 10^{-3} \quad (3.8)$$

unde F' și C' simbolizează liniile albastră, respectiv roșie care delimitează partea cea mai mare a energiei din spectrul vizibil.

- *dispersii parțiale*:

$$\Delta n_{\lambda_1,2} = n_{\lambda_1} - n_{\lambda_2} \quad (3.9)$$

cum sunt $n_G - n_g$, $n_D - n_d$, $n_g - n_h$, $n_F - n_f$, $n_e - n_e$, $n_C - n_c$, $n_A - n_C$ etc;

- *refringența optică*:

$$n_e - 1 \text{ sau } n_d - 1 \quad (3.10)$$

- *coeficienții de dispersie Abbe*:

$$v_e = \frac{n_e - 1}{n_{F'} - n_{C'}} \text{ sau } v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (3.11)$$

Numărul lui Abbe se înscrie în intervalul $v_e = (16.5...105)$, majoritatea valorilor încadrându-se în domeniul $(40...70)$. Valori mult mai mari ale coeficientului Abbe pot avea unele cristale destinate utilizării în IR ($v = 200...300$).

- *dispersia parțială relativă*:

$$\frac{\Delta n_{\lambda,1,2}}{n_{F'} - n_{C'}} \quad (3.12)$$

care este definită în cataloage pentru mai multe zone spectrale.

- dispersiile parțiale relative $P_{g,F}$ și $P_{C,s}$

$$P_{g,F} = \frac{n_g - n_{F'}}{n_g - n_{C'}}, \quad P_{C,s} = \frac{n_C - n_s}{n_g - n_{C'}} \quad (3.13)$$

sunt de interes la corectarea aberațiilor cromatice în spectrele secundare.

- *dispersia specifică:*

$$n_H - n_C \quad (3.14)$$

- *puterea dispersivă*, reprezentând inversul coeficientului de dispersie:

$$C_e = \frac{1}{v_e} = \frac{n_{F'} - n_{C'}}{n_e - 1}, \quad (3.15)$$

c) *Transmitanța* sticlei optice are o valoare mare în domeniul (450... 1000) nm. Pentru lungimi de undă mai mici de 450 nm, sorturile cu indici de refracție mari prezintă valori superioare ale coeficientului de absorbție.

Pentru a putea caracteriza transmitanța, firmele menționează în cataloage valori ale *coeficienților radiometrici spectrali*, determinați pentru probe de sticlă prelucrate sub formă de lame plan-paralele, având grosimi precizate în cataloage.

Atenuarea fluxului luminos incident, Φ_i , se datorează pierderilor la trecerea prin mediul optic. Acestea sunt de două categorii: prin reflexie la suprafețele de separație a materialului optic dens cu aerul și prin absorbție în masa materialului (fig.3.2).

Astfel, considerând o piesă de forma unei lamele plan paralele, pe care este incident fluxul Φ_i , în interiorul piesei, efectiv, pătrunde fluxul $\Phi_{in} < \Phi_i$, datorită reflexiei pe prima față. Pe a doua față ajunge fluxul $\Phi_{ex} < \Phi_{in}$, diminuarea fiind cauzată de absorbția pe parcursul d . Din fața a doua a piesei emerge $\Phi_t < \Phi_{ex}$, pierderea fiind determinată de reflexia pe suprafața 2 a lamei.

Între valorile fluxurilor energetice sau luminoase de la incidența pe prima față până la emergența din a doua suprafață, se pot scrie relații care definesc coeficienții radiometrici (sau fotometrici). În forma cea mai cuprinzătoare, care are în vedere și determinarea spectrală a reflexiei, absorbției și transmisiei, aceștia au următoarele expresii:

- *coeficientul spectral de transmisie externă:*

$$\tau_{ext}(\lambda) = \frac{(\Phi_{e,\lambda})_t}{(\Phi_{e,\lambda})_i}, \quad (3.16)$$

unde $(\Phi_{e,\lambda})_t$ este fluxul radiant transmis de probă, iar $(\Phi_{e,\lambda})_i$ reprezintă fluxul radiant incident;

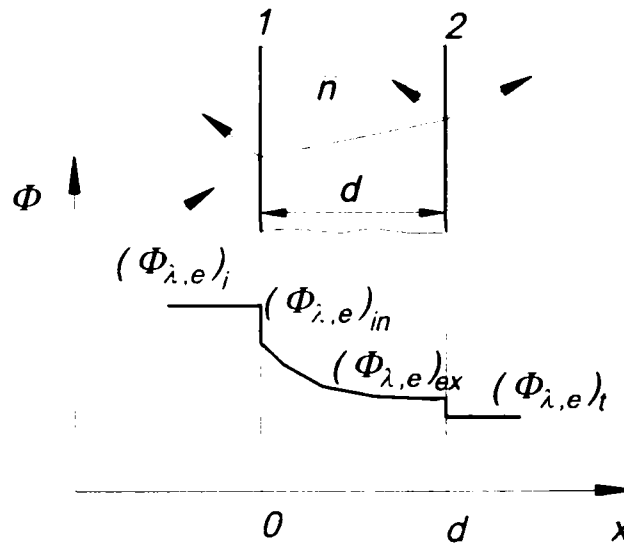


Fig.3.2. Pierderi de lumină prin mediile optice dense

- coeficientul spectral de reflexie:

$$\rho(\lambda) = \frac{(\Phi_{e,\lambda})_r}{(\Phi_{e,\lambda})_i}, \tag{3.17}$$

unde $(\Phi_{e,\lambda})_r$ este fluxul radiant reflectat de probă;

- coeficientul spectral de absorbție:

$$\alpha(\lambda) = \frac{(\Phi_{e,\lambda})_a}{(\Phi_{e,\lambda})_i}, \tag{3.18}$$

unde $(\Phi_{e,\lambda})_a$ este fluxul radiant absorbit de probă;

-coeficientul spectral de transmisie internă:

$$\tau_{int}(\lambda) = \frac{(\Phi_{e,\lambda})_{ex}}{(\Phi_{e,\lambda})_{in}} \tag{3.19}$$

unde $(\Phi_{e,\lambda})_{ex}$ este fluxul radiant incident pe a doua față a lamelei, iar $(\Phi_{e,\lambda})_{in}$ reprezintă fluxul radiant care intră în probă după pierderea prin reflexie pe prima față a acesteia;

- coeficientul spectral de absorbție internă:

$$\alpha_{int}(\lambda) = \frac{(\Phi_{e,\lambda})_{in} - (\Phi_{e,\lambda})_{ex}}{(\Phi_{e,\lambda})_{in}}, \tag{3.20}$$

Între acești coeficienți există relațiile:

$$\tau_{ext}(\lambda) + \rho(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1, \tag{3.21}$$

$$\tau_{int}(\lambda) + \alpha_{int}(\lambda) = 1, \tag{3.22}$$

$$\tau_{int}(\lambda) = e^{-\alpha_{int}(\lambda)d}. \tag{3.23}$$

Se observă că:

$$\alpha_{\text{int}}(\lambda) > \alpha_{\text{ext}}(\lambda), \quad (3.24)$$

$$\tau_{\text{int}}(\lambda) > \tau_{\text{ext}}(\lambda). \quad (3.25)$$

Cu aceste considerații privind pierderile prin absorbție în masa materialului piesei optice și prin reflexii pe cele două fețe, fluxul transmis va fi :

$$\left(\Phi_{e_1\lambda}\right)_t = \left[\left(\Phi_{e_1\lambda}\right)_i - \left(\Phi_{e_1\lambda}\right)_i \rho\right] e^{-\alpha_i d} (1 - \rho), \quad (3.26)$$

sau:

$$\tau_{\text{ext}}(\lambda) = (1 - \rho) e^{-\alpha_i d} \cdot (1 - \rho) = (1 - \rho)^2 e^{-\alpha_i d}, \quad (3.27)$$

unde ρ este reflectanța unei suprafețe.

Pentru sticla optică fără protecție antireflex, $\rho \approx 0,04$ și $\alpha_i \approx 0,002$, rezultând un factor de transmisie externă curent $\tau_{\text{ext}} \approx 0,92$, la grosimea de 1mm, în lumină albă.

3.2. CRITERII DE SELECȚIE A SORTURILOR DE STICLĂ PENTRU

SUBANSAMBLURILE CORECTATE LA ABERAȚII CROMATICE

3.2.1. Considerații generale

Sinteza subansamblurilor optice corectate la aberații cromatice utilizează valori ale parametrilor care caracterizează proprietățile de refracție și de dispersie ale materialelor optice. Calculele implică valorile indicilor de refracție de referință, a dispersiilor medii (și parțiale relative) și numărul lui Abbe.

Indicii de refracție de referință ai sticlelor selectate pentru a constitui dublete sau triplete cu o putere dată, vor influența mai ales puterile și, respectiv curburile totale ale lentilelor constituate ale subansamblului. Caracteristicile dispersive vor determina, cu precădere, valoarea aberațiilor cromatice și a spectrului secundar, reziduale.

Pentru aceleași date de intrare (putere optică, deschidere și unghi de câmp), perechea sau tripletul de materiale conduc la soluții diferite calitativ sau, adesea, pot fi incompatibile și nu se pot utiliza. În cazul unei soluții viabile, calitatea diferită a sistemului este determinată de semnul și valoarea efectivă a razelor, care conduc a o anumită formă constructivă a lentilelor și la valori ale aberațiilor geometrice și cromatice specifice fiecărei soluții.

Alegerea materialelor nu prezenta o dificultate deosebită doar în epoca de pionierat a ingineriei optice, atunci când industria producătoare de materiale optice se afla la început și oferta de sorturi nu era prea bogată. Alegerea se putea face prin încercări de asociere a sorturilor.

În prezent, catalogul unei firme producătoare de materiale optice cuprinde de la 200 de sorturi în sus și selectarea perechilor sau tripletelor prin simple combinații este total

ineficientă ca metodă. În plus, analiza calității imaginii pe baze ondulatorii și Fourier, pune în evidență faptul că perechi de materiale tradițional utilizate (cum ar fi BK7-SF5, K7-F2) conduc la soluții slabe privind rezoluția și contrastul.

Rezultă că utilizarea rațională a unei baze de date conținând sorturi de sticle optice necesită metode de selecție, respectiv de asociere a materialelor, care să conducă la un set de combinații compatibile. Compatibilitatea este înțeleasă ca asigurare a desfășurării complete a algoritmului matematic (de exemplu, obținerea unor rădăcini reale pentru o ecuație de gradul II). Ca urmare, se pot căuta relații între caracteristicile optice ale materialelor, care să conducă la o geometrie dorită a subansamblului și să asigure relații impuse, considerate ca favorabile între puterile componentelor, astfel încât mulțimea combinațiilor de două sau trei elemente dintr-un șir de peste două sute să se diminueze considerabil.

Dacă se obține o astfel de serie de dublete, respectiv triplete de materiale compatibile, urmează analiza pentru găsirea celei mai bune soluții din punct de vedere calitativ. Impunerea din faza de selecție a sorturilor de sticlă a unor parametri de calitate a imaginii este dificilă sau chiar imposibilă, având în vedere faptul că seria de materiale compatibile, în general, poate conduce la soluții diferite calitativ funcție de datele de intrare concrete.

În paragrafele următoare se propun algoritmi de selectare a sorturilor compatibile pentru sinteza dubletului acromat și a tripletului apocromat. Algoritmii au fost definiți prin modelarea matematică a unor observații cu caracter descriptiv din literatura de specialitate și pe baza experienței anterioare de proiectare a autorului. Aplicațiile efective au fost realizate prin calcul automat efectuat pe baza unor softuri originale.

3.2.2. Alegerea sorturilor de sticlă pentru dubletul acromat

Algoritmul de selectare a sorturilor de sticlă compatibile pentru sinteza dubletului acromat are la bază următoarele observații:

- ◆ În majoritatea cazurilor se preferă soluția crown-în-față, cu lentila convergentă biconvexă și lentila divergentă menisc, care, prezintă cele mai bune caracteristici privind calitatea imaginii, respectiv mărimea aberațiilor reziduale
- ◆ Aceste forme constructive de lentile, tot conform experienței acumulate în domeniu, rezultă dacă puterea componentei convergente este de aproximativ 2.5 ori mai mare decât a dubletului, iar raportul curburilor totale ale lentilelor componente, în jurul valorii de -2 (caracterul dispersiv al sticlei Flint este mai accentuat decât al sticlei Crown).

Aceste condiții favorizează obținerea unor raze ale suprafețelor exterioare cu valori mari, astfel încât aberația sferică să poată fi corectată (matematic, asigură condiția ca

ecuația de gradul II care conduce la soluția pentru prima curbura să aibă rădăcini reale).

Cu aceste rapoarte numerice impuse puterilor și curburilor se pot deduce relații între indicii de refracție de referință și numărul Abbe pentru cele două sticle.

Matematic, condițiile enunțate mai sus se pot scrie astfel:

$$\left\{ \begin{array}{l} f'_a = f' \frac{v_a - v_b}{v_a} \\ f'_b = f' \frac{v_b - v_a}{v_b} \\ f'_a = \frac{f'}{2.5} \\ f'_b = -\frac{f'}{1.5} \end{array} \right. \Rightarrow \frac{v_a}{v_b} = \frac{2.5}{1.5} = 1.67 \quad (3.28)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} f'_a = \frac{1}{c_a(n_a - 1)} \\ f'_b = \frac{1}{c_b(n_b - 1)} \\ \frac{f'_a}{f'_b} = -\frac{1}{1.67} \\ \frac{c_a}{c_b} = -2 \end{array} \right. \Rightarrow \frac{n_b - 1}{n_a - 1} = 1.2, \quad (3.29)$$

unde f' reprezintă distanța focală a dubletului, a și b indicii pentru lentila convergentă, respectiv divergentă, v - numărul Abbe, c - curbura totală a lentilei, n - indicele de refracție de referință pentru linia e.

Pe baza relațiilor (3.28) și (3.29) s-au formulat condițiile:

$$1.6 < \frac{v_a}{v_b} < 1.7; \quad 1.1 < \frac{n_b - 1}{n_a - 1} < 1.2, \quad (3.30)$$

care s-au aplicat unei bazei de date, conținând sorturile de sticle oferite de firma Schott (figura 3.3 și Anexa. 3.4).

S-au obținut familii de sorturi compatibile cu condițiile de acromatizare și corectare a sfericității. În tabelul 3.5 sunt prezentate soluțiile programului de selecție, într-o formă care, în prima coloană indică sortul crown pentru lentila convergentă, iar în a doua coloană sortul sau sorturile flint compatibile, pentru lentila divergentă.

Cele 139 de perechi de materiale din tabelul 3.5 asigură în mod cert obținerea unei soluții crown-în-față cu lentila convergentă biconvexă, iar lentila divergentă menisc, respectiv elimină posibilitatea ca rădăcinile ecuației de gradul II care furnizează valoarea primei curburii să fie complexe (ceea ce echivalează cu incompatibilitatea sorturilor pentru corectarea aberației sferice), de asemenea, ca formele lentilelor să fie altele decât cele dorite.

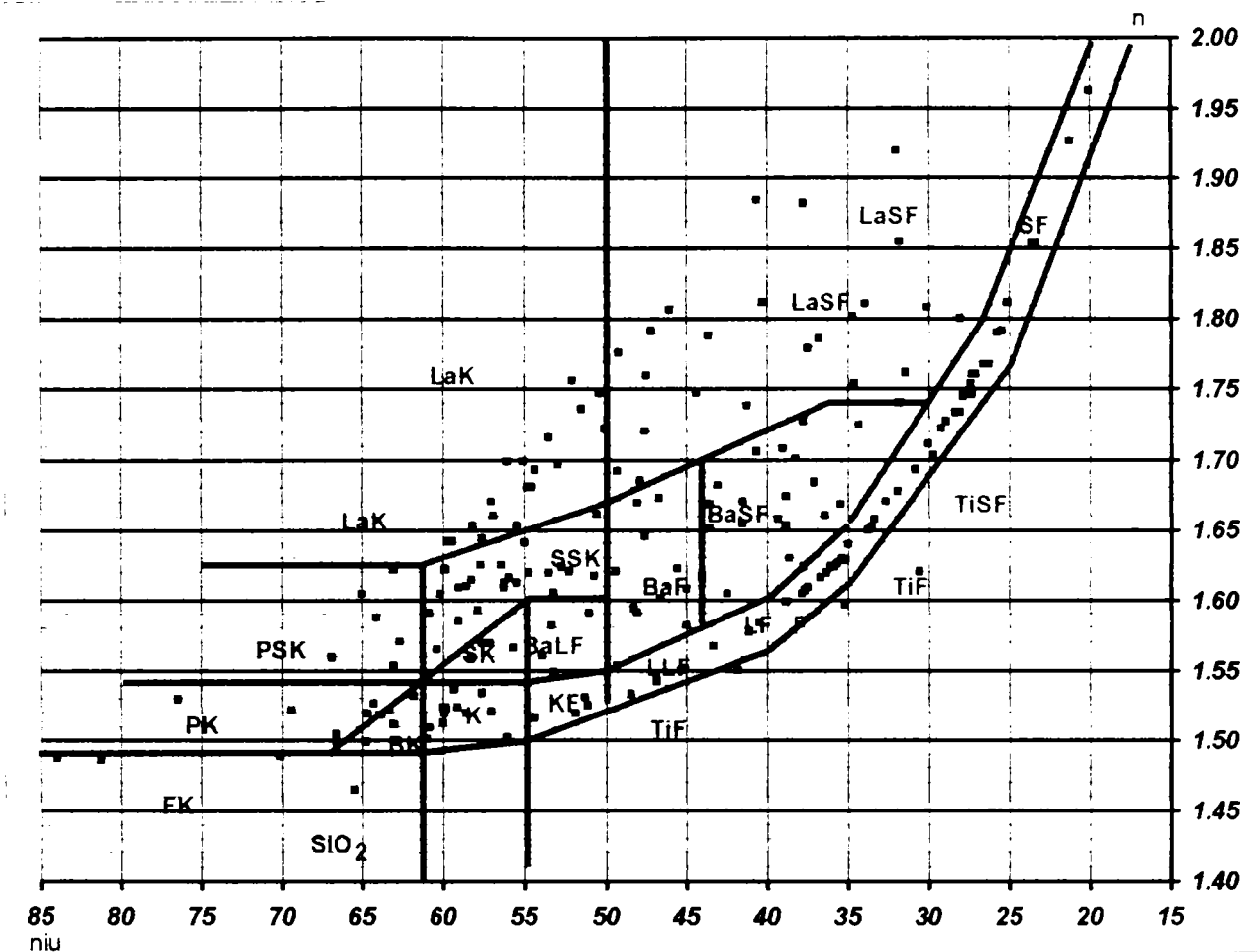


Fig.3.3. Reprezentarea sorturilor de sticle Schott în diagrama n-v

Efectiv, alegerea unei perechi de materiale din tabel mai poate fi condiționată de domeniul spectral de lucru.

Calitatea de limitat la difracție a sistemului rezultat poate diferi de la pereche la pereche și depinde nu numai de materiale ci și de valorile concrete ale parametrilor impuși (distanță focală, deschidere, unghi de câmp).

Desigur, soluțiile din tabelul 3.1 nu epuizează toate combinațiile compatibile, dar oferă o bază de date sigură pentru utilizare rapidă și eficientă.

Tabelul 3.1

Sort de sticlă pentru lentila convergentă	Sort de sticlă pentru lentila divergentă
BaLKN3	F2, F3, F4
BK1	F14, F15, F5, F8
BK10	LF5, LF7
BK3	F8
BK6	F3, F5, F9, F14, F15, BaSF1
BK7	F5, F8, F14
BK8	F9, F8, F5, F15, F14
FK5	TiF3, LF8

FK54	K10, KF3
K3	TiFN5, F2, F4
K4	TiFN5
K5	TiFN5, FN11, F2,F3, F4, F13
K50	FN11, F7, F4, F3, F2, F13
K7	F15
LaK23	LaSF36A, LaFN7
LaK31	LaSF36A, LaSF33
LaK9	LaSF33
LaKL12	LaSF33
LaKN14	LaSF33
LaKN22	LaFN7, KzFS8
LaKN6	LaFN7, KzFS8
LaKN7	LaFN7, KzFS8
PK1	LF7, LF5
PK2	F8
PK3	F8, F14, BaSF1
PK50	LF7, BaF4
PK51A	KzFSN9, BaF8, BaF3
PSK2	KzFS7A, BaSF1, BaSF10, BaSf12
PSK3	KzFSN5, F9, BaSF1, BaSF10
PSK50	BaSF6, BaSf57
PSK52	BaSF64A, BaSF12
PSK53A	BaSF64A, BaSf51, BaSF13
PSK54	KzFSN5, BaSF10, BaSF12, BaSF13
SK1	KzFS8
SK10	KzFS8
SK11	FN11, F9,F2, F13, BaSF56
SK12	BaSF56, BaSf2
SK13	BaSF2
SK14	KzFS7A, BaSF2
SK15	KzFS8
SK18A	KzFS8
SK2	KzFS8
SK4	KzFS8
SK5	KzFS7A, BaSF56
SK6	KzFS8
SK8	KzFS8
SSK1	BaSF54
SSK2	BaSF54
SSK3	SF8, SF64A
SSK50	SF8, BaSf54
SSK51	SF5, SF19
SSKN5	LaF11A
SSKN8	SF64A, SF15, Sf1
UBKF	F5, F8, F14
UK50	FN11, F4, F3, F2, F15, F13
ZK1	TiFN5, FN11, F6, F7, F13, F1
ZKN7	F5, F15, F14

3.2.3. Alegerea sorturilor de sticlă pentru tripletul apocromat

Determinarea curburilor totale ale lentilelor care formează tripletul lipit are la bază următorul sistem de ecuații:

$$\begin{cases} c_a = \frac{1}{f'E(v_a - v_c)} \left(\frac{P_b - P_c}{\Delta n_a} \right) \\ c_b = \frac{1}{f'E(v_a - v_c)} \left(\frac{P_c - P_a}{\Delta n_b} \right) \\ c_c = \frac{1}{f'E(v_a - v_c)} \left(\frac{P_a - P_b}{\Delta n_c} \right) \end{cases} \quad (3.30)$$

unde c reprezintă curburile totale ale lentilelor, f' – puterea sistemului, v - coeficienții Abbe, Δn – dispersiile principale, P – dispersiile parțiale relative, a, b, c – indicii pentru cele trei lentile componente.

În expresia curburilor intervine la numitor mărimea E :

$$E = \frac{v_a(P_b - P_c) + v_b(P_c - P_a) + v_c(P_a - P_b)}{v_a - v_c}, \quad (3.31)$$

care depinde de indicatorii de dispersie ai sticlelor optice. Din experiența de proiectare anterioară, a rezultat că tripletul de materiale optice trebuie să aibă caracteristici între care să existe relațiile:

$$v_a > v_b > v_c \wedge P_a < P_b < P_c, \quad (3.32)$$

ceea ce indică alegerea unor sorturi din familiile FK (Flor Crown) – KzFS (Flint special scurt) – SF (Flint greu). Caracteristicile acestor familii de sorturi sunt prezentate în tabelul 3.2, iar poziția lor relativă pe diagrama n - v este redată în figura 3.4.

Tabelul 3.2

<i>Familia de sorturi</i>	<i>Indice de refracție de referință n_e</i>	<i>Numărul Abbe v_e</i>	<i>Dispersia parțială relativă P_{e-g}</i>
FK	<1.5	65...90	~0.66
KzFS	~1.6	35...50	~0.67
SF	1.65...1.90	25...33	~0.69

Mărimea E nu are semnificație fizică și nu a fost definită ca un parametru dispersiv, dar în reprezentarea grafică corespunde lungimii unui segment vertical situat între punctul care reprezintă sticla intermediară și dreapta care unește sticlele extreme. Segmentul E , măsurat de-a lungul axei dispersiilor parțiale relative, exprimă o relație între dispersiile parțiale relative ale tripletului de materiale.

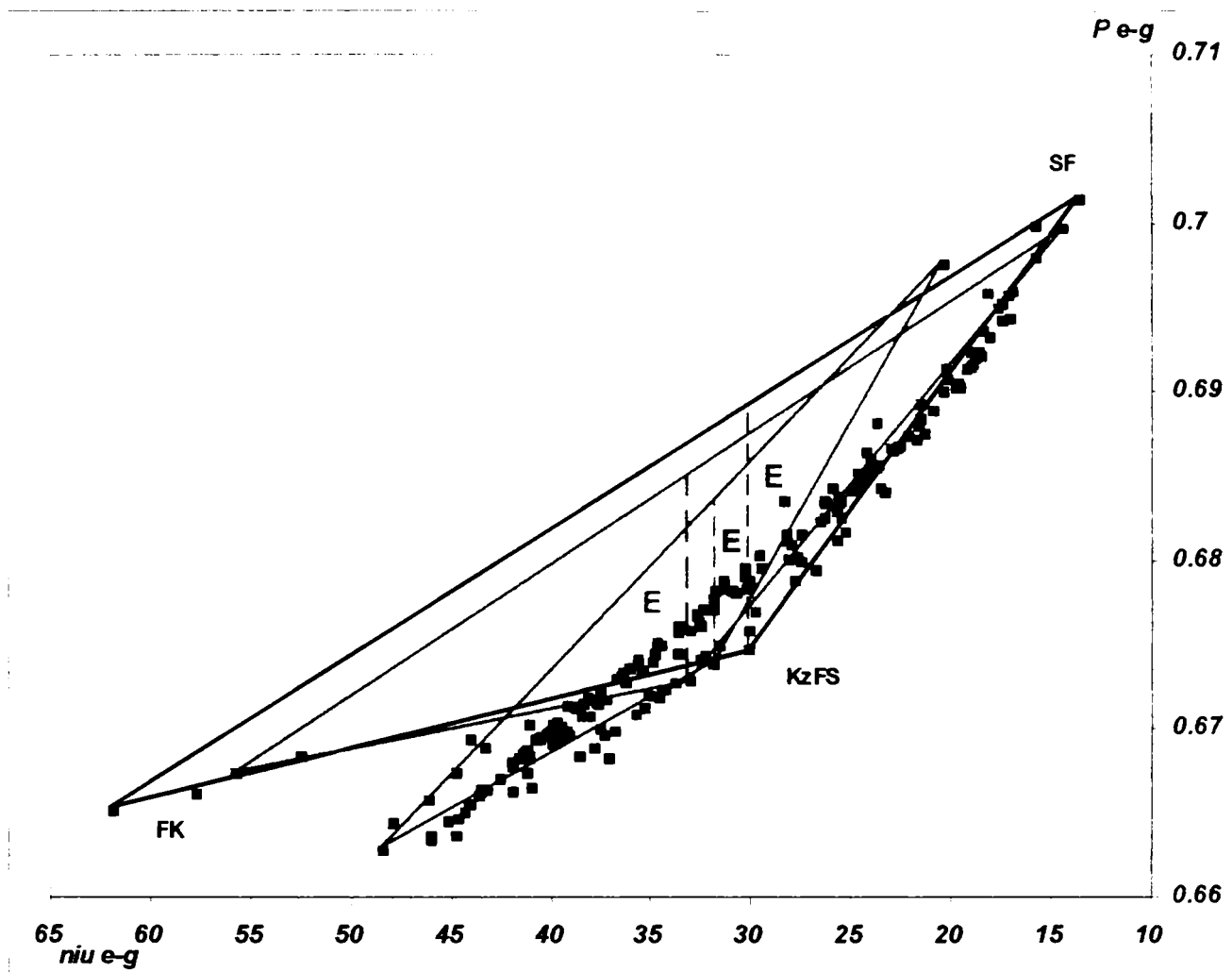


Fig.3.4. Poziția relativă a familiilor de sticle care pot satisface condițiile de apocromazie și corectare a spectrului secundar

Algebric, E trebuie să fie un număr negativ, pentru a obține curburi totale pozitive lentre lentilele a și c (lentile convergente) și curbură negativă pentru lentila b (divergentă). Ca valoare absolută, este de dorit ca E să fie cât mai mare pentru ca valorile curburilor totale ale lentilelor să rezulte cât mai mici (consecutiv, puterile mici și razele mari). Acest aspect este foarte important având în vedere faptul că în calculul de gabarit al tripletului se pot impune numai condițiile de putere, apocromazie și corectarea spectrului secundar. De aceea, în general aberațiile geometrice, în special cea sferică au valori mari, care limitează numărul de deschidere al tripletului apocromat la $f/8 \dots f/10$. În condițiile în care oferta de sorturi de sticle s-a îmbogățit foarte mult se poate pune în discuție și studiul posibilităților de îmbunătățire și a acestei caracteristici importante.

Cu ajutorul unui program de selecție automat, în care s-au impus condițiile (3.32) și s-au căutat valorile cât mai mari pentru mărimea E (condiția $ABS(E) > 0.0145$) din baza de date înscrisă în ANEXA 3.4, s-au obținut următoarele 22 de combinații de sticle favorabile construirii unui triplet apocromat (tab.3.3).

Tabelul 3.3

<i>E</i>	<i>Sort a</i>	<i>Sort b</i>	<i>Sort c</i>
-1.455E-02	FK51	KZFS1	TIF6
-1.517E-02	FK51	KZFSN2	TIF6
-1.501E-02	FK52	KZFSN2	TIF6
-1.494E-02	FK54	BK3	TIF6
-1.517E-02	FK54	KZFS1	TIF6
-1.485E-02	FK54	KZFS6	TIF6
-1.547E-02	FK54	KZFSN2	SF57
-1.486E-02	FK54	KZFSN2	SF58
-1.546E-02	FK54	KZFSN2	SF59
-1.623E-02	FK54	KZFSN2	TIF6
-1.470E-02	FK54	KZFSN9	TIF6
-1.470E-02	FK54	LAK16A	TIF6
-1.461E-02	FK54	LAK28	TIF6
-1.501E-02	FK54	LAK31	TIF6
-1.466E-02	FK54	LAK33	TIF6
-1.492E-02	FK54	LAK8	TIF6
-1.463E-02	FK54	LAK9	TIF6
-1.503E-02	FK54	LAKL21	TIF6
-1.498E-02	FK54	LAKN14	TIF6
-1.492E-02	KZFS7A	SFL57	TIF6
-1.495E-02	KZFSN5	SF58	TIF6
-1.541E-02	KZFSN5	SF59	TIF6

Se observă faptul că tripletele de sorturi compatibile pentru a constitui un subansamblu apocromat sunt în număr foarte mic în raport cu combinațiile de câte trei materiale posibile, având în vedere baza de date care conține 199 de linii. Rezultă importanța practică deosebită a selecției automate realizate, urmând o rafinare a acesteia pe criterii difracționale.

3.3. CONCLUZII

Capitolul 3 prezintă un sumar privind materialele optice (sticla minerală, mono sau policristale și sticlă organică). Sunt sintetizate informații relative la compoziția chimică, tehnologia de execuție și proprietățile acestor materiale, cu evidențierea caracteristicilor de refracție și dispersie, care interesează în sinteza subansamblurilor corectate la cromatism și/sau spectru secundar.

Pomind de la observația că nu orice combinație de sorturi de sticle optice este compatibilă pentru sinteza unui subansamblu de tip dublet sau triplet și având în vedere faptul că oferta de materiale este foarte bogată, rezultă necesitatea găsirii unei metode fundamentate matematic pentru selecția sorturilor. Acest demers urmărește eliminarea procedurii actuale, care constă în combinarea aleatoare a două sau trei materiale. Acestea se pot dovedi incompatibile sau pot conduce la soluții slabe calitativ, în timp ce pot fi omise

combinații mult mai favorabile.

Pornind de la observații cu caracter descriptiv din literatura de specialitate, s-au modelat matematic condiții privind forma lentilelor componente și raportul puterilor lor. Au rezultat algoritmi de selecție ai sticlelor care să asigure compatibilitatea acestora, respectiv existența unei soluții reale, din punct de vedere matematic. Totodată, relațiile definite impun o formă constructivă prestabilită și considerată ca cea mai convenabilă.

S-a procedat la alcătuirea unei baze de date, conținând sorturile de sticle optice produse de firma Schott, asupra căreia s-au aplicat algoritmi propuși. Au rezultat perechi de materiale pentru dubletul acromat și triplete de sorturi pentru tripletul apocromat, care au fost prezentate sub forma tabelară.

Calitatea sistemelor optice care rezultă utilizând materialele selectate conform recomandărilor din tabelele 3.5 și 3.7 depinde de datele concrete de intrare impuse (distanță focală, deschidere și unghi de câmp) și trebuie determinată prin analiză completă.

Contribuțiile originale din capitolul 3 pot fi enunțate, după cum urmează:

- ◆ Sinteza bibliografică privind compoziția chimică, tehnologia de obținere, clasificarea pe familii de sorturi, simbolizarea și proprietățile materialelor optice, cu evidențierea caracteristicilor optice ale acestora
- ◆ Stabilirea parametrilor optici necesari în sinteza subansamblurilor de tip dublet și triplet
- ◆ Formularea unor criterii de selecție a perechii de materiale compatibile pentru sinteza dubletului acromat și modelarea matematică în scopul propunerii unui algoritm
- ◆ Formularea unor criterii de selecție a sorturilor compatibile pentru sinteza unui triplet apocromat și modelarea matematică necesară elaborării unui algoritm
- ◆ Aplicarea algoritmilor unei baze de date conținând sorturile cuprinse în catalogul Schott, cu ajutorul unor softuri originale
- ◆ Crearea unor recomandări de utilizare a 139 de perechi, respectiv 22 de triplete de materiale compatibile, sub formă tabelară.

Bibliografie: [C1], [G3], [G10], [G11], [H2], [H3], [K1], [L2], [M1], [N4], [N7], [O1], [P3], [S2], [S6], [T2], [W15]

CAP.4. LIMITELE CALITĂȚII IMAGINII TRIPLETULUI APOCROMAT REZULTAT PRIN SINTEZĂ TRADIȚIONALĂ

4.1. STUDIU CRITIC ASUPRA CALITĂȚII APOCROMATULUI TRADIȚIONAL

Sinteza tripletului apocromat, lipit, așa cum rezultă din capitolele anterioare asigură obținerea puterii subansamblului și corectarea aberațiilor cromatice axiale, respectiv a spectrului secundar. În ceea ce privește aberațiile geometrice, în special cea de apertură, nu se includ în algoritmul de calcul elemente de control. Aceste observații au condus la recomandările din literatura de specialitate privind utilizarea tripletelor lipite apocromate numai la deschideri mici, limitate la $f'/8...f'/10$. Chiar și la aceste valori, aberația sferică axială este de ordinul milimetrilor. În aceste condiții, analiza frontului de undă indică aberații de undă cu valori semnificative, care exclud subansamblul din categoria limitat la difracție.

Calitatea subansamblului depinde de o serie de factori a căror pondere de influență este greu sau imposibil de controlat. Printre acești factori cei mai importanți sunt: relațiile dintre caracteristicile de refracție și dispersive ale sticlelor, mărimea razelor și grosimilor, forma constructivă a lentilelor componente și deschiderea absolută a sistemului.

Se prezintă în continuare un studiu al calității imaginii unui set de triplete a căror sinteză și analiză a fost realizată de către autor. S-au luat în considerare cele 22 de combinații de materiale compatibile pentru sinteza unui apocromat, așa cum au rezultat conform algoritmului de selecție propus în capitolul anterior. Pentru fiecare triplet de materiale s-a aplicat algoritmul de sinteză original scris în limbajul QBasic și redat mai jos.

```
CLS
DEFDBL A-Z
f = 100: D# = f / 10: se(1) = 1E+30
DIM ne(5): DIM nc(5): DIM nf(5): DIM D(3)
REM sticle FK54, LaK28, TIF6
```

```

FOR j = 1 TO 5
  READ ne(j)
NEXT j
DATA 1,1.438151,1.747779,1.621182,1
FOR j = 1 TO 5
  READ nc(j)
NEXT j
DATA 1,1.435756,1.740556,1.611684,1
FOR j = 1 TO 5
  READ nf(j)
NEXT j
DATA 1,1.440608,1.755353,1.631939,1
FOR j = 2 TO 4
  nu(j) = (ne(j) - 1) / (nf(j) - nc(j)): PRINT "nu="; nu(j)
  P(j) = (nf(j) - ne(j)) / (nf(j) - nc(j)): PRINT "P="; P(j)
  INPUT A$
NEXT j
FOR j = 2 TO 4
  dn(j) = nf(j) - nc(j)
NEXT j
e = (nu(2) * (P(3) - P(4)) + nu(3) * (P(4) - P(2)) + nu(4) * (P(2) - P(3))) / (nu(2) - nu(4))
PRINT "E="; e
ct = 1 / f / e / (nu(2) - nu(4))
ca = ct * (P(3) - P(4)) / dn(2): PRINT "ca="; ca
cb = ct * (P(4) - P(2)) / dn(3): PRINT "cb="; cb
cc = ct * (P(2) - P(3)) / dn(4): PRINT "cc="; cc
fa = 1 / ca / (ne(2) - 1): PRINT "fa="; fa
fb = 1 / cb / (ne(3) - 1): PRINT "fb="; fb
fc = 1 / cc / (ne(4) - 1): PRINT "fc="; fc
pa = 0: pb = 1 / fa: PRINT "pb="; pb: pc = (fa + fb) / fa / fb: PRINT "pc="; pc
c(1) = 0.6*ca
c(2) = c(1) - ca: c(3) = c(2) - cb: c(4) = c(3) - cc: PRINT "c1="; c(1)
FOR j = 1 TO 4
  r(j) = 1 / c(j)
  PRINT "r("; j; ")="; r(j)
NEXT j
sep(1) = ne(2) * r(1) / (ne(2) - ne(1)): PRINT "s'(1)="; sep(1)
FOR j = 1 TO 3
  IF r(j) > 0 AND r(j + 1) < 0 THEN
    D(j) = 1.5 + ABS(r(j)) + ABS(r(j + 1)) - (SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) + SQR(r(j + 1) ^ 2 - D# ^ 2 / 4))
  END IF
  IF r(j) > 0 AND r(j + 1) > 0 AND ABS(r(j)) < ABS(r(j + 1)) THEN
    D(j) = 1.5 + r(j) - r(j + 1) - (SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) - SQR(r(j + 1) ^ 2 + D# ^ 2 / 4))
  END IF
  IF r(j) > 0 AND r(j + 1) > 0 AND ABS(r(j)) > ABS(r(j + 1)) THEN
    D(j) = 1.5
  END IF
  IF r(j) < 0 AND r(j + 1) > 0 THEN
    D(j) = 1.5
  END IF
  IF r(j) < 0 AND r(j + 1) < 0 AND ABS(r(j)) > ABS(r(j + 1)) THEN
    D(j) = 1.5 + ABS(r(j + 1)) - ABS(r(j)) - (SQR(r(j + 1) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) - SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4))
  
```

```

END IF
IF r(j) < 0 AND r(j + 1) < 0 AND ABS(r(j)) < ABS(r(j + 1)) THEN
D(j) = 1.5
END IF
PRINT "d("; j; ")="; D(j)
NEXT j
FOR j = 2 TO 4
se(j) = sep(j - 1) - D(j - 1)
PRINT "s("; j; ")="; se(j)
sep(j) = ne(j + 1) * se(j) * r(j) / (r(j) * ne(j) + (ne(j + 1) - ne(j)) * se(j))
PRINT "s'("; j; ")="; sep(j)
NEXT j
fprim = sep(1) * sep(2) * sep(3) * sep(4) / se(2) / se(3) / se(4)
PRINT "f="; fprim: PRINT "s'(4)="; sep(4)

```

Față de recomandările din literatură pentru prima curbura ($c_1=(0.6...0.8)c_a$) s-a încercat și varianta $c_1=0.5 c_a$. Toate tripletele au fost proiectate pentru distanța focală egală cu 100 mm, distanța obiect infinită și semiunghiul de câmp de 5° . Analiza celor 88 de sisteme rezultate s-a realizat cu ajutorul softului OSLO LT. Ca parametri sintetici de apreciere a calității s-au evidențiat valorile RMS OPD și raportul Strehl. Determinarea parametrilor de calitate s-a făcut pentru diverse deschideri ale subansamblului, începând cu $f'/10$ și continuând cu $f'/8$, $f'/7$, $f'/6.25$, $f'/5$, $f'/4$, până la apertura pentru care raportul Strehl era mai mic decât 0.2. În cazul celei mai mari deschideri cu parametri de calitate corespunzători s-au prezentat curbele care caracterizează aberația cromatică și spectrul secundar.

Pentru analiză, sistemele au fost preluate cu datele furnizate de programul de proiectare, fără nici o modificare. Nu s-a intervenit asupra valorilor razelor sau grosimilor pentru a aduce sistemul la o valoare a distanței focale care să prezinte o abatere redusă, impusă, față de valoarea inițială de 100 mm. În Anexa 1 sunt prezentate sub formă tabelară toate cele 88 de soluții de triplete proiectate, cu date complete geometrice și caracteristici de referință.

La etapa de analiză automată cu programul OSLO, de asemenea, nu s-a apelat la optimizarea prin modificări ale geometriei, ci s-a recurs numai la optimizarea prin defocusare.

Tabelul 4.1 prezintă rezultatele sintezei și analizei sistemelor obținute. Coloana 1 conține sorturile de materiale optice, caracteristicile de refracție și dispersie ale acestora și, dacă este cazul, curbele de sferocromatism și variația cromatică a focarului. Coloana 2 evidențiază forma constructivă a lentilelor componente ale tripletului rezultat. Cele șapte forme constructive sunt redată în figura 4.1, iar în tabel sunt indicate prin numărul de ordine din figură.

Coloana 3 indică raportul dintre prima curbura a primei lentile și curbura totală a acesteia. Următoarele două coloane, 4 și 5, conțin valorile numărului de deschidere și, respectiv, a înălțimii de incidență, în milimetri. Ultimele două coloane, 6 și 7, pun în evidență calitatea

soluției prin valorile RMS OPD, respectiv ale raportului Strehl. Sunt marcate prin culoare gri liniile care conțin soluții performante. Dintre acestea, cu galben sunt evidențiate variantele pentru care s-au inclus și reprezentările grafice.

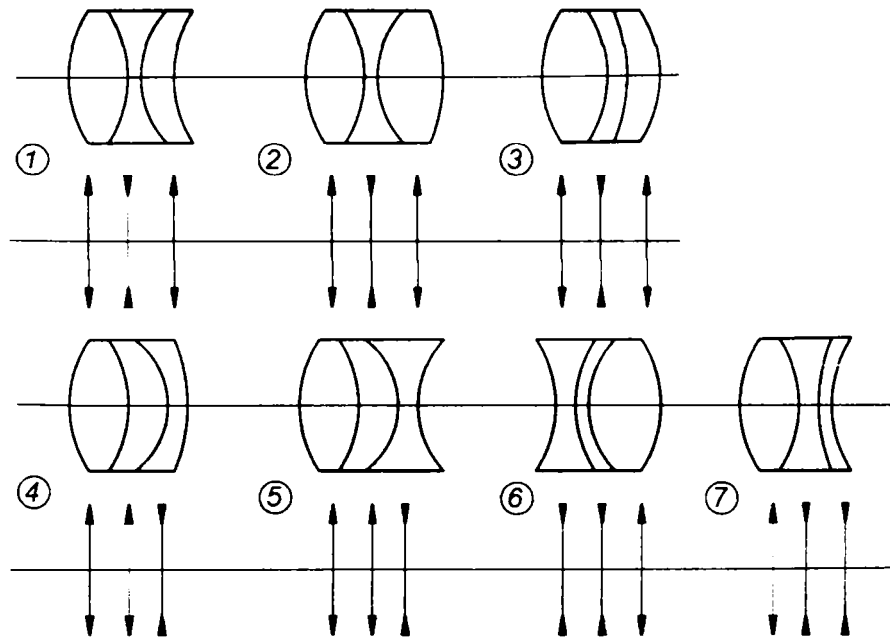
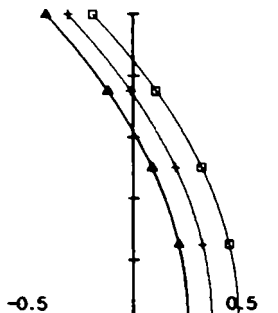
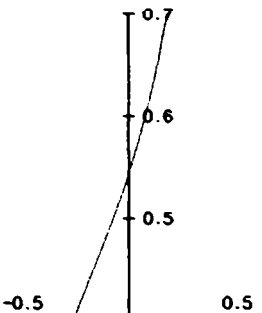
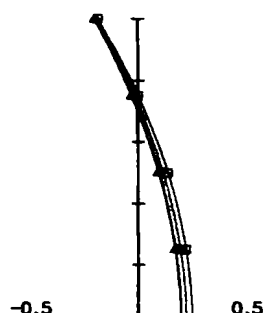
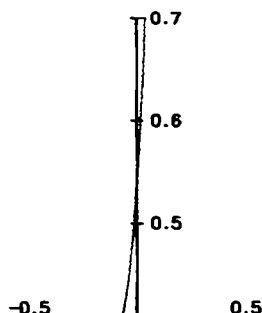
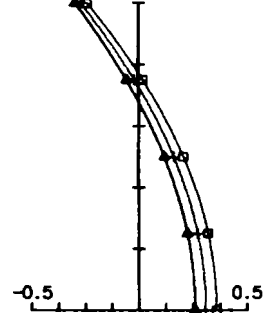
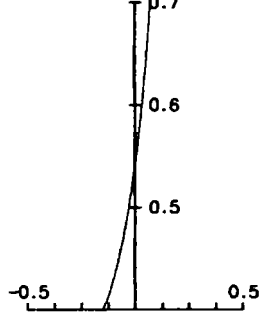
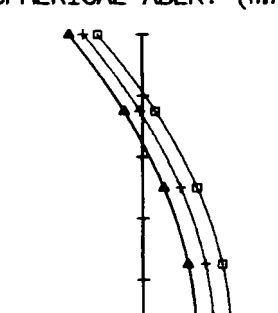
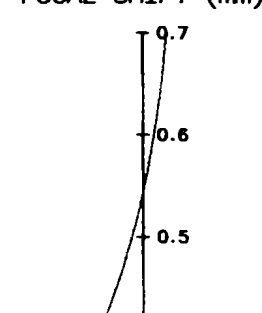


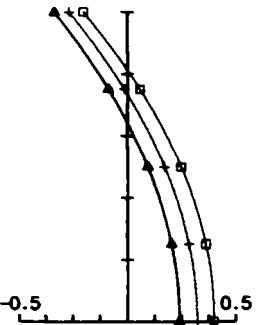
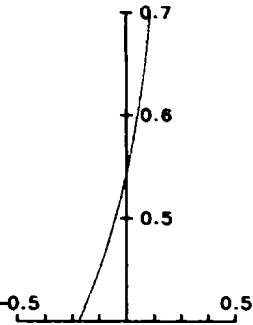
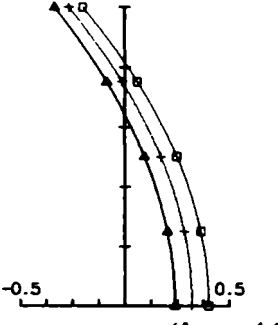
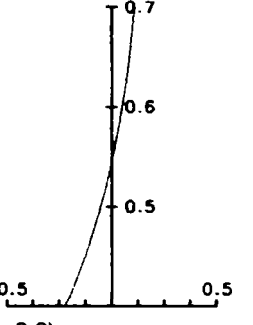
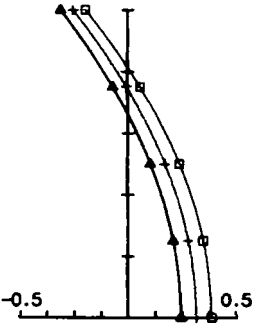
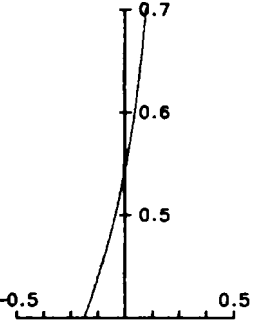
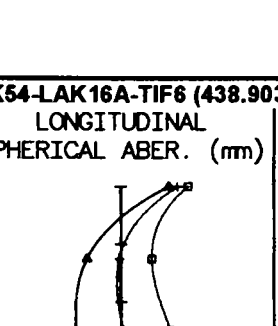
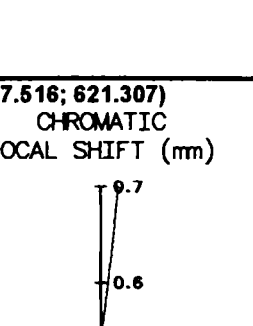
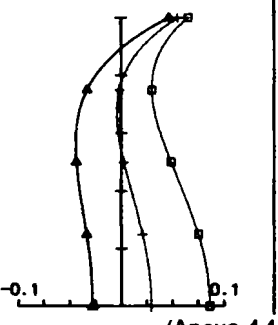
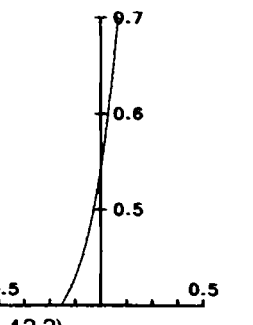


Fig.4.1. Forme constructive ale tripletelor obținute prin sinteză cu diverse combinații de materiale și valori diferite ale primei curburi

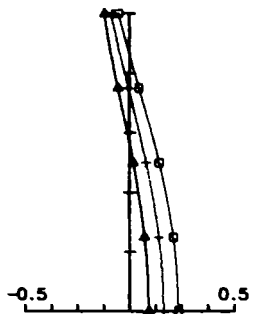
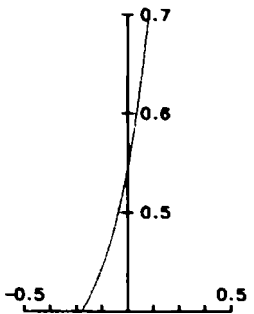
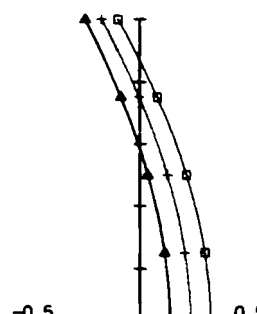
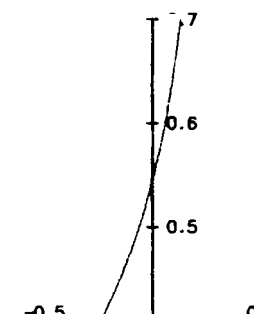
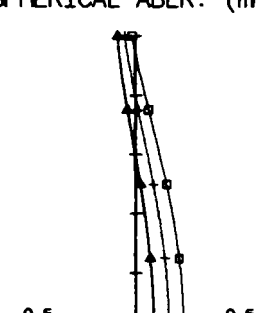
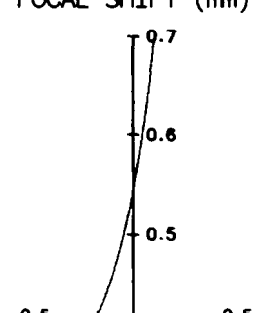
Tabelul 4.1

$f=100, s=-\infty, \omega=5^\circ$										
Nr. crt.	sorturi		forma	c_1/c_2	f/D	h (mm)	RMS OPD	Strehl		
0	1		2	3	4	5	6	7		
1	FK51-KZFS1-TIF6 (488.841; 616.483; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)	CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)	2	0.5	1/10	5	0.016	0.963		
					1/8	6.25	0.025	0.948		
					1/7	7	0.033	0.929		
					1/6.25	8	0.09	0.85		
					1/5	10	0.124	0.567		
					1/4	12	0.318	0.124		
			1	0.6	1/10	5	0.036	0.948		
					1/8	6.25	0.077	0.785		
					1/7	7	0.116	0.527		
					1/6.25	8	0.193	0.222		
					1/10	5	0.086	0.745		
					1/8	6.25	0.195	0.239		
1	0.7	1/10	5	0.054	0.413					
		1/8	6.25	0.351	0.114					
2	FK51-KZFSN2-TIF6 (488.841; 561.540; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)	CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)	1	0.5	1/10	5	0.151	0.351		
					1	0.6	1/10	5	0.079	0.781
							1/8	6.25	0.164	0.371
					1	0.7	1/10	5	0.08	0.222
							1	0.8	1/10	5

3	FK52-KZFSN2-TIF6 (487.814; 561.540; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)  CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)  (Anexa 4.1 poz. 3.2)	1	0.5	1/10	5	0.190	0.178
		1	0.6	1/10	5	0.086	0.755
				1/8	6.25	0.177	0.332
		1	0.7	1/10	5	0.16	0.6
		1	0.8	1/10	5	0.341	0.131
4	FK54-BK3-TIF6 (438.903; 500.649; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)  CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)  (Anexa 4.1 poz. 3.2)	7	0.5	1/10	5	0.183	0.268
		7	0.6	1/10	5	0.148	0.442
				1/8	6.25	0.328	0.113
		7	0.7	1/10	5	0.362	0.126
		7	0.8	1/10	5	0.559	0.088
5	FK54-KZFS1-TIF6 (438.903; 616.483; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)  CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)  (Anexa 4.1 poz. 5.2)	3	0.5	1/10	5	0.015	0.964
				1/8	6.25	0.033	0.929
				1/7	7	0.051	0.869
				1/5	8	0.08	0.5
				1/5	10	0.249	0.180
		2	0.6	1/10	5	0.027	0.970
				1/8	6.25	0.061	0.854
				1/7	7	0.095	0.683
				1/6.25	8	0.159	0.337
		1	0.7	1/10	5	0.080	0.188
		1/8	6.25	0.765	0.241		
1	0.8	1/10	5	0.150	0.405		
6	FK54-KZFS6-TIF6 (438.903; 595.483; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)  CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)  (Anexa 4.1 poz. 6.2)	4	0.5	1/10	5	0.030	0.963
				1/8	6.25	0.064	0.848
				1/7	7	0.096	0.685
				1/6.25	8	0.159	0.352
		7	0.6	1/10	5	0.043	0.926
				1/8	6.25	0.093	0.700
				1/7	7	0.141	0.440
		4	0.7	1/10	5	0.040	0.932
				1/8	6.25	0.086	0.739
				1/7	7	0.130	0.503
5	0.8	1/10	5	0.055	0.887		
		1/8	6.25	0.120	0.560		
		1/7	7	0.184	0.268		
7	FK54-KZFSN2-SF57 (438.903; 561.540; 855.236) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)  CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)  (Anexa 4.1 poz. 7.2)	2	0.5	1/10	5	0.139	0.398
		1	0.6	1/10	5	0.073	0.805
				1/8	6.25	0.159	0.370
		1	0.8	1/10	5	0.174	0.332
		1	0.8	1/10	5	0.312	0.142

8	FK54-KZFSN2-SF58 (438.903; 561.540; 928.213) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm) 	CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm) 	2	0.5	1/10	5	0.153	0.323
			1	0.6	1/10	5	0.073	0.803
(Anexa 4.1 poz. 8.2)					1/8	6.25	0.158	0.375
			1			5		0.2
			1	0.8	1/10	5	0.322	0.147
9	FK54-KZFSN2-SF59 (438.903; 561.540; 963.202) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm) 	CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm) 	2	0.5	1/10	5	0.167	0.254
			7	0.6	1/10	5	0.073	0.803
(Anexa 4.1 poz. 9.2)					1/8	6.25	0.158	0.377
			1	0.7	1/10	5	0.73	0.333
			1	0.8	1/10	5	0.326	0.149
10	FK54-KZFSN2-TIF6 (438.903; 561.540; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm) 	CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm) 	2	0.5	1/10	5	0.084	0.707
					1/8	6.25	0.134	0.441
(Anexa 4.1 poz. 10.2)					1/7	7	0.173	0.266
			1	0.6	1/10	5	0.067	0.832
					1/8	6.25	0.48	0.408
			1	0.7	1/10	5	0.158	0.379
			1	0.8	1/10	5	0.278	0.138
11	FK54-KZFSN9-TIF6 (438.903; 602.467; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm) 	CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm) 	2	0.5	1/10	5	0.031	0.926
					1/8	6.25	0.058	0.834
(Anexa 4.1 poz. 11.2)					1/7	7	0.085	0.711
					1/6.25	8	0.141	0.463
			1	0.6	1/10	5	0.125	0.481
			1	0.7	1/10	5	0.104	0.641
			1	0.8	1/10	5	0.193	0.252
12	FK54-LAK16A-TIF6 (438.903; 737.516; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm) 	CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm) 	3	0.5	1/10	5	0.207	0.228
					1/10	5	0.028	0.970
(Anexa 4.1 poz. 12.2)					1/8	6.25	0.039	0.942
			2	0.6	1/7	7	0.45	0.923
					1/6.25	8	0.052	0.896
			1	0.7	1/10	5	0.113	0.594
			1	0.8	1/10	5	0.579	0.070

13	FK54-LAK28-TIF6 (438.903; 748.506; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)		CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)		3	0.5	1/10	5	0.081	0.729					
							1/8	6.25	0.729	0.240					
					2	0.6	1/10	5	0.028	0.975					
							1/8	6.25	0.035	0.951					
							1/7	7	0.041	0.935					
							1/6.25	8	0.052	0.899					
							1/5	10	0.119	0.550					
					1	0.7	1/10	5	0.106	0.632					
							1/8	6.25	0.245	0.135					
					1	0.8	1/10	5	0.228	0.166					
(Anexa 4.1 poz. 13.2)															
14	FK54-LAK31-TIF6 (438.903; 700.562; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)		CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)		3	0.5	1/10	5	0.134	0.472					
							1/10	5	0.042	0.935					
					1	---	1/8	6.25	0.064	0.855					
							...	7	---	---					
							1/6.25	8	0.098	0.700					
							1/5	10	0.111	0.658					
							1	0.7	1/10	5	0.155	0.393			
					1	0.8	1/10	5	0.315	0.113					
					(Anexa 4.1 poz. 14.2)										
					15	FK54-LAK33-TIF6 (438.903; 757.522; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)		CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)		3	0.5	1/10	5	0.101	0.627
		1/10	5	0.029						0.967					
2	0.6	1/8	6.25	0.042						0.933					
		1/7	7	0.051						0.899					
		1/6.25	8	0.073						0.803					
		1	0.7	1/10						5	0.115	0.264			
		1	0.8	1/10						5	0.249	0.138			
(Anexa 4.1 poz. 15.2)															
16	FK54-LAK8-TIF6 (438.903; 716.536; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)		CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)							3	0.5	1/10	5	0.097	0.649
												1/10	5	0.033	0.957
					2	---	1/8	6.25	0.049	0.911					
							/	7	---	9					
							1/6.25	8	0.067	0.843					
							1/5	10	0.085	0.741					
							1	0.7	1/10	5	0.180	0.507			
					1	0.8	1/10	5	0.271	0.130					
					(Anexa 4.1 poz. 16.2)										

17	FK54-LAK9-TIF6 (438.903; 694.545; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)  CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)  (Anexa 4.1 poz. 17.2)	3	0.5	1/10	5	0.099	0.640
		1	0.6	1/10	5	0.039	0.940
				1/8	6.25	0.062	0.862
				1/7	7	0.08	0.92
				1/6.25	8	0.103	0.685
		1	0.7	1/10	5	0.148	0.424
1	0.8	1/10	5	0.301	0.126		
18	FK54-LAKL21-TIF6 (438.903; 643.596; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)  CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)  (Anexa 4.1 poz. 18.2)	3	0.5	1/10	5	0.075	0.783
		1	0.6	1/8	6.25	0.186	0.237
				1/10	5	0.066	0.841
				1/8	6.25	0.136	0.555
				1/7	7	0.191	0.313
		1	0.7	1/10	5	0.207	0.234
1	0.8	1/10	5	0.395	0.107		
19	FK54-LAKN14-TIF6 (438.903; 700.552; 621.307) LONGITUDINAL SPHERICAL ABER. (mm)  CHROMATIC FOCAL SHIFT (mm)  (Anexa 4.1 poz. 19.2)	3	0.5	1/10	5	0.081	0.750
		1	0.6	1/8	6.25	0.204	0.186
				1/10	5	0.039	0.942
				6.25	6	7	
				1/7	7	0.074	0.812
				1/6.25	8	0.096	0.720
1/5	10			0.113	0.687		
1	0.7	1/10	5	0.147	0.437		
1	0.8	1/10	5	0.300	0.125		
20	KZFS7A-SF57-TIF6 (685.371; 855.236; 621.307)	6	0.5	1/10	5	0.140	0.505
		6	0.6	1/8	6.25	0.225	0.255
				1/10	5	0.168	0.396
				1/10	5	0.187	0.340
6	0.8	1/10	5	0.214	0.277		
21	KZFSN5-SF58-TIF6 (685.371; 928.213; 621.307)	6	0.5	1/10	5	0.291	0.174
		6	0.6	1/10	5	0.272	0.209
		6	0.7	1/10	5	0.456	0.101
		6	0.8	1/10	5	-	<0.1
22	KZFSN5-SF59-TIF6 (685.371; 963.202; 621.307)	6	0.5	1/10	5	-	<0.1
		6	0.6	1/10	5	0.356	0.137
		6	0.7	1/10	5	-	<0.1
		6	0.8	1/10	5	-	<0.1

Analizând datele din tabel se pot face următoarele observații:

- ◆ Pentru toate tripletele de materiale declarate compatibile prin programul de selecție propus există soluții pentru subansamblul apocromat lipit.
- ◆ Combinația de sorturi de sticle optice este cel mai important factor de influență

a calității subansamblului (pentru combinațiile 1-3 și 5-19 a rezultat cel puțin o soluție care satisface criteriul Rayleigh). Tripletele de materiale 4 și 20-22 nu au condus la soluții de calitate, pe baza algoritmului utilizat.

◆ *Obținerea soluțiilor performante presupune asocierea unui sort din familia florcrown (FK 51 sau FK 54 – cu indice de refracție mic, $n < 1.5$ și număr Abbe mare, $\nu > 80$) cu un sort din familia flint special scurt (KZFS1, KZFSN2, KZFSN9 – cu indice de refracție și numărul Abbe de valori medii, $n = 1.56 \dots 1.62$, $\nu = 46 \dots 56$) și un sort din familia flint titan (TIF6 – cu indice de refracție mediu, $n = 1.62$ și număr Abbe mic, $\nu = 30.7$). Soluțiile cele mai bune cu forme globale biconvexe (formele 2, 3 și 4 din figura 4.1) se obțin din combinații FK-KZFS-TIF. Tripletele FK-KZFSN-TIF determină, în general, forme globale menisc (forma 1 în figura 1.4); pentru lentila centrală există alternativa alegerii unui sort din familia crown lanthan (LAK31, LAK8, LAK9, LAKN14 – cu indice de refracție mare, $n = 1.70 \dots 1.75$ și număr Abbe mediu, $\nu = 50 \dots 60$). Sistemele care conțin un sort LAK (de formă 1 sau 2) reprezintă, de fapt, soluțiile cele mai bune calitativ.*

◆ *Sorturile menționate ca favorabile combinațiilor compatibile pentru apocromazie sunt materiale mai noi, care încă au un preț foarte ridicat (de exemplu un semifabricat din sortul FK51, cu diametrul de cca. 15 cm costa la nivelul anului 2002 aproximativ 2500\$, iar sorturile din familia KZFSN – 840\$). Cu toate acestea, utilizarea lor este indispensabilă, cel puțin în unele aplicații, cum ar fi obiectivele instrumentelor afocale astronomice. Se observă că includerea în combinație a unor sorturi tradiționale din familia flintului greu (SF) sau borosilicat (BK) conduce la obținerea unor soluții slabe calitativ.*

◆ *Tripletul de sorturi impune în mare măsură forma subansamblului (de exemplu, combinațiile 2 și 3 conduc întotdeauna la forma constructivă 1 (lentilă convergentă biconvexă - lentilă divergentă biconcavă – lentilă convergentă menisc), care nu asigură o bună calitate a sistemului decât, eventual la deschiderea minimă.*

◆ *Forma lentilelor componente și performanțele sistemului depind de valorile efective ale razelor, care sunt controlate prin impunerea primei curburii. Recomandările din literatură – atunci când există – indică alegerea acesteia în intervalul $(0.6 \dots 0.8)c_a$, dar nu sunt pe deplin justificate de analiza sistemelor prezentate în tabel. Se observă că pentru $c_1 = 0.7c_a$ și $c_1 = 0.8c_a$ nu a rezultat, practic, nici o soluție corespunzătoare. Cele mai bune performanțe au rezultat pentru sistemele cu $c_1 = 0.6c_a$ (17 combinații). De asemenea, scăderea primei curburii la $c_1 = 0.5c_a$ a condus la găsirea a 7 combinații favorabile. Se propune, ca*

urmare, recomandarea de sinteză a tripletului apocromat cu impunerea primei curburi în intervalul $(0.5...0.6)c_a$.

◆ Majoritatea soluțiilor corespunzătoare calitativ pot fi utilizate eficient în intervalul de deschideri indicat de literatură: $f'/10...f'/8$. Pentru combinațiile cele mai favorabile de sorturi, care au ca element intermediar sticla KZFS1 sau sorturile din familia LAK apertura poate fi mărită, până la dublare (soluțiile 1, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 19).

◆ Din punct de vedere al distribuției puterilor optice pe lentile rezultă, funcție de sorturi și curburi, trei forme C-D-C (C- lentilă convergentă, D – lentilă divergentă) – formele 1, 2 și 3 din figura 4.1, două forme C-C-D (4 și 5 în figura 4.1), o formă D-D-C (6 în figura 4.1) și o formă C-D-D (7 în figura 4.1). Cele mai avantajoase sunt formele C-D-C, în ordinea 3, 2, 1, urmate de 4 (C-C-D), 7 (C-D-D) și 5 (C-C-D), în timp ce lentila divergentă în față, la forma 6 (D-D-C) nu prezintă interes.

◆ Fiecare soluție determinată – patru raze și trei grosimi - , practic, nu mai poate fi îmbunătățită (având în vedere faptul că s-a apelat deja la optimizarea prin defocusare, respectiv găsirea celui mai bun plan de punere la punct a imaginii). Încercările de corectare a razelor – indiferent dacă se intervine asupra uneia, a unui grup sau a tuturor celor patru raze disponibile – nu influențează alura aberației sferice longitudinale, ci determină doar deplasări ale curbelor de sferocromatism pe axa absciselor (și, desigur în funcție de incrementul de modificare a razei și semnul acestuia, introduce o scădere sau creștere a puterii). Același efect îl are variația grosimilor la centru a lentilelor, care pot constitui elemente potențiale de corecție. Ca urmare, pentru o soluție determinată, aberația sferică nu poate fi diminuată. În plus, alura curbelor de sferocromatism indică o creștere foarte rapidă a aberației cu valoarea absolută a înălțimii de incidență, astfel încât deschiderea este, de la caz la caz, limitată la $f'/10$ până la $f'/5$.

◆ Calitatea sistemelor obținute este impusă de valoarea aberației cromatice axiale paraxiale reziduale. Urmărind graficele atașate în tabel se observă că aberația cromatică axială este maximă pe axă și scade odată cu înălțimea până la anulare, în punctul de apocromazie unde curbele F' , e și C' se intersectează. De remarcat este faptul că acest punct, în majoritatea cazurilor nu se află în zona deschiderii utile, ci la înălțimi mai mari, care corespund deschiderii $f'/6.25...f'/4$. Din acest motiv, aparent, pentru unele soluții au aluri aproape paralele pe deschiderea utilă. Aberațiile cromatice reziduale se manifestă inevitabil, având în vedere că algoritmul se bazează pe teoria lentilelor infinit subțiri, respectiv a aberațiilor de ordinul III. Toleranța pentru cromatismul paraxial rezidual, conform

criteriului Rayleigh la deschiderea $f/10$, trebuie să se afle în jurul valorii de ± 0.22 mm. Se observă că toate soluțiile din tabel apreciate ca fiind corespunzătoare calitativ se încadrează în intervalul (0.05...0.25) mm. Se menționează, de asemenea, că, cu cât este mai mic cromatismul paraxial, cu atât deschiderea utilă este mai mare și înălțimea de apocromazie mai mică (tripletele 1, 5, 6, 12, 13, 14, 15, 16, 19). Din punct de vedere al aberației sferice, majoritatea soluțiilor (1, 2, 3, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 17, 18, 19) sunt supracorectate până aproximativ la deschiderea zonală și devin subcorectate spre margine. Sistemele cele mai bune (12, 14, 16) au o alură a curbei "e" asemănătoare acromatului, cu două puncte de intersecție a axei ordonate. Variația cromatică a focarului descrie, de fapt, spectrul secundar paraxial și, în mod ideal, ar trebui să fie o linie verticală. Practic, diferența absciselor corespunzătoare lungimilor de undă de 400 și 700 nm este egală cu cromatismul rezidual paraxial. Pentru studiul complet al spectrului secundar ar trebui trasate curbe de variație cromatică a abscisei imagine pentru mai multe înălțimi de incidență. Totuși, considerând ca referință focarul corespunzător liniei e, variația cromatică a focarului este o măsură suficientă pentru spectrului secundar, pentru că furnizează valorile maxime ale acestuia, având în vedere că pe axă diferențele dintre abscisele F'-e și C'-e sunt de valoarea cea mai mare.

◆ *Creșterea performanțelor soluțiilor mai slabe poate fi realizată prin alte metode, care implică schimbarea structurii tradiționale a tripletului lipit sau forma sferică a dioptrilor.*

Având în vedere elementele prezentate în tabelul 4.1 și observațiile de mai sus, se propun ca recomandări de triplete apocromate performante, cu indicarea combinației de sorturi, a primei curburi optime și a deschiderii maxime de utilizare, soluțiile marcate în tabelul 4.2 prin simbolul "x". Toate tripletele înscrise în tabel reprezintă soluții limitate la difracție, cu $\text{Strehl} \geq 0.8$ și având caracteristicile: distanță focală egală cu 100 mm, distanță obiect infinită și semiunghi de câmp de 5° .

Valorile efective ale razelor și grosimilor tripletelor apocromate marcate în tabel se găsesc în Anexa 4.1.

Informația din tabelul 4.2 atașată datelor concrete din Anexa 4.1 constituie o bază de date eficientă care poate fi oricând apelată, asigurând o reală economie de timp de lucru. Utilizarea sa poate fi extinsă cu succes pentru sisteme cu caracteristici apropiate, prin scalarea sistemelor de bază, urmând ca numai etapa de analiză să fie efectuată pentru validarea calității.

Tabelul 4.2

Combinăția de sorturi	c_1/c_2	$f'/10$	$f'/8$	$f'/7$	$f'/6.25$
FK51-KZFS1-TIF6	0.5	x	x	x	x
	0.6	x	x		
FK51-KZFSN2-TIF6	0.6	x			
FK52-KZFSN2-TIF6	0.6	x			
FK54-KZFS1-TIF6	0.5	x	x	x	
	0.6	x	x	x	
FK54-KZFS6-TIF6	0.5	x	x		
	0.6	x			
	0.7	x			
	0.8	x			
FK54-KZFSN2-SF57	0.6	x			
FK54-KZFSN2-SF58	0.6	x			
FK54-KZFSN2-SF59	0.6	x			
FK54-KZFSN2-TIF6	0.6	x			
FK54-KZFSN9-TIF6	0.5	x	x		
FK54-LAK16A-TIF6	0.6	x	x	x	x
FK54-LAK28-TIF6	0.6	x	x	x	x
FK54-LAK31-TIF6	0.6	x	x	x	
FK54-LAK33-TIF6	0.6	x	x	x	x
FK54-LAK8-TIF6	0.6	x	x	x	x
FK54-LAK9-TIF6	0.6	x	x	x	
FK54-LAKL21-TIF6	0.5	x			
	0.6	x			
FK54-LAKN14-TIF6	0.6	x	x	x	

Pentru fiecare dintre cele 88 de soluții obținute prin sinteză automată s-a efectuat analiza și optimizarea pentru deducerea celor mai bune performanțe ale fiecărui sistem. Aceste operații s-au realizat interactiv, cu ajutorul programului OSLO LT, versiunea 6.1, oferită de Lambda Research Corporation.

Se prezintă în continuare analiza și optimizarea unei soluții, cu evidențierea etapelor necesare pentru determinarea caracteristicilor de referință, a aberațiilor geometrice și cromatice tangențiale și sagitale, respectiv a parametrilor derivați din funcția optică de transfer și analiza frontului de undă. Se urmărește, de asemenea, ilustrarea modului de funcționare a modulelor programului.

S-a ales pentru analiză tripletul FK54-LAK31-TIF6. Datele de intrare se introduc în foaia de date a sistemului (fig.4.2), care conține: razele (pe coloana "RADIUS"), grosimile la centru (pe coloana "THICKNESS"), înălțimile de incidență pe dioptri (pe coloana "APERTURE RADIUS"), semideschiderea fasciculului incident ("Ent beam radius"), semiunghiul de câmp ("Field angle"), lungimea de undă de referință ("Primary waveln"), sorturile de sticle optice (pe coloana "GLASS") și numele sistemului ("Lens"). Introducerea datelor determină calculul automat al distanței focale imagine ("Efl") și al frontifocalei imagine sau abscisei imagine pentru distanță obiect finită, pe ultima linie ("IMS"), în celula corespunzătoare coloanei

"THICKNESS".

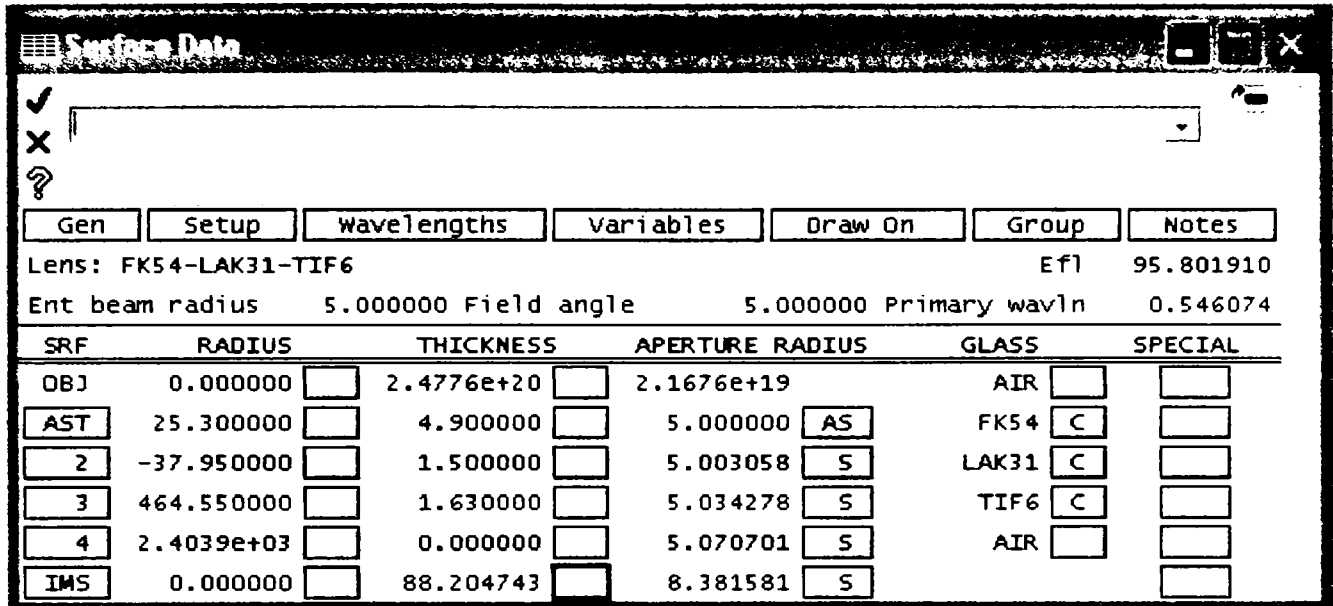


Fig.4.2. Foai de date a sistemului

Toate aceste elemente din fereastra de lucru interactivă "Surface data" pot fi salvate sub forma unui fișier *.txt din fereastra TW1, unde pot fi apelate din meniul "Len" și apar sub titlul "*LENS DATA" (fig.4.3).

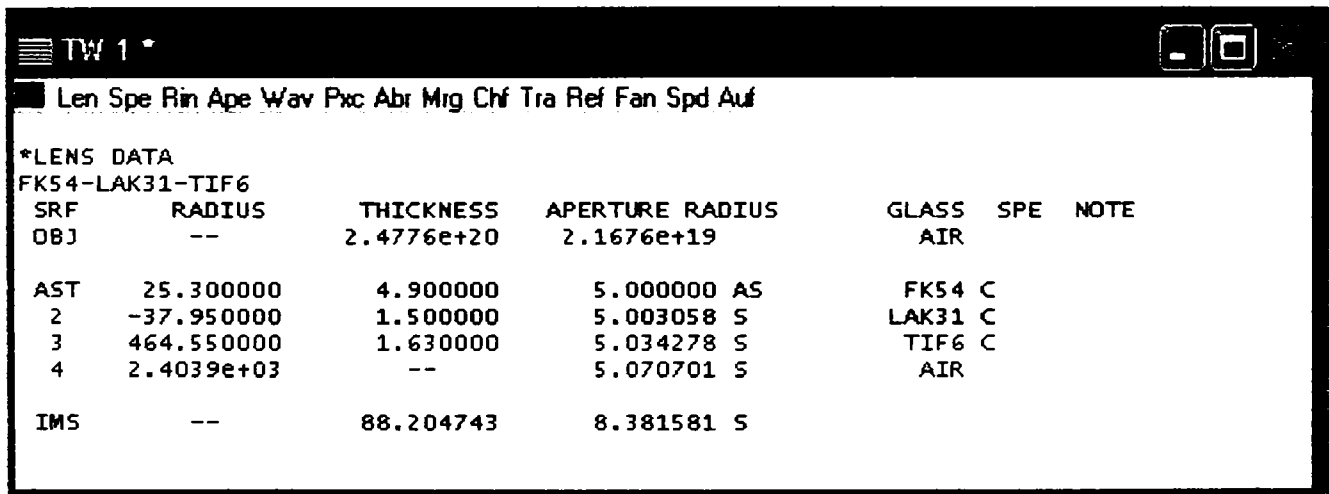


Fig.4.3. Datele sistemului redate sub forma text

Apelarea altor meniuri ale ferestrei TW1 returnează tot sub forma text caracteristicile sorturilor de materiale – comanda "Rin" - (fig.4.4), valorile lungimilor de undă de referință și de la marginea spectrului considerat – comanda "Wav" – (fig. 4.5) și caracteristicile paraxiale ale sistemului – comanda "Pcx" – (fig. 4.6).

Din fereastra interactivă "Surface data" se poate activa butonul "Draw on/off" pentru a vizualiza sistemul reprezentat la scară și mersul razelor pupilară principală și marginale (fig.4.7).

TW 1 *

Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mrg Chf Tra Ref Fan Spd Auf

*REFRACTIVE INDICES

SRF	GLASS	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	FK54	1.438151	1.440608	1.435756	90.306612	146.000000
2	LAK31	1.699677	1.706011	1.693563	56.207649	57.000000
3	TIF6	1.621182	1.631939	1.611683	30.667522	139.000000
4	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
5	IMAGE SURFACE					

Fig.4.4. Caracteristicile sorturilor de materiale

TW 1 *

Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mrg Chf Tra Ref Fan Spd Auf

*WAVELENGTHS

CURRENT	WV1/WW1	WV2/WW2	WV3/WW3
1	0.546074	0.479992	0.643850
	1.000000	1.000000	1.000000

Fig.4.5. Lungimile de undă de referință și de la marginile spectrului

TW 1 *

Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mrg Chf Tra Ref Fan Spd Auf

*PARAXIAL CONSTANTS

Effective focal length:	95.801910	Lateral magnification:	-3.8667e-19
Numerical aperture:	0.052191	Gaussian image height:	8.381581
Working F-number:	9.580191	Petzval radius:	-111.085915
Lagrange invariant:	-0.437443		

Fig.4.6. Caracteristicile paraxiale ale sistemului

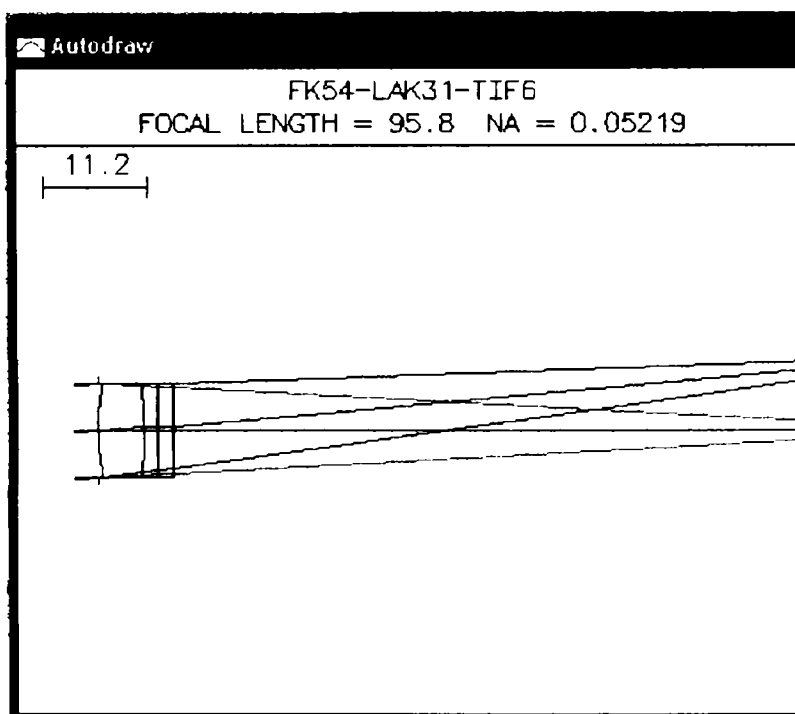


Fig.4.7. Reprezentarea la scară a sistemului și a mersului razelor

Modulul de analiză al programului permite evaluarea a diverși parametri de calitate a imaginii sistemului. În figura 4.8 sunt prezentate aberațiile geometrice și cromatice ale tripletului, având ca referință planul imagine paraxial, a cărei poziție este determinată de frontifocala imagine $s' = 88.204$.

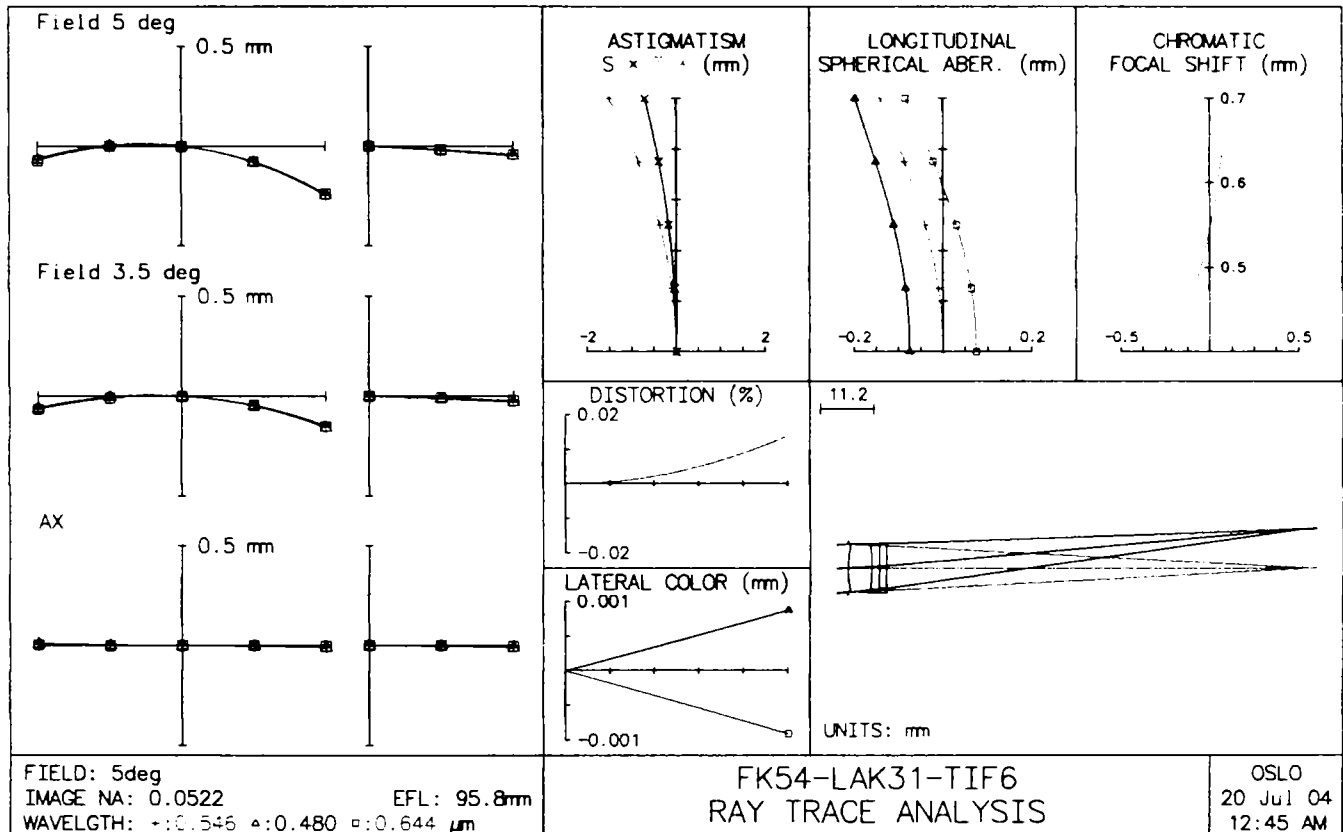


Fig.4.8. Aberațiile geometrice și cromatice raportate la un plan imagine de referință situat la abscisa determinată de frontifocala imagine

Cea mai importantă aberație reziduală în cazul tripletului apocromat este aberația sferică longitudinală, care la deschiderea maximă este de aproximativ 0.1 mm. Curbele de sferocromatism indică o aberație cromatică paraxială de cca. 0.15 mm, cu valori scăzătoare spre zona marginală. Variația cromatică a focarului $f(\lambda)$ – “Chromatic focal shift” – indică o comportare cromatică bună a sistemului, respectiv un spectru secundar redus (care poate fi dedus și din aspectul aproape paralel al curbelor de sferocromatism). În partea centrală, se află reprezentările grafice ale curburilor astigmatice de câmp în plan tangențial și sagital (sus), distorsiunea (mijloc) și aberația cromatică transversală extraaxială (jos), toate cu valori bune. În partea stângă sunt figurate curbele de interceptare a razelor în plan tangențial și sagital, pe axă, la 0.7 din câmp și la înclinarea maximă a fasciculului. Se observă valorile reduse ale aberațiilor transversale, corectarea spectrului secundar și absența vignetații pe întreg câmpul considerat. Din punct de vedere aberațional, sistemul poate fi considerat relativ bun, deși, intuitiv, se poate detecta ca sursă de creștere a calității imaginii o deplasare

axială a curbelor de sferocromatism, astfel încât repartiția aberației sferice pe înălțime să fie mai favorabilă.

Diagrama spot (fig.4.9), care relevă distribuția iluminării în planul imagine, utilizând metoda vectorială de trasare a razelor, aplicată pentru cele trei lungimi de undă de lucru, sugerează și ea o mică defocusare, de până la 0.1 mm față de abscisa paraxială.

Se observă influența foarte accentuată a înclinării razelor asupra mărimii petei de difuzie și a formei acesteia.

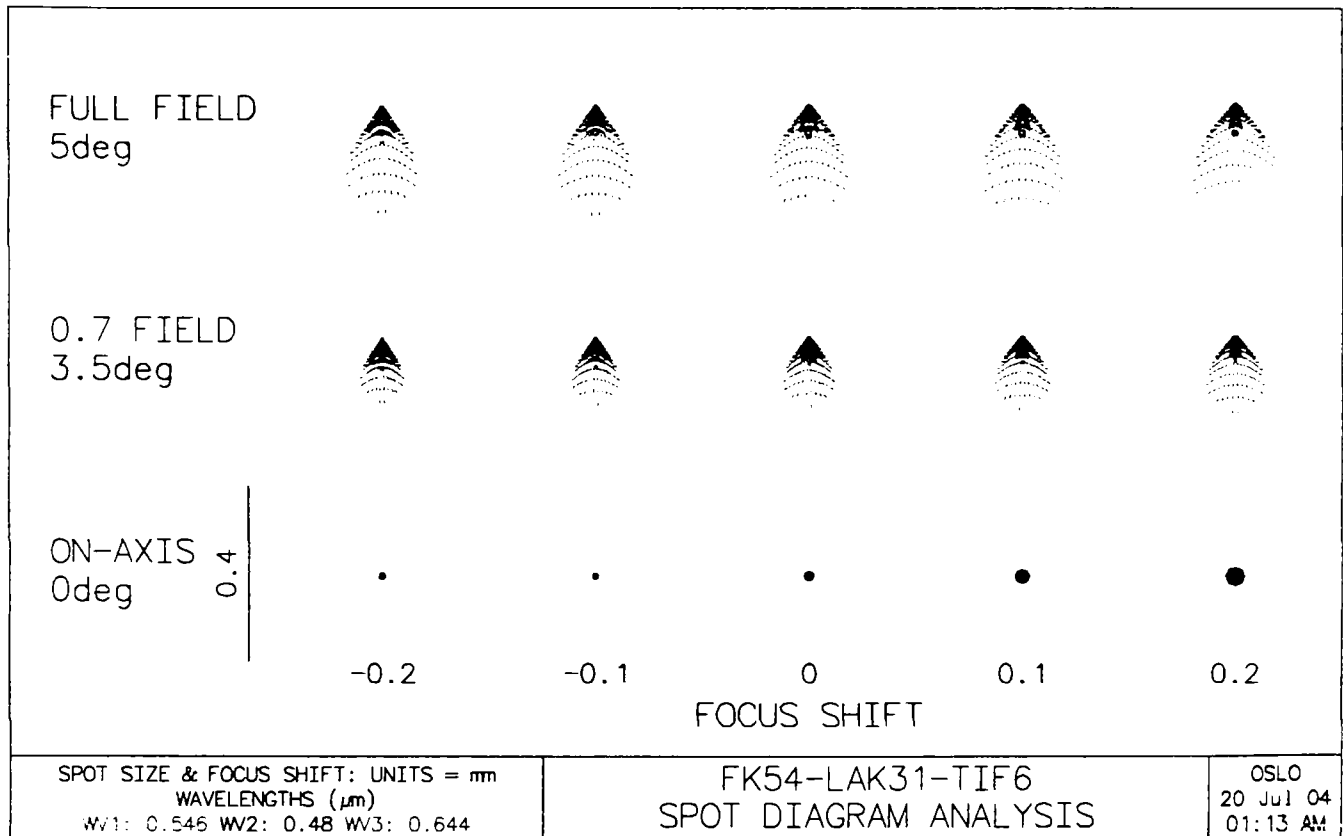


Fig.4.9. Diagrama spot a tripletului

Analiza frontului de undă indică o comportare bună a sistemului, dar valorile RMS OPD arată că nu este satisfăcut criteriul Reyleigh decât pe axă (fig. 4.10).

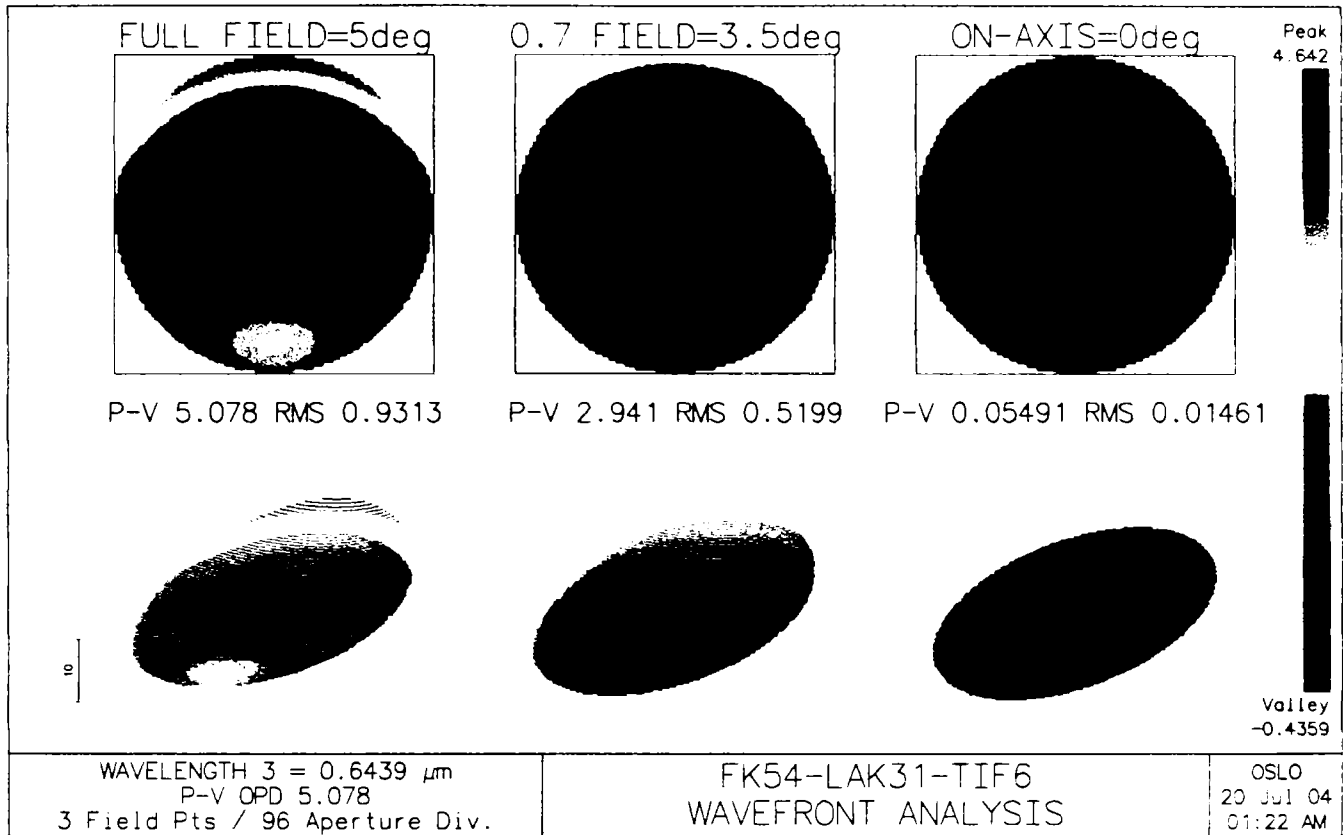


Fig. 4.10. Analiza frontului de undă, redat sub formă grafică

Prin calcul statistic, valorile caracteristice ale RMS OPD și raportului Strehl pe întreg câmpul sunt redată numeric în fereastra de afișare a datelor TW1 (fig.4.11).

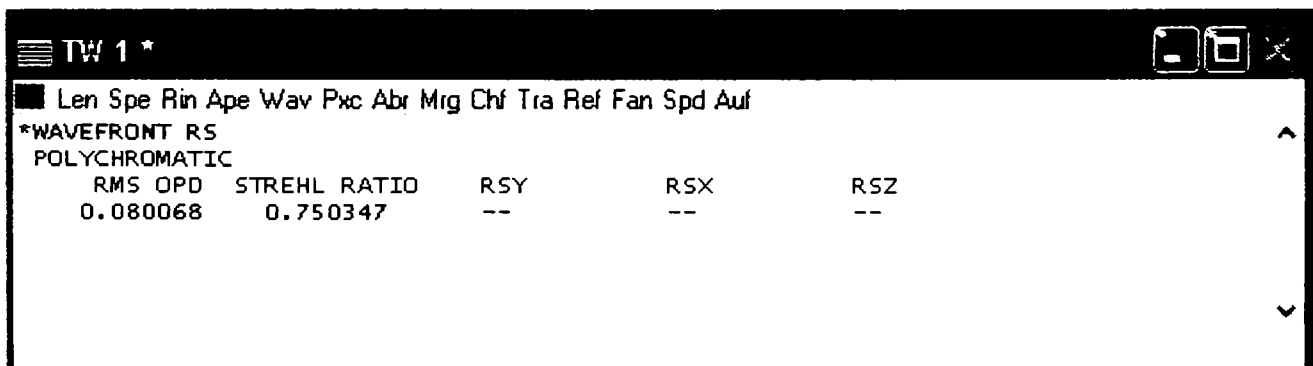


Fig. 4.11. Valorile parametrilor ondulatorii și energetici sintetici RMS OPD și raportul Strehl ale tripletului

Valorile acestor parametri indică necesitatea unei optimizări pentru aducerea sistemului la cea mai bună calitate. Posibilitățile de îmbunătățire a calității sunt cu atât mai mari cu cât corecturile necesare la valoarea parametrilor caracteristici sunt mai mici.

Observațiile de mai sus concordă cu rezultatele analizei difracționale a sistemului. În figurile următoare sunt redată: PSF (fig.4.12), MTF-PTF (fig.4.13) și distribuția LSF/KED (fig.4.15).

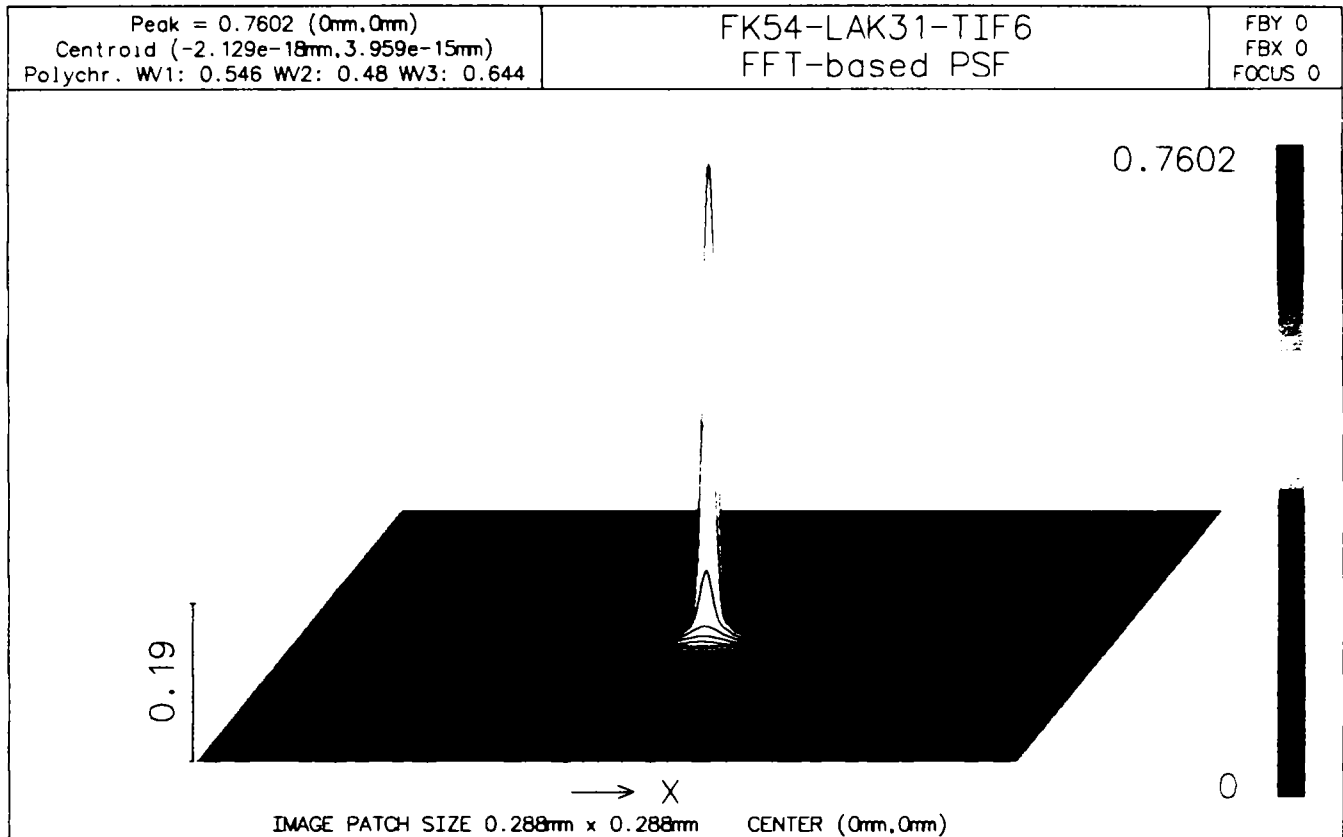


Fig.4.12. PSF

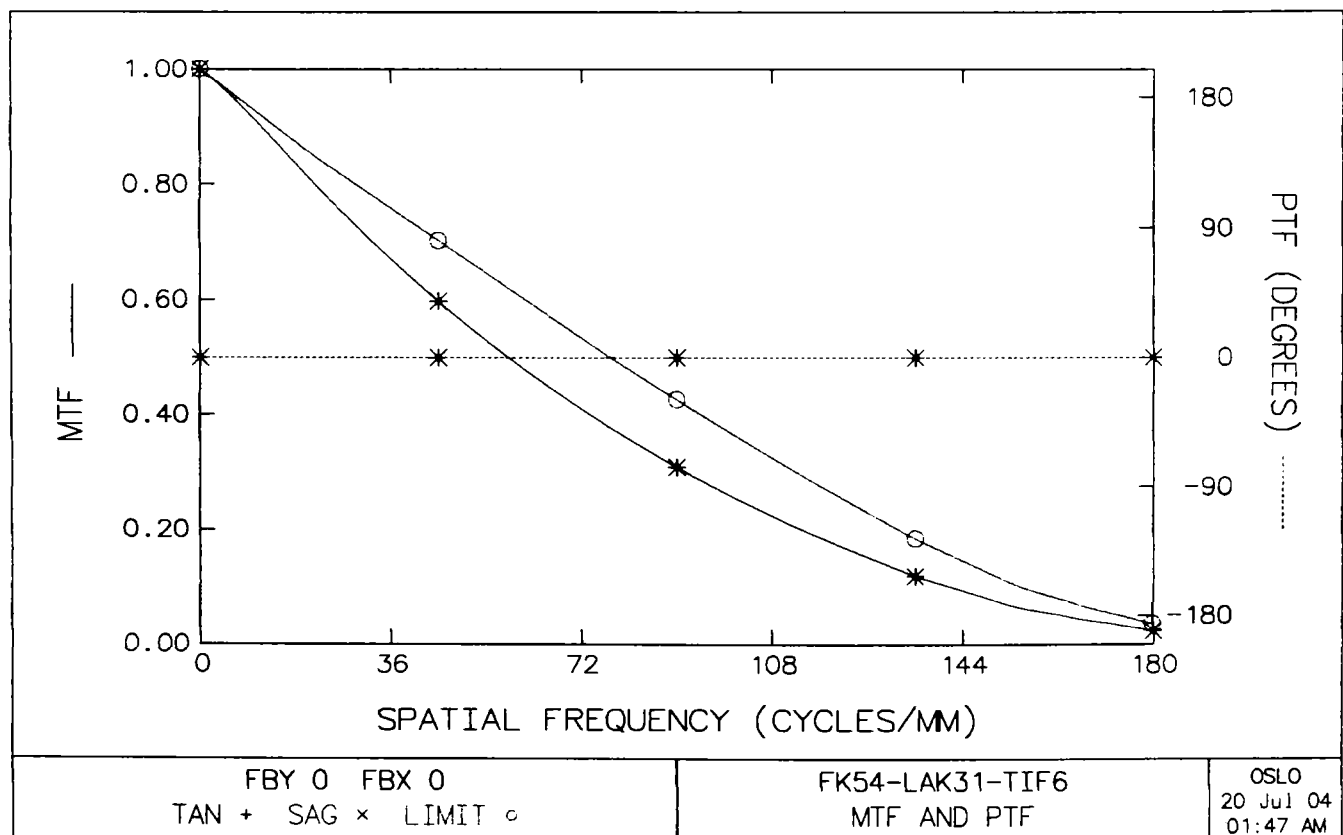


Fig.4.13. MTF, PTF

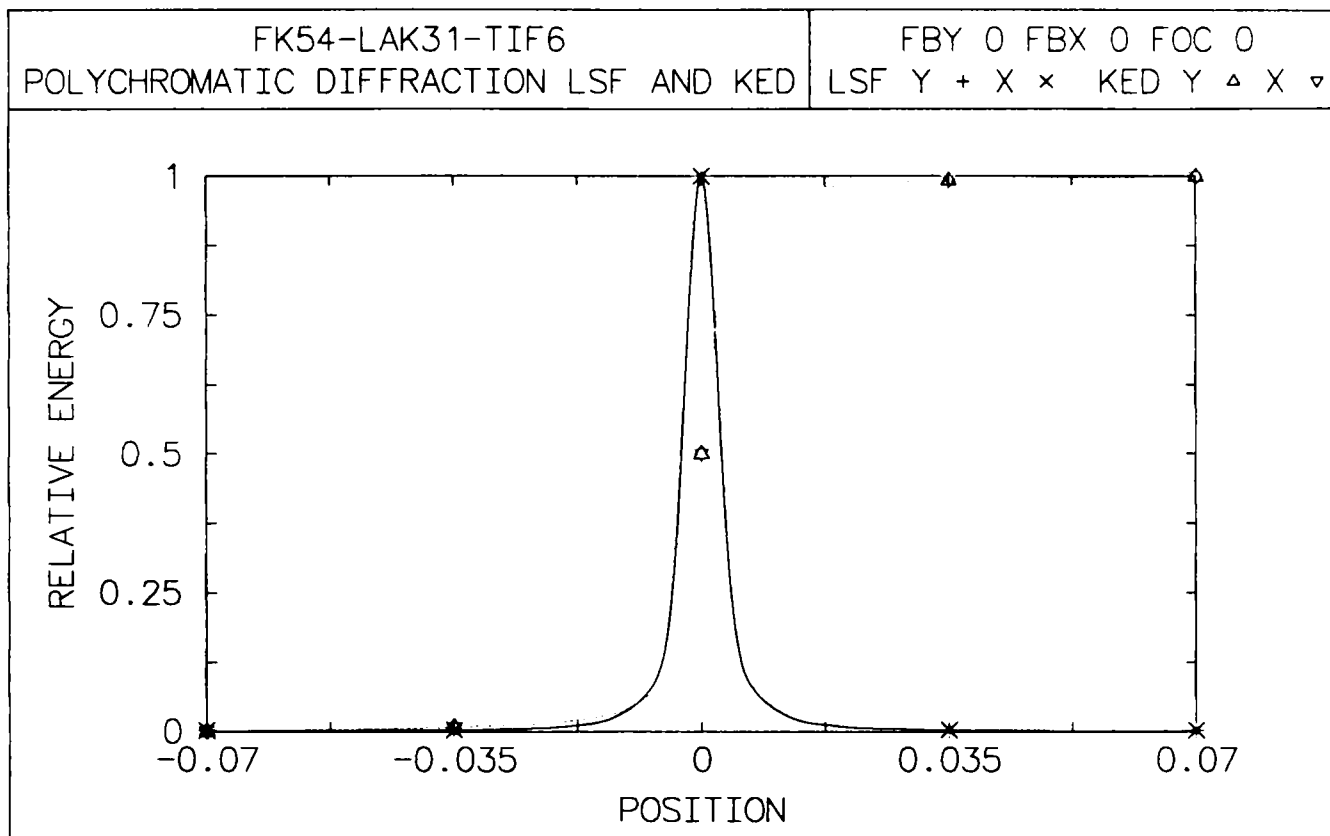


Fig.4.14. LSF/KED pentru sistemul ideal (calcul difracțional)

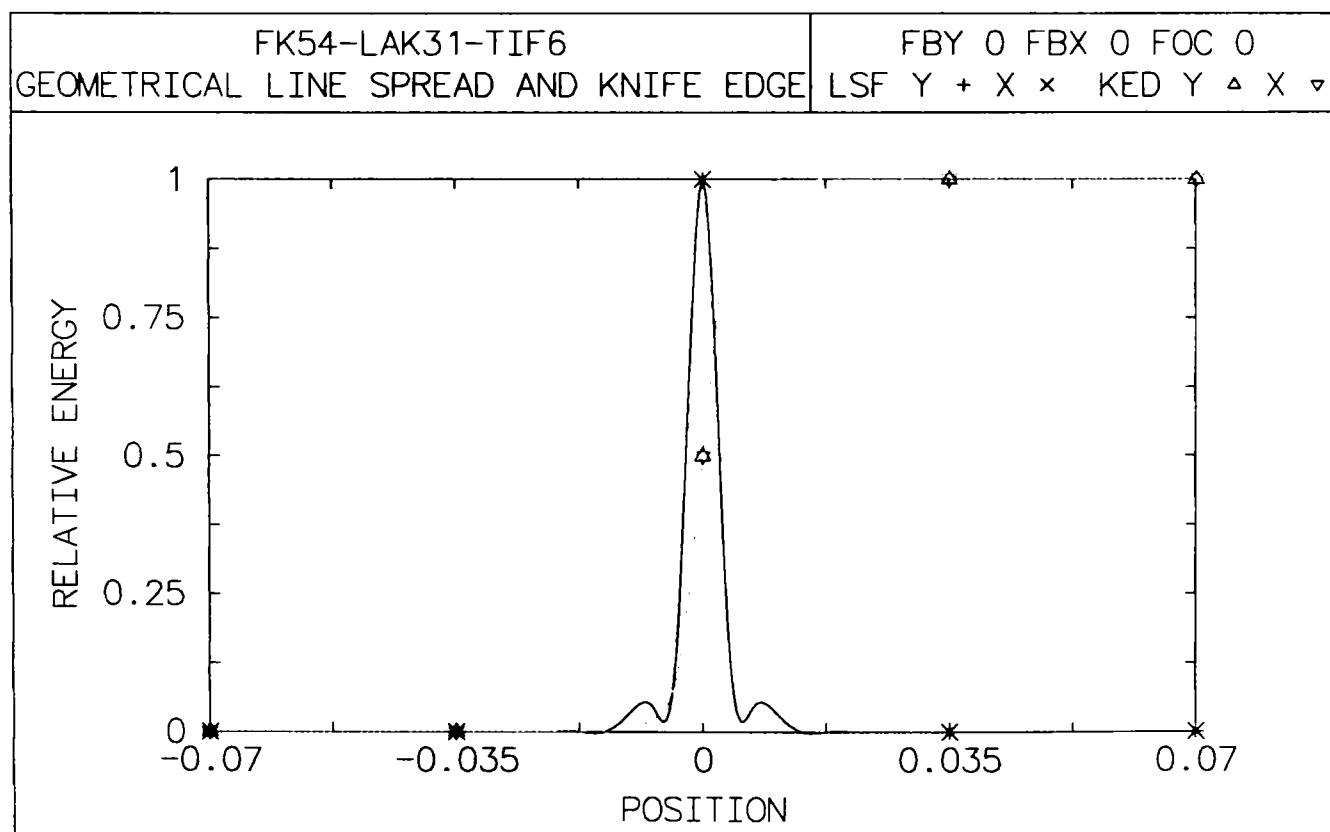


Fig.4.15. LSF/KED pentru sistemul real afectat de aberații (calcul geometric)

Urmărind posibilitățile de optimizare a sistemului se apelează modulul cu această destinație a programului, care permite determinarea abscisei pentru care pata de dispersie

sau parametrul RMS OPD este minimă pe axă (fig.4.16).

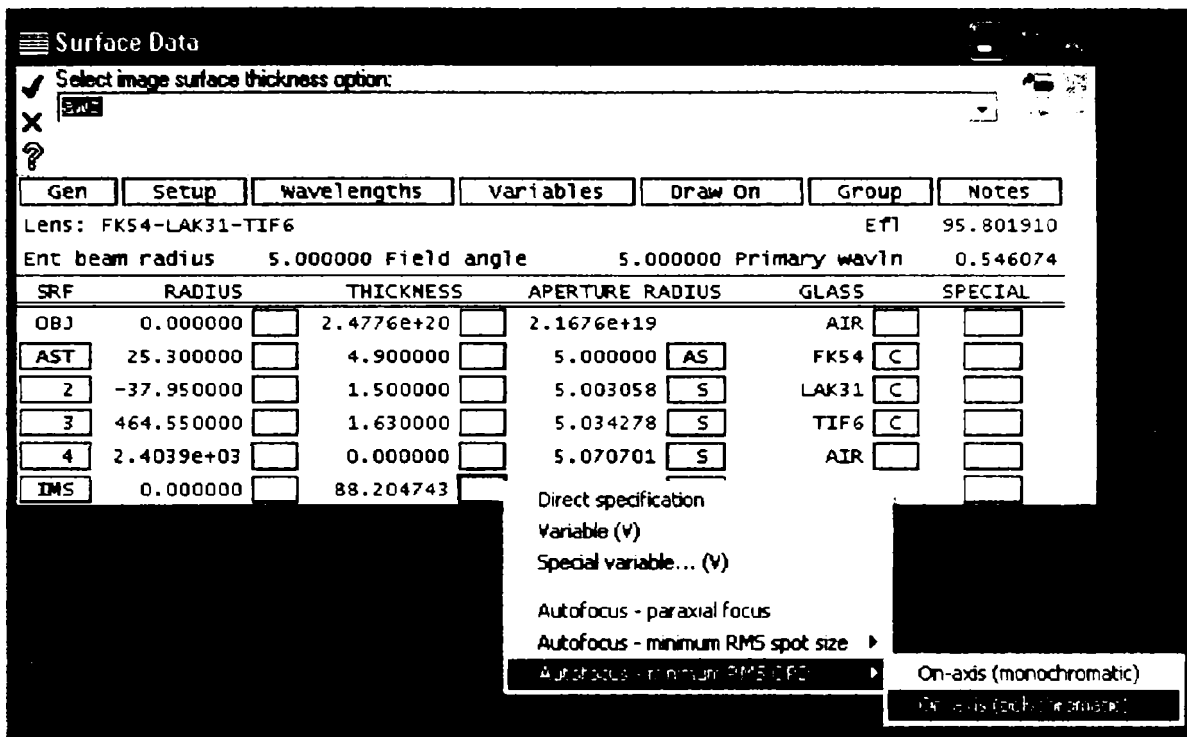


Fig.4.16. Soluții de defocusare a sistemului pentru minimizarea petei de difuzie pe axă sau minimizarea RMS OPD pe axă

O altă soluție se poate găsi pe baza calculului statistic aplicat mărimilor caracteristice frontului de undă, una dintre posibilități fiind găsirea celui mai bun focar (fig.4.17).

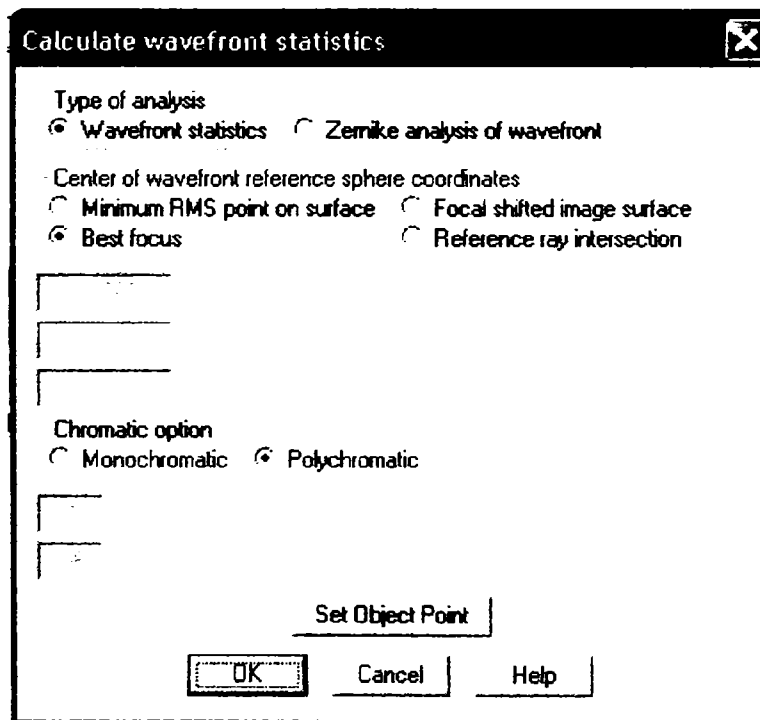


Fig.4.17. Fereastră alternativă de alegere a metodei de defocusare în scopul îmbunătățirii calității imaginii

Solicitând găsirea celui mai bun focar, în fereastra TW1 se afișează valorile RMS OPD

pe întreg câmpul, raportul Strehl și defocusarea necesară pe cele trei direcții x, y și z (fig.4.18).

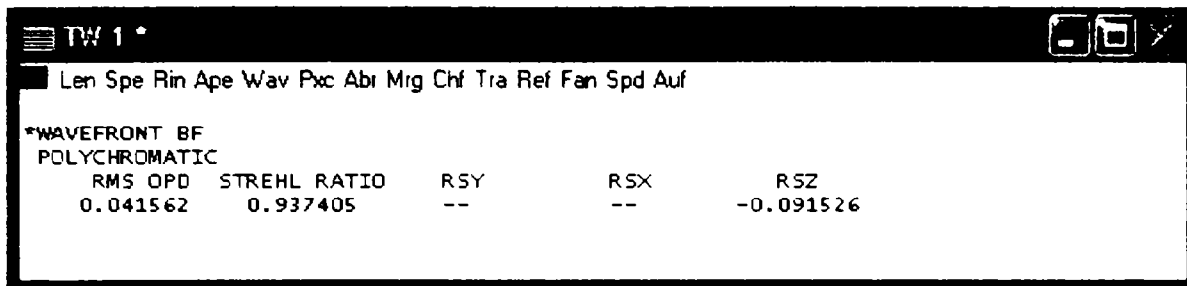


Fig. 4.18. Parametrii ondulatorii și energetici care rezultă prin defocusare

Se observă faptul că o deplasare a planului imagine cu aproximativ o zecime de milimetru (așa cum sugera și reprezentarea sferocromatismului și diagrama spot) permite o creștere substanțială a calității imaginii. Parametrul RMS OPD scade de la 0.080 la 0.041, iar raportul Strehl crește de la 0.750 la 0.937. În acest caz, sistemul se încadrează în categoria limitat la difracție și are o comportare apropiată de cea ideală, lipsită de aberații. De remarcat este faptul că nu este necesară nici o intervenție asupra geometriei sistemului, fiind suficientă o fină modificare a planului de punere la punct a imaginii.

Dacă în foaia de date interactivă se introduce valoarea noii valori a abscisei de referință, se poate face o reevaluare a calității sistemului, prin care se certifică îmbunătățirea acesteia (fig.4.19-4.25)

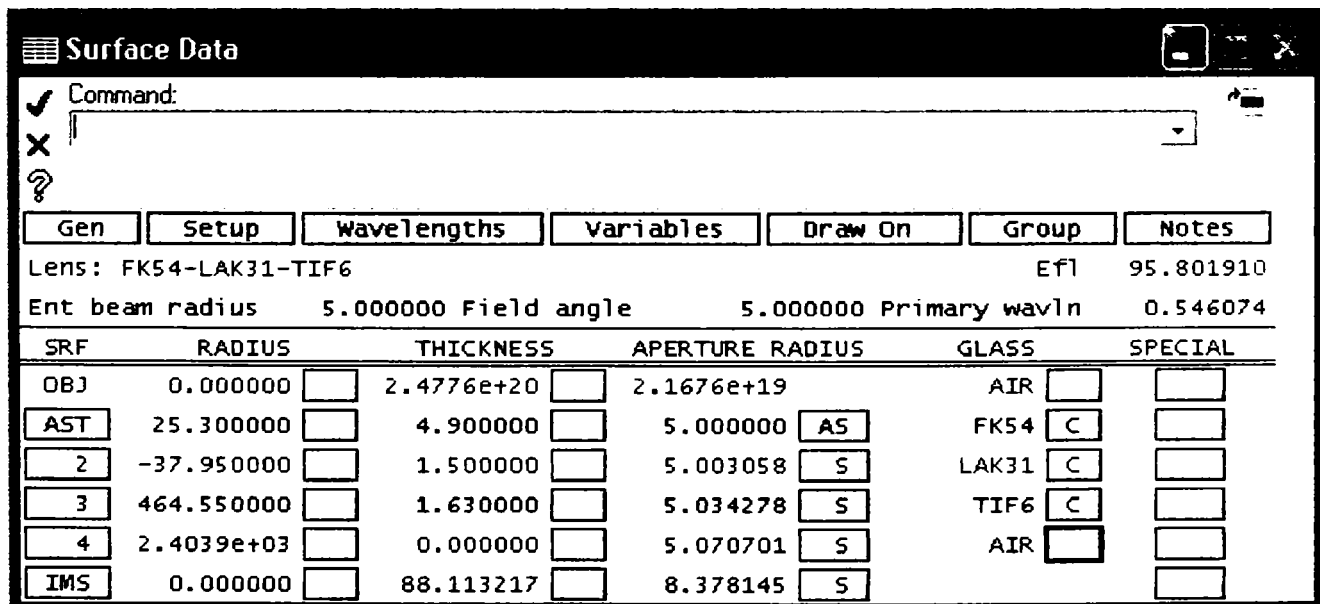


Fig.4.19. Planul de referință se deplasează de la abscisa 88.204 la 88.113

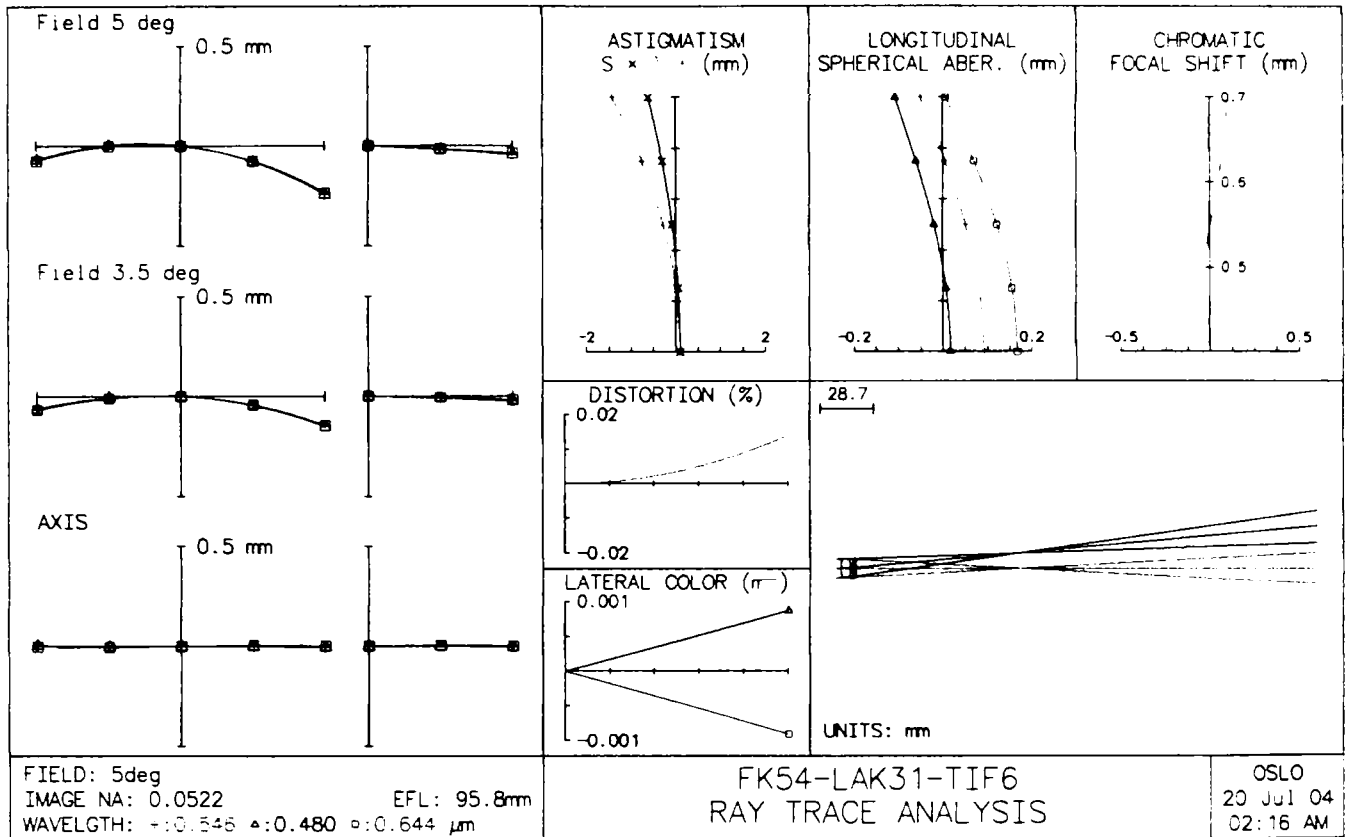


Fig.4.20. Curbele de sferocromatism s-au deplasat axial astfel încât aberația sferică (în radiația verde de referință) variază între +0.1 și -0.05. Sistemul este ușor supracorectat până aproximativ în zonă și devine ușor subcorectat spre margine

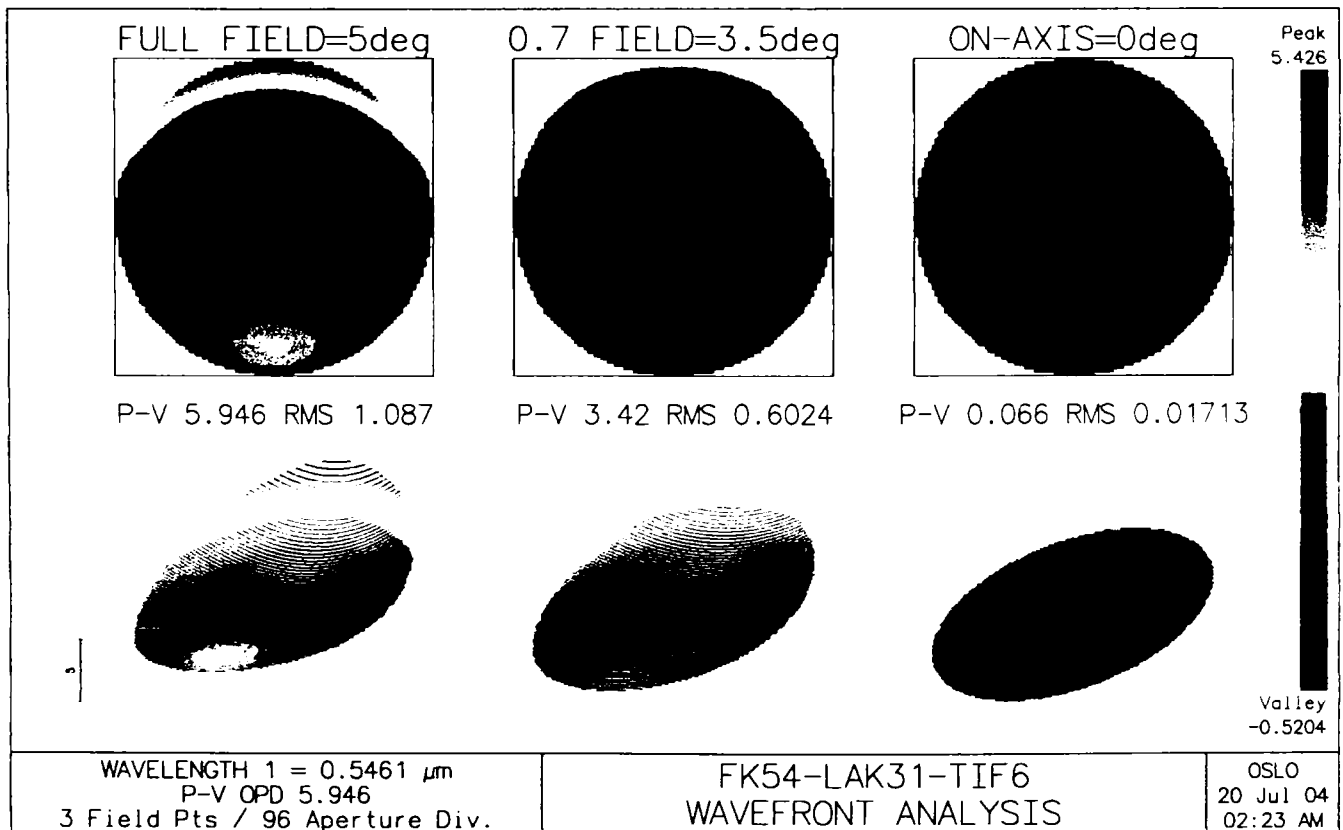


Fig.4.21. Analiza frontului de undă pentru sistemul optimizat

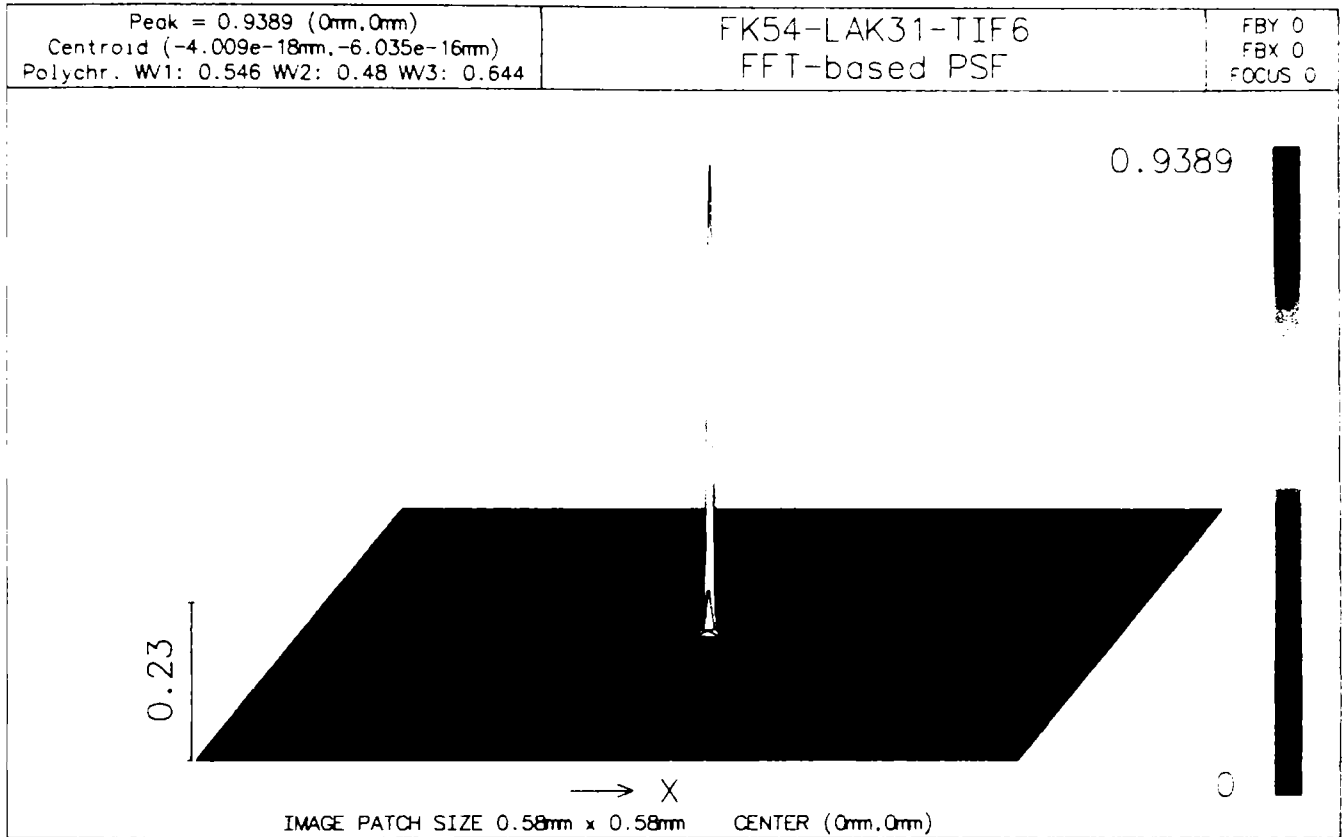


Fig.4.22. PSF pentru sistemul optimizat cu o creștere de 0.73 la 0.93

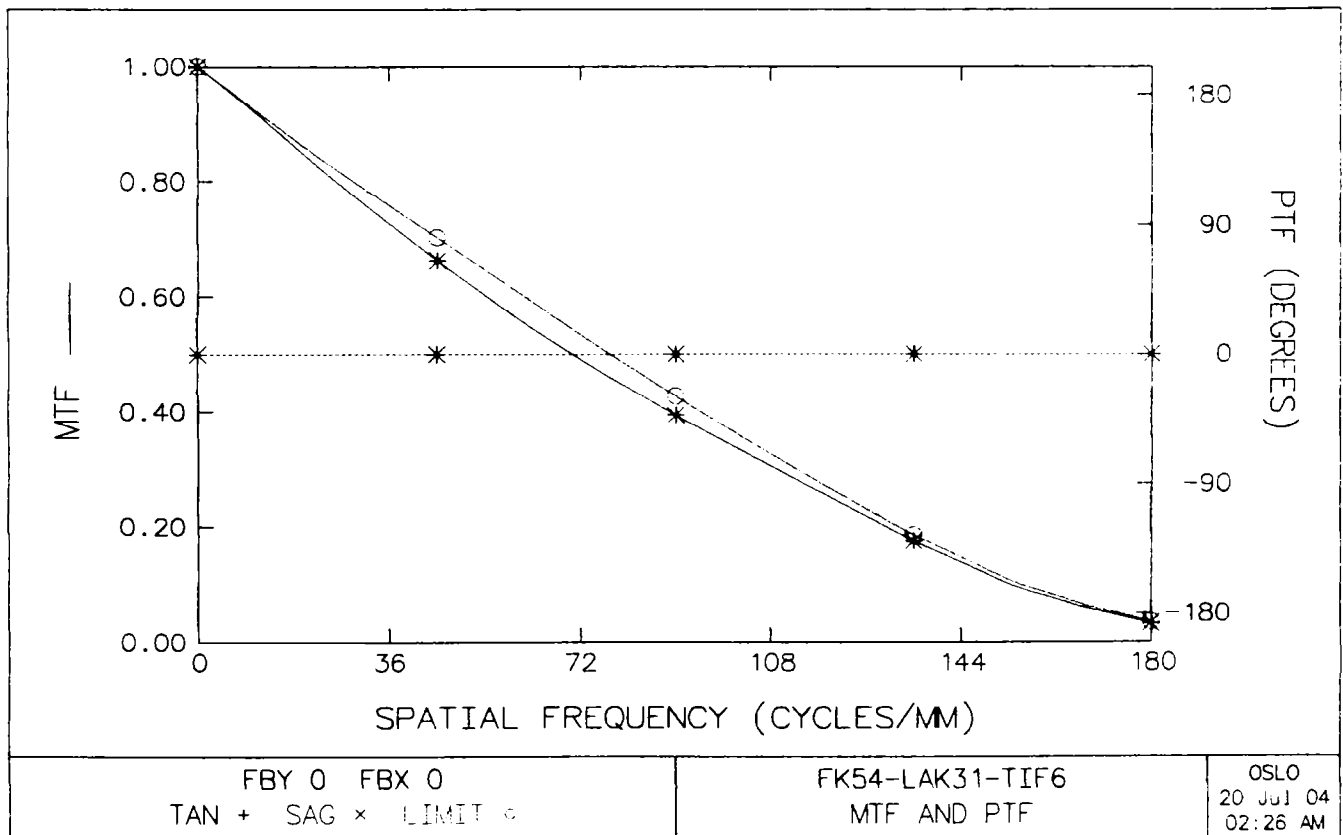


Fig.4.23. MTF-PTF pentru sistemul optimizat, pentru care se remarcă o abatere foarte mică față de curba sistemului ideal. Frecvența de tăiere corespunde celei teoretice (182 perechi de linii/mm)

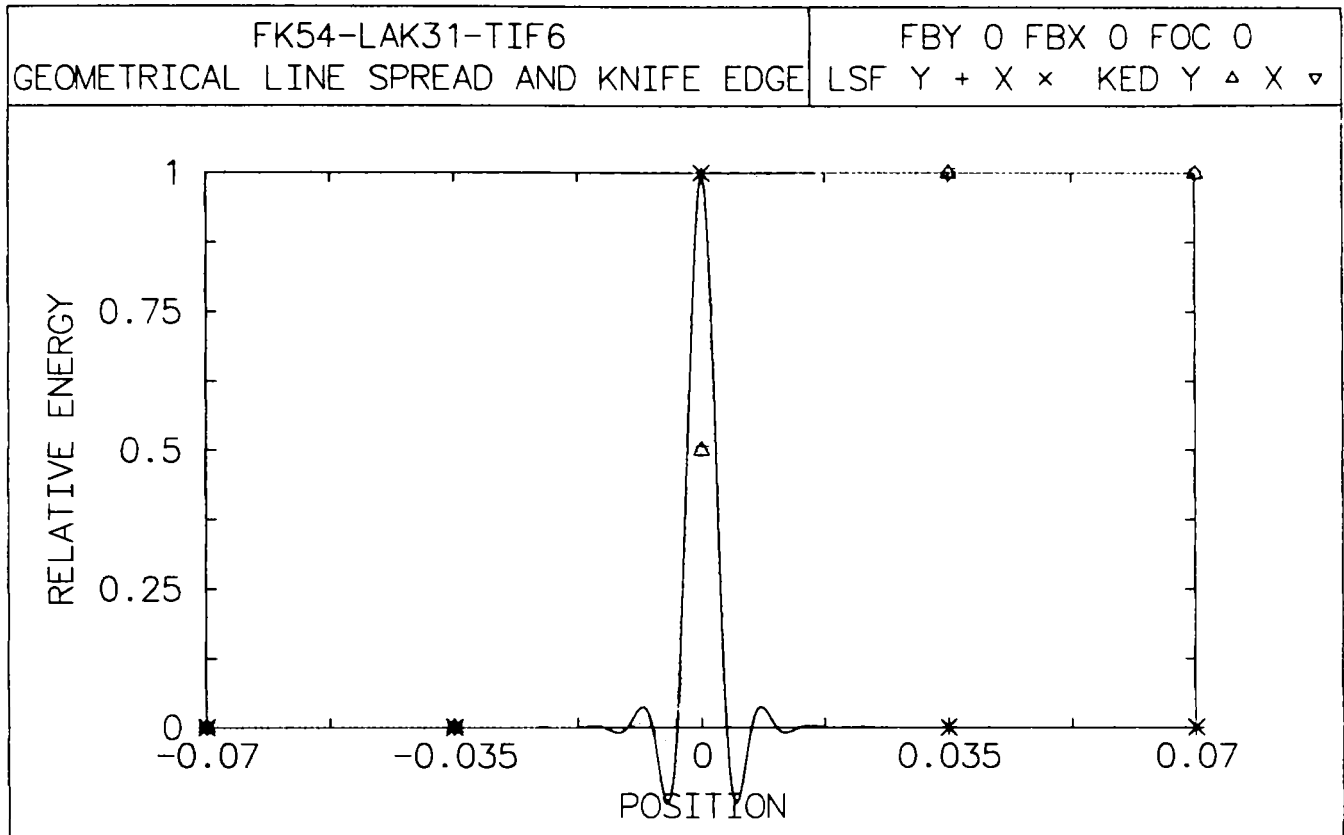


Fig.4.24. LSF și distribuția KED pentru sistemul optimizat

Dacă se urmărește obținerea unei valori foarte precise a distanței focale, se poate proceda la o scalare a sistemului. În figurile 4.25 și 4.26 sunt redate foaia de date a sistemului scalat de la $f=95.801$ la $f= 99.98$ și valorile RMS OPD și raportul Strehl ale sistemului scalat, care arată că scalarea (cu un factor mic, $k=1.043$) nu a afectat calitatea imaginii.

Surface Data

Command

Gen Setup wavelengths Variables Draw On Group Notes

Lens: FK54-LAK31-TIF6 Efl 99.984682

Ent beam radius 5.000000 Field angle 5.000000 Primary wavln 0.546074

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	2.5862e+20	2.2626e+19	AIR	
AST	26.410000	5.150000	5.000000	FK54	AS C
2	-39.610000	1.570000	5.016247	LAK31	S C
3	484.910000	1.700000	5.051031	TIF6	S C
4	2.5092e+03	0.000000	5.091376	AIR	S
IMS	0.000000	91.923078	8.743935		S

Fig.4.25. Valorile finale ale tripletului apocromat cu $f=100$ și deschidere $f/10$

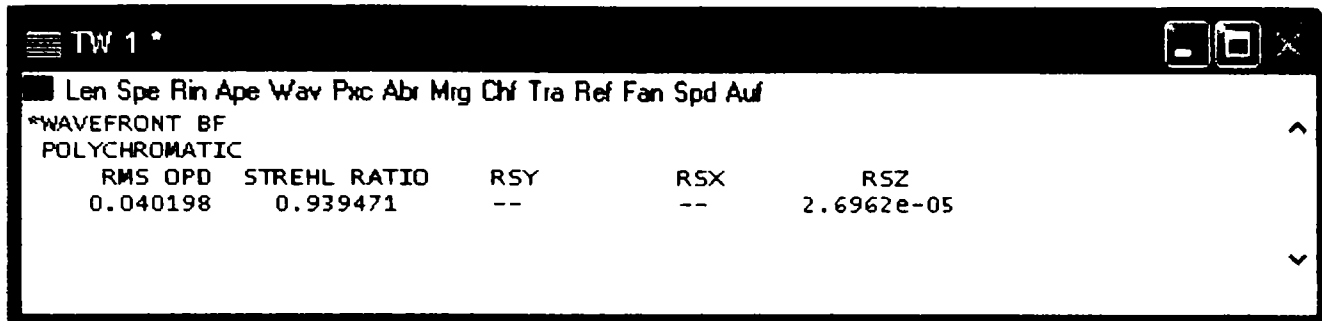


Fig.4.26. RMS OPD și raportul Strehl pentru sistemul final optimizat

Având în vedere calitatea foarte bună a tripletului, se poate verifica dacă poate fi utilizat și la deschideri mai mari. Pentru $h=8$ mm (sau deschidere $f/6.25$) sistemul poate fi considerat încă precis (fig.4.27).

Caracterul apocromat se păstrează și pentru deschideri mai mari, unde chiar se pune mai bine în evidență suprapunerea celor trei abscise e-F'-C'. În figura 4.28 este prezentat sistemul la deschiderea $f/5$ ($h=10$ mm), la care calitatea este medie. Figura 4.29 pune foarte bine în evidență apocromazia la această deschidere cu păstrarea variației cromatice a focarului în raport cu variantele anterioare.

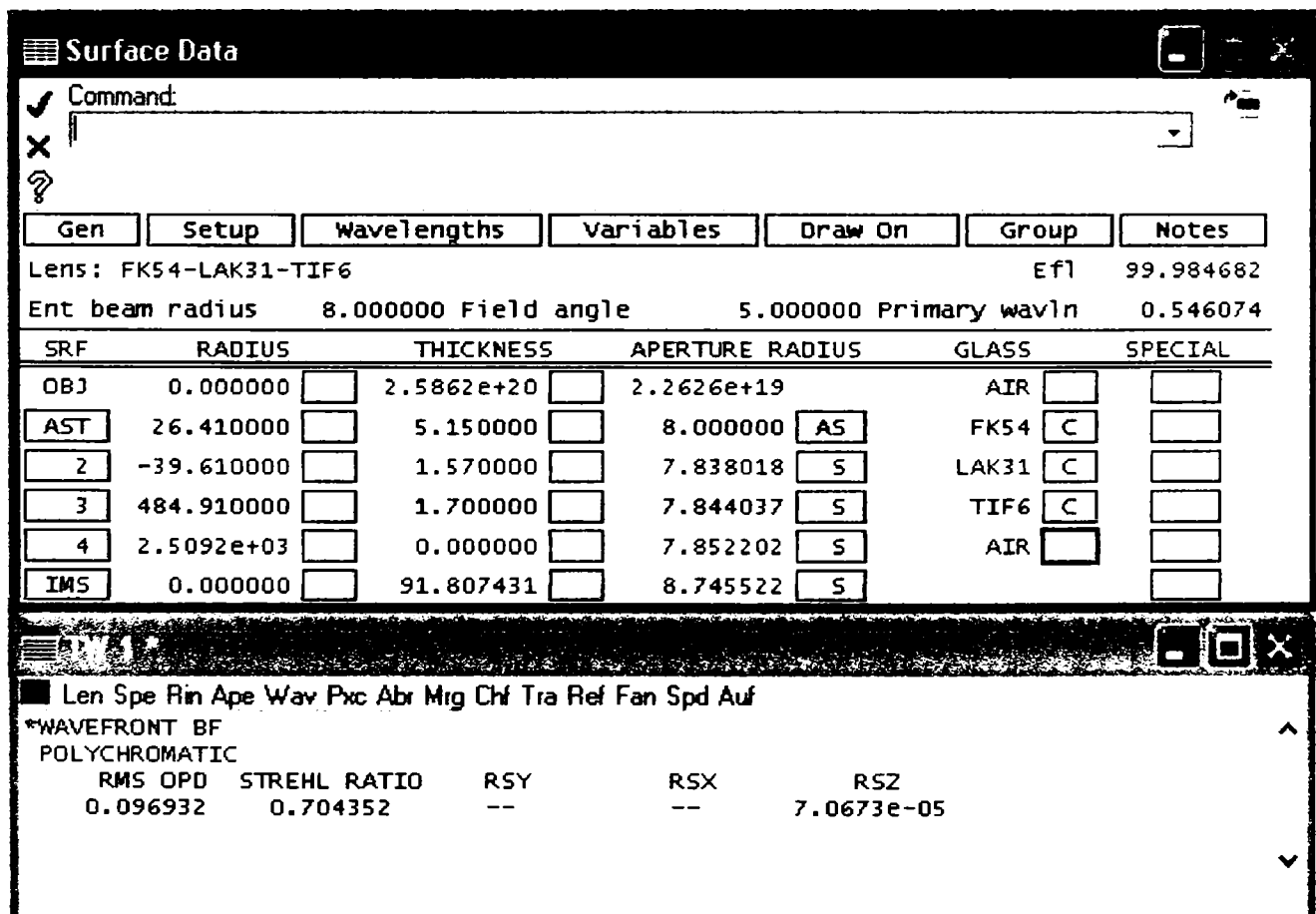


Fig.4.27. Caracteristicile de calitate ale tripletului optimizat pentru deschiderea $f/6.25$

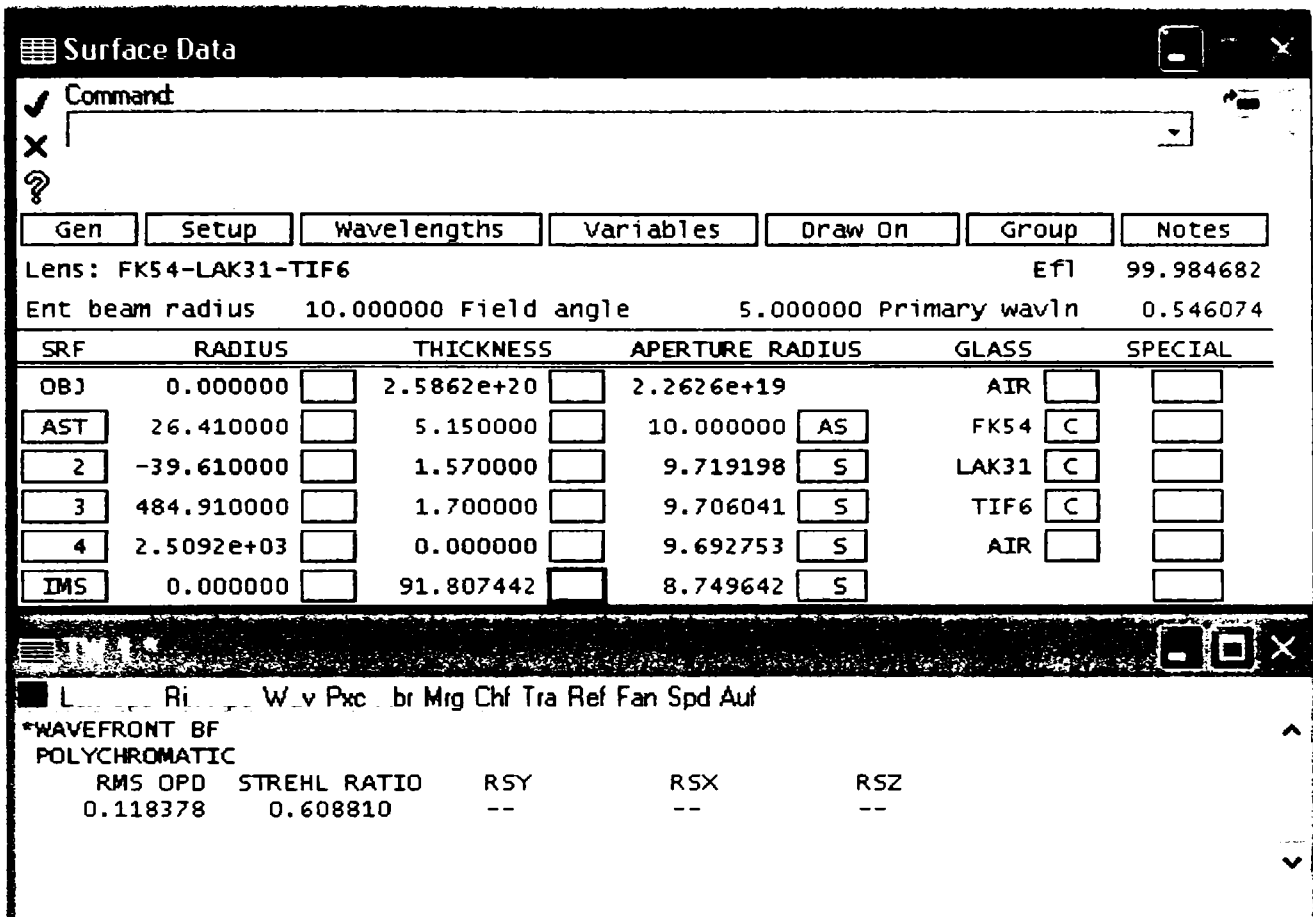


Fig.4.28. Caracteristicile de calitate ale tripletului optimizat pentru deschiderea $f/5$

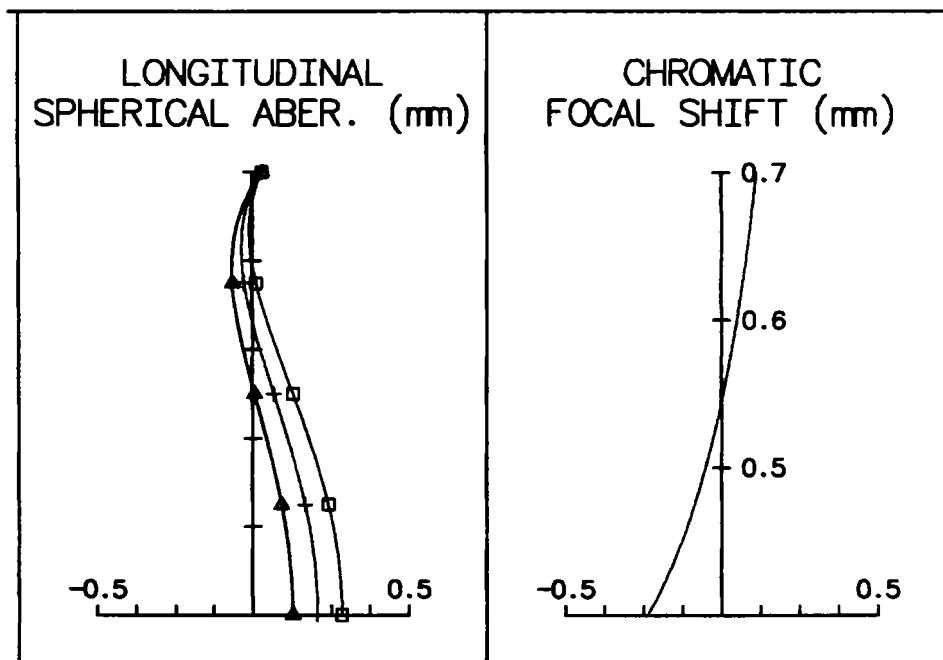


Fig.4.29. Evidențierea punctului de apocromziet al sistemului la deschiderea $f/5$

4.2. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII ORIGINALE

Capitolul 4 conține un studiu extins, aprofundat și critic al calității tripletului lipit apocromat, obținut prin metoda tradițională de sinteză.

Studiul a avut la bază sinteza și analiza a 88 de triplete, cu caracteristicile impuse:

$f'=100$, $s=-\infty$, $\omega=5^\circ$. S-au utilizat cele 22 de triplete de materiale compatibile pentru apocromazie, determinate în capitolul precedent. Pentru fiecare combinație s-au proiectat patru variante de triplet, corespunzătoare unor valori ale primei curburii a primei lentile egale cu 0.5, 0.6, 0.7 și 0.8 din valoarea curburii totale a acestei lentile.

În sinteză, cele mai importante observații care rezultă din studiu sunt următoarele:

- ◆ Cel mai semnificativ factor de influență a calității subansamblului este reprezentat de combinația de materiale, respectiv de relațiile dintre caracteristicile de refracție și dispersie ale sorturilor de sticlă
- ◆ Forma lentilelor componente și a subansamblului format din acestea depinde de sorturile de sticle și alegerea raportului între prima curbura și curbură totală a primei lentile; funcție de acești parametri rezultă șapte forme constructive
- ◆ Cele mai performante soluții au structura C-D-C și forma globală biconvexă sau menisc convergent
- ◆ Cele mai bune soluții, din punct de vedere difracțional, rezultă pentru valori ale primei curburii care nu sunt în conformitate cu recomandările generale din literatură, atunci când acestea există; se propune alegerea $c_1=(0.5\dots 0.6)c_a$
- ◆ Cele mai favorabile combinații de sticle trebuie să conțină un sort din familia flor crown (FK) pentru prima lentilă, un sort din familia flint special scurt (KZFS) sau crown lanthan (LAK) pentru a doua lentilă și un sort flint titan (TIF) sau flint greu (SF) pentru ultima lentilă
- ◆ Funcție de combinația de materiale și geometria subansamblului pot rezulta soluții limitate la difracție la deschideri de până la $f'/5$
- ◆ Soluțiile brute, rezultate în urma aplicării algoritmului de calcul nu au caracteristici corespunzătoare, dar pot fi substanțial îmbunătățite prin optimizarea bazată pe analiza statistică a parametrilor frontului de undă; defocusarea conduce la cele mai bune rezultate
- ◆ Geometria subansamblului, așa cum rezultă pe baza algoritmului de sinteză este definitivă; intervenția asupra razelor sau grosimilor nu este eficientă în creșterea calității, respectiv micșorarea aberațiilor
- ◆ Sistemele proiectate au caracteristici foarte bune din punct de vedere cromatic (aberațiile cromatice și spectrul secundar se pot considera corectate), dar prezintă aberații de deschidere care nu pot fi reduse și impun apertura de lucru

Printre contribuțiile originale ale autorului se amintesc următoarele:

- ◆ Sinteza și analiza a 88 de triplete apocromate originale

- ◆ Întocmirea și aplicarea unui program automat de sinteză original, scris în limbajul QBasic
- ◆ Studiul critic al compatibilității sorturilor de sticle optice și recomandarea celor mai favorabile combinații pentru obținerea soluțiilor limitate la difracție
- ◆ Recomandarea de alegere a primei curburi în domeniul $(0.5...0.6)c_a$
- ◆ Analiza și optimizarea soluțiilor pentru evidențierea performanțelor maxime ale fiecărei soluții, cu utilizarea softului specializat OSLO LT

Bibliografie: [B3], [B9], [G11], [H1], [H2], [K1], [N2], [N5], [O1], [S4], [S6], [S7], [W14], [W16]

CAP.5. METODE ORIGINAL DE SINTEZĂ A TRIPLETULUI APOCROMAT

5.1. METODĂ DE SINTEZĂ A TRIPLETULUI APOCROMAT DIN CONDIȚIA DE MINIM AL ABERAȚIEI SFERICE PRIMARE

Studiul prezentat în capitolul anterior a demonstrat că sinteza tradițională a tripletului apocromat conduce la soluții a căror calitate nu poate fi impusă prin condiții modelate matematic și incluse în algoritmi de calcul, ci poate fi doar constatată prin analiză completă, după finalizarea sintezei. De asemenea, a rezultat faptul că modificarea setului de valori care reprezintă soluția nu poate fi utilizată ca instrument de îmbunătățire a calității, prin diminuarea aberațiilor reziduale. Se mai poate face observația că, deși s-a restrâns intervalul recomandat pentru alegerea primei curburi, totuși există o infinitate de soluții, a căror calitate poate să se încadreze în limite foarte largi. Este important de subliniat că algoritmul tradițional modelează condițiile de apocromazie în mod eficient, astfel încât soluțiile rezultate prin sinteză sunt corectate din punct de vedere al aberațiilor cromatice axiale și transversale și al spectrului secundar, care este foarte redus. Cea mai importantă aberație reziduală este cea de deschidere, care prezintă, în majoritatea cazurilor valori de ordinul milimetrilor. Având în vedere faptul că satisfacerea criteriilor actuale de calitate impune cel puțin un ordin de mărime mai mic, rezultă că principala problemă a subansamblului apocromat este deschiderea utilă limitată la valori reduse.

Fără a nega utilitatea metodei tradiționale, care oferă unele soluții foarte bune, la deschideri până la $f'/5$, se subliniază caracterul său empiric, element care determină un volum foarte mare de lucru, de fapt, un studiu asemănător celui prezentat în capitolul anterior pentru fiecare set de date de intrare impuse.

Pomind de la observația că aberația sferică longitudinală este sursa problemelor în proiectarea apocromatului, se propune, în continuare o metodă de *determinare a primei curburi a tripletului din condiția de minimizare a aberației sferice*.

Expresia aberației sferice longitudinale primare pentru un șir de lentile infinit subțiri

este de forma:

$$\begin{aligned} ds' &= -\frac{h^4}{\sigma_k^2} \sum \left(G_1 c^3 - G_2 c^2 c_1 + G_3 c^2 p + G_4 c c_1^2 - G_5 c c_1 p + G_6 c p^2 \right) = \\ &= -\frac{h^4}{\sigma_k^2} \sum \left(G_1 c^3 + G_2 c^2 c_2 - G_3 c^2 p' + G_4 c c_2^2 - G_5 c c_2 p' + G_6 c p'^2 \right), \end{aligned} \quad (5.1)$$

unde $G_1 \dots G_6$ reprezintă coeficienți calculați ca funcții de indicele de refracție de referință al lentilelor, c este curbura globală, $c_{1,2}$ simbolizează prima, respectiv a doua curbura a fiecărei lentile, p și p' sunt inversul absciselor obiect, respectiv imagine pentru fiecare lentilă, σ_k reprezintă unghiul axei emergente din spațiul imagine pentru întregul sistem, cu axa optică, iar h este înălțimea de incidență. Suma se dezvoltă pe lentile, în cazul tripletului până la indicele 3.

Coeficienții $G_1 \dots G_6$ sunt de forma:

$$G_1 = \frac{1}{2} n^2 (n-1), \quad G_2 = \frac{1}{2} (2n+1)(n-1), \quad (5.2)$$

$$G_3 = \frac{1}{2} ((3n+1)(n-1)), \quad G_4 = \frac{1}{2n} (n+2)(n-1), \quad (5.3)$$

$$G_5 = 2 \frac{(n^2-1)}{n}, \quad G_6 = \frac{1}{2n} (3n+2)(n-1). \quad (5.4)$$

Calculul mărimilor p sau p' necesită efectuarea unei drumuri paraxiale, pe lentile, cu algoritmul:

$$\sigma' = \sigma + \frac{h}{f'}, \quad (5.5)$$

$$s' = \frac{h}{\sigma'}, \quad (5.6)$$

$$\sigma_+ = \sigma', \quad s_+ = s' \quad (5.7)$$

$$p = \frac{1}{s}, \quad p' = \frac{1}{s'}. \quad (5.8)$$

Considerând, pentru simplitate, că lentilele se disting prin indicii a , b și c , având în vedere relațiile:

$$c_2 = c_1 - c_a, \quad (5.9)$$

$$c_3 = c_2 - c_b = c_1 - (c_a + c_b) = c_1 - k \quad (5.10)$$

și utilizând formula care conține prima curbura a fiecărei lentile, rezultă, pentru triplet, o expresie a aberației sferice primare de forma:

$$ds' = -\frac{h^4}{\sigma_3^2} (k_1 c_1^2 + k_2 c_1 + k_3), \quad (5.11)$$

unde: $k_1 = G_{4a}c_a + G_{4b}c_b + G_{4c}c_c$

$$k_2 = -G_{2a}c_a^2 - G_{5a}c_a p_a - G_{2b}c_b - 2G_{4b}c_b c_a - G_{5b}c_b p_b - G_{2c}c_c^2 - 2G_{4c}c_c k - G_{5c}c_c p_c \quad (5.12)$$

$$k_3 = G_{1a}c_a^3 + G_{3a}c_a^2 p_a + G_{6a}c_a p_a^2 + G_{1b}c_b^3 + G_{2b}c_b^2 c_a + G_{3b}c_b^2 p_b + G_{4b}c_b c_a^2 + G_{5b}c_b c_a p_b + G_{6b}c_b p_b^2 + G_{1c}c_c^3 + G_{2c}c_c^2 k + G_{3c}c_c^2 p_c + G_{4c}c_c k^2 + G_{5c}c_c k p_c + G_{6c}c_c p_c^2$$

Se impune condiția de extrem al aberației sferice primare și rezultă, consecutiv:

$$d(ds')=0, \quad (5.13)$$

$$2k_1 c_1 + k_2 = 0, \quad (5.14)$$

$$c_1 = -\frac{k_2}{2k_1} = \frac{G_{2a}c_a^2 + G_{5a}c_a p_a + G_{2b}c_b + 2G_{4b}c_b c_a + G_{5b}c_b p_b + G_{2c}c_c^2 + 2G_{4c}c_c k + G_{5c}c_c p_c}{2(G_{4a}c_a + G_{4b}c_b + G_{4c}c_c)} \quad (5.15)$$

Curburile totale ale lentilelor c_a , c_b și c_c se deduc pe baza algoritmului tradițional, care modelează apocromatizarea.

Pentru sinteza tripletului lipit cu condiția de minimizare a aberației sferice primare s-a întocmit un program automat, scris în limbajul QBasic și redat mai jos.

```
DEFDBL A-Z
f = 100: D# = f / 10: se(1) = 1E+30
DIM ne(5): DIM nc(5): DIM nf(5): DIM D(3)
REM sticle FK54, LaK28, TIF6
FOR j = 1 TO 5
  READ ne(j)
NEXT j
DATA 1,1.438151,1.747779,1.621182,1
FOR j = 1 TO 5
  READ nc(j)
NEXT j
DATA 1,1.435756,1.740556,1.611684,1
FOR j = 1 TO 5
  READ nf(j)
NEXT j
DATA 1,1.440608,1.755353,1.631939,1
```



```

FOR j = 2 TO 4
    nu(j) = (ne(j) - 1) / (nf(j) - nc(j)): PRINT "nu="; nu(j)
    P(j) = (nf(j) - ne(j)) / (nf(j) - nc(j)): PRINT "P="; P(j)
NEXT j
FOR j = 2 TO 4
    dn(j) = nf(j) - nc(j)
NEXT j
e = (nu(2) * (P(3) - P(4)) + nu(3) * (P(4) - P(2)) + nu(4) * (P(2) - P(3))) / (nu(2) - nu(4))
PRINT "E="; e
ct = 1 / f / e / (nu(2) - nu(4))
ca = ct * (P(3) - P(4)) / dn(2): PRINT "ca="; ca
cb = ct * (P(4) - P(2)) / dn(3): PRINT "cb="; cb
cc = ct * (P(2) - P(3)) / dn(4): PRINT "cc="; cc
FOR j = 2 TO 4
    g2(j) = .5 * (2 * ne(j) + 1) * (ne(j) - 1): PRINT "g2="; g2(j)
    g4(j) = (ne(j) + 2) * (ne(j) - 1) / 2 / ne(j): PRINT "g4="; g4(j)
    g5(j) = 2 * (ne(j) * ne(j) - 1) / ne(j): PRINT "g5="; g5(j)
NEXT j
fa = 1 / ca / (ne(2) - 1): PRINT "fa="; fa
fb = 1 / cb / (ne(3) - 1): PRINT "fb="; fb
fc = 1 / cc / (ne(4) - 1): PRINT "fc="; fc
pa = 0: pb = 1 / fa: PRINT "pb="; pb: pc = (fa + fb) / fa / fb: PRINT "pc="; pc
c(1) = (g2(2) * ca ^ 2 - g5(2) * ca * pa + g2(3) * cb ^ 2 + 2 * ca * g4(3) * cb + g5(3) * cb * pb +
+g2(4) * cc ^ 2 + 2 * (ca + cb) * g4(4) * cc + g5(4) * cc * pc) / 2 / (g4(2) * ca + g4(3) * cb +
+g4(4) * cc)
c(2) = c(1) - ca: c(3) = c(2) - cb: c(4) = c(3) - cc: PRINT "c1="; c(1)
FOR j = 1 TO 4
    r(j) = 1 / c(j)
    PRINT "r("; j; ")="; r(j)
NEXT j
sep(1) = ne(2) * r(1) / (ne(2) - ne(1)): PRINT "s'(1)="; sep(1)
FOR j = 1 TO 3
    IF r(j) > 0 AND r(j + 1) < 0 THEN
        D(j) = 1.5 + ABS(r(j)) + ABS(r(j + 1)) - (SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) + SQR(r(j + 1) ^ 2 - D# ^ 2 / 4))
    END IF
    IF r(j) > 0 AND r(j + 1) > 0 AND ABS(r(j)) < ABS(r(j + 1)) THEN

```

```

D(j) = 1.5 + r(j) - r(j + 1) - (SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) - SQR(r(j + 1) ^ 2 + D# ^ 2 / 4))
END IF
IF r(j) > 0 AND r(j + 1) > 0 AND ABS(r(j)) > ABS(r(j + 1)) THEN
D(j) = 1.5
END IF
IF r(j) < 0 AND r(j + 1) > 0 THEN
D(j) = 1.5
END IF
IF r(j) < 0 AND r(j + 1) < 0 AND ABS(r(j)) > ABS(r(j + 1)) THEN
D(j) = 1.5 + ABS(r(j + 1)) - ABS(r(j)) - (SQR(r(j + 1) ^ 2 - D# ^ 2 / 4) - SQR(r(j) ^ 2 - D# ^ 2 / 4))
END IF
IF r(j) < 0 AND r(j + 1) < 0 AND ABS(r(j)) < ABS(r(j + 1)) THEN
D(j) = 1.5
END IF
PRINT "d("; j; ")="; D(j)
NEXT j
FOR j = 2 TO 4
se(j) = sep(j - 1) - D(j - 1)
PRINT "s("; j; ")="; se(j)
sep(j) = ne(j + 1) * se(j) * r(j) / (r(j) * ne(j) + (ne(j + 1) - ne(j)) * se(j))
PRINT "s'("; j; ")="; sep(j)
NEXT j
fprim = sep(1) * sep(2) * sep(3) * sep(4) / se(2) / se(3) / se(4)
PRINT "f="; fprim: PRINT "s'(4)="; sep(4)

```

Programul a fost rulat pentru tripletul de sorturi FK54-BK3-TIF6, cu aceleași date de intrare impuse în studiul din capitolul 4 ($f'=100$, $s=-\infty$, $\omega=5^\circ$) și pentru care, așa cum rezultă din tabelul 4.1, poziția 4, nu s-a găsit nici o soluție corespunzătoare calitativ, între variantele cu valori ale primei cuburi impuse arbitrar ca 0.5, 0.6, 0.7 și 0.8 din curbura primei lentile.

Metoda a furnizat următoarea soluție:

```

r1 = 33.71
r2 = -168.31
r3 = - 170.94
r4 = 323.51
d1 = 3.31
d2 = 1.5
d3 = 1.5
f' = 98.57
s'F = 93.28

```

Analiza sistemului obținut s-a efectuat cu ajutorul programului OSLO LT.

Figura 5.1 prezintă foaia de date și valorile RMS OPD și raportul Strehl, care au constituit criteriile de calitate urmărite și în cazurile anterioare.

The screenshot shows the 'Surface Data' window in OSLO LT. It contains a table of lens surfaces and a summary table at the bottom.

Gen	Setup	Wavelengths	Variables	Draw On	Group	Notes
Lens: FK54-BK3-TIF6_ ds'_min					Ef1	98.568474
Ent beam radius	5.000000	Field angle	5.000000	Primary wavln		0.546074
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL	
OBJ	0.000000	1.0000e+20	8.7489e+18	AIR		
AST	33.710000	3.310000	5.000000	FK54	AS	
2	-168.310000	1.500000	5.051786	BK3	S	
3	-170.940000	1.500000	5.076145	TIF6	S	
4	323.510000	0.000000	5.102011	AIR	S	
IMS	0.000000	92.992775	8.612668		S	

Len	Spe	Rin	Ape	Wav	Pxc	Abr	Mig	Chf	Tra	Ref	Fan	Spd	Auf
*WAVEFRONT	BF												
POLYCHROMATIC													
	RMS OPD	STREHL RATIO	RSY	RSX	RSZ								
	0.059550	0.862424	--	--	7.4470e-09								

Fig.5.1. Foaia de date și parametri rezultați din analiza frontului de undă pentru sistemul optimizat prin defocusare

Sistemul, de foarte bună calitate, a rezultat dintr-un calcul direct, fără iterații cu increment empiric aplicat primei curburi, ceea ce reprezintă cel puțin avantajul economiei de timp de lucru.

Informativ, dacă se calculează raportul dintre curbura primului dioptru ($c_1 = 1/33.71 = 2.9964 \cdot 10^{-2}$) și curbura primei lentile ($c_a = 5.2521 \cdot 10^{-2}$) se obține valoarea 0.57, care confirmă recomandarea din capitolul anterior, unde, printr-un experiment matematic s-a ajuns la concluzia că cele mai bune performanțe rezultă pentru sistemele la care $c_1 = (0.5 \dots 0.6)c_a$.

Aberațiile geometrice și cromatice, prezentate în figura 5.2 confirmă calitatea sistemului.

Dacă toleranțele impuse asupra puterii optice a tripletului sunt strânse, se poate apela la operația de scalare pentru obținerea focalei cât mai apropiate de valoarea impusă, 100 mm.

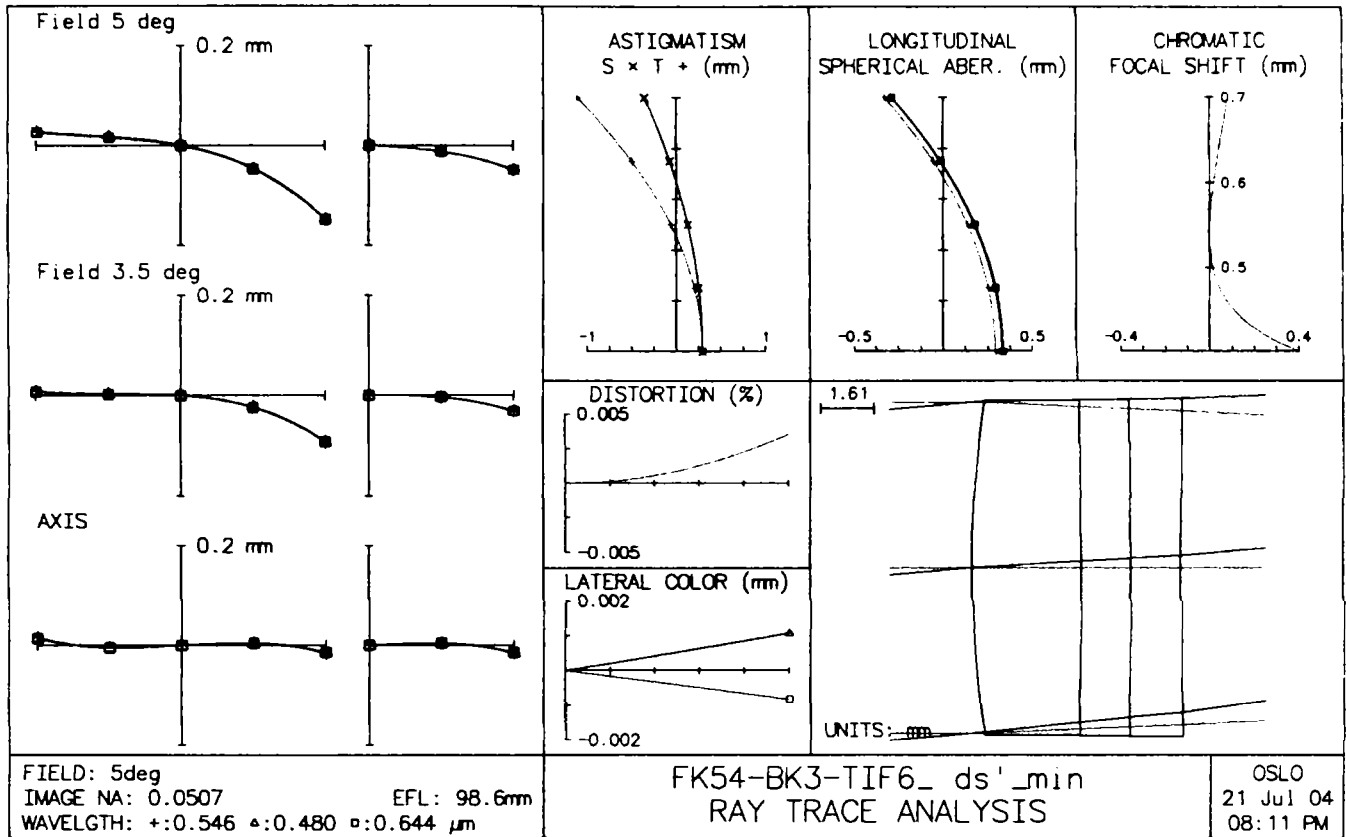


Fig.5.2. Aberrațiile geometrice și cromatice ale sistemului optimizat

Noul set de valori ale razelor și grosimilor la centru este prezentat în foaia de date din figura 5.3.

Surface Data

Gen Setup Wavelengths Variables Draw On Group Notes

Lens: FK54-BK3-TIF6_ ds'_min Efl 100.001832

Ent beam radius 5.000000 Field angle 5.000000 Primary wavln 0.546074

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0145e+20	8.8759e+18	AIR	
AST	34.200000	3.360000	5.000000	FK54	C
2	-170.750000	1.520000	5.054744	BK3	C
3	-173.420000	1.520000	5.080345	TIF6	C
4	328.210000	0.000000	5.107359	AIR	
IMS	0.000000	94.355341	8.738049		

TW 1 *

Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mrg Chf Tra Ref Fan Spd Auf

*WAVEFRONT BF POLYCHROMATIC

RMS OPD	STREHL RATIO	RSY	RSX	RSZ
0.057082	0.873616	--	--	9.1076e-07

Fig. 5.3. Sistemul scalat la $f=100$ mm

Din aceeași figură rezultă că parametri de calitate nu s-au modificat prin scalare.

Metodele de sinteză prezentate – metoda tradițională și metoda minimizării aberației sferice primare – au vizat în primul rând obținerea unor soluții de foarte bună calitate, cu aberații de undă mici, $RMS\ OPD \leq 0.07\lambda$ și rapoarte Strehl ≥ 0.80 , care, prin calificarea generică de limitat la difracție asigură, de fapt, claritatea, iluminarea și contrastul imaginii la nivel apropiat de ideal. Majoritatea sistemelor prezentate au atins aceste performanțe pentru deschideri mici, care se caracterizează, în general, prin numere de deschidere $f'/10 \dots f'/8$. La toate soluțiile analizate autorul a urmărit și limita aperturii pentru care sistemul se înscrie în condițiile impuse de criteriul Rayleigh. Concluzia care se poate formula este aceea că numai sistemele de excepțională calitate, cu raportul Strehl > 0.95 la numărul de deschidere $f'/10$ pot fi utilizate cu extindere până la $f'/7$ și, foarte rar, până la $f'/5$. Modificarea aperturii reclamă, desigur, optimizarea sistemului, cel puțin prin defocusare.

Totuși creșterea deschiderii este absolut necesară în unele cazuri, ceea ce obligă la căutarea unor căi de îndeplinire a acestui deziderat.

5.2. METODĂ DE CREȘTERE A APERTURII PRIN ASFERIZAREA ULTIMULUI DIOPTRU

Utilizarea suprafețelor asferice reprezintă o soluție scumpă, dar este recunoscută drept cea mai eficientă în corectarea aberației sferice. Având în vedere acest efect, introducerea unei suprafețe asferice poate îmbunătăți substanțial calitatea sistemului, în general și poate extinde apertura utilă, în special.

Pentru a ilustra acest efect – de asigurare a calității imaginii la deschideri mari – se discută o combinație inclusă în studiul din capitolul 4 și anume, tripletul FK54-LAK33-TIF6. Acesta este prezentat în tabelul 4.1 la poziția 15, de unde rezultă ca soluția este de foarte bună calitate până la $h=8$ ($f'/6.25$).

Se pornește de la varianta calculată cu $c_1=0.6c_a$, ale cărei caracteristici sunt redată în figura 5.4. Se observă că, dacă pentru $h=5$ mm ($f'/10$) raportul Strehl era 0.967, la $h=10$ mm ($f'/5$) acesta scade foarte mult, ajungând la valoarea inacceptabilă 0.209. Această scădere accentuată este datorată creșterii aberației sferice, a cărei variație este direct proporțională aproximativ cu pătratul înălțimii de incidență. Ca urmare, o variație mică a înălțimii conduce la creșterea accentuată a aberației.

În figura 5.5 conținând analiza grafică a aberațiilor reziduale este evidentă creșterea aberației sferice longitudinale. Reprezentarea sferocromatismului pune în evidență foarte clar apocromazia sistemului, prin intersectarea curbelor corespunzătoare radiațiilor e, F' și C' într-un singur punct. Variația cromatică a focarului rămâne foarte bună. Sferocromatismul și variația cromatică a focarului sunt detaliate în figura 5.6.

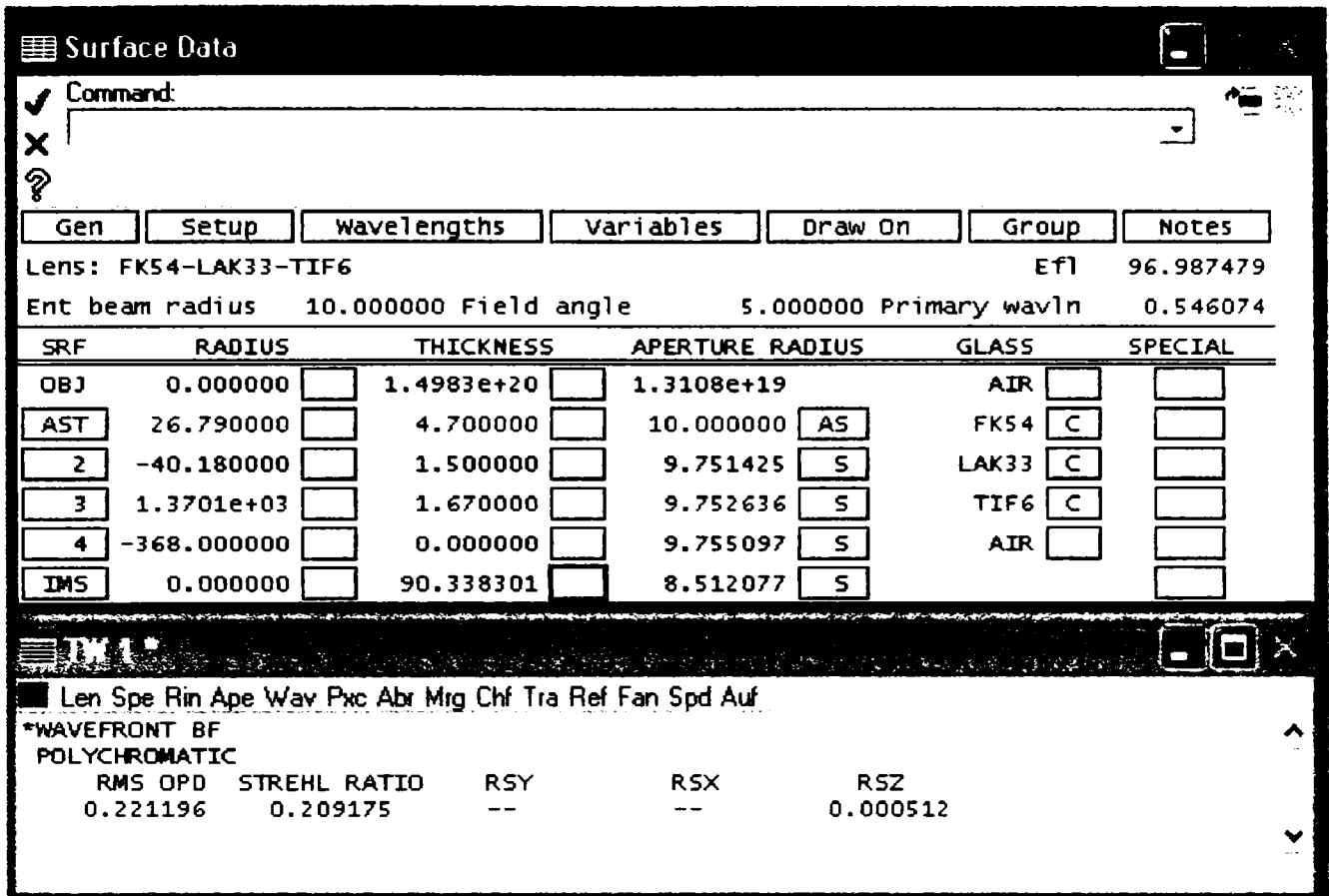


Fig.5.4. Foaia de date a sistemului și caracteristicile la deschiderea f/5

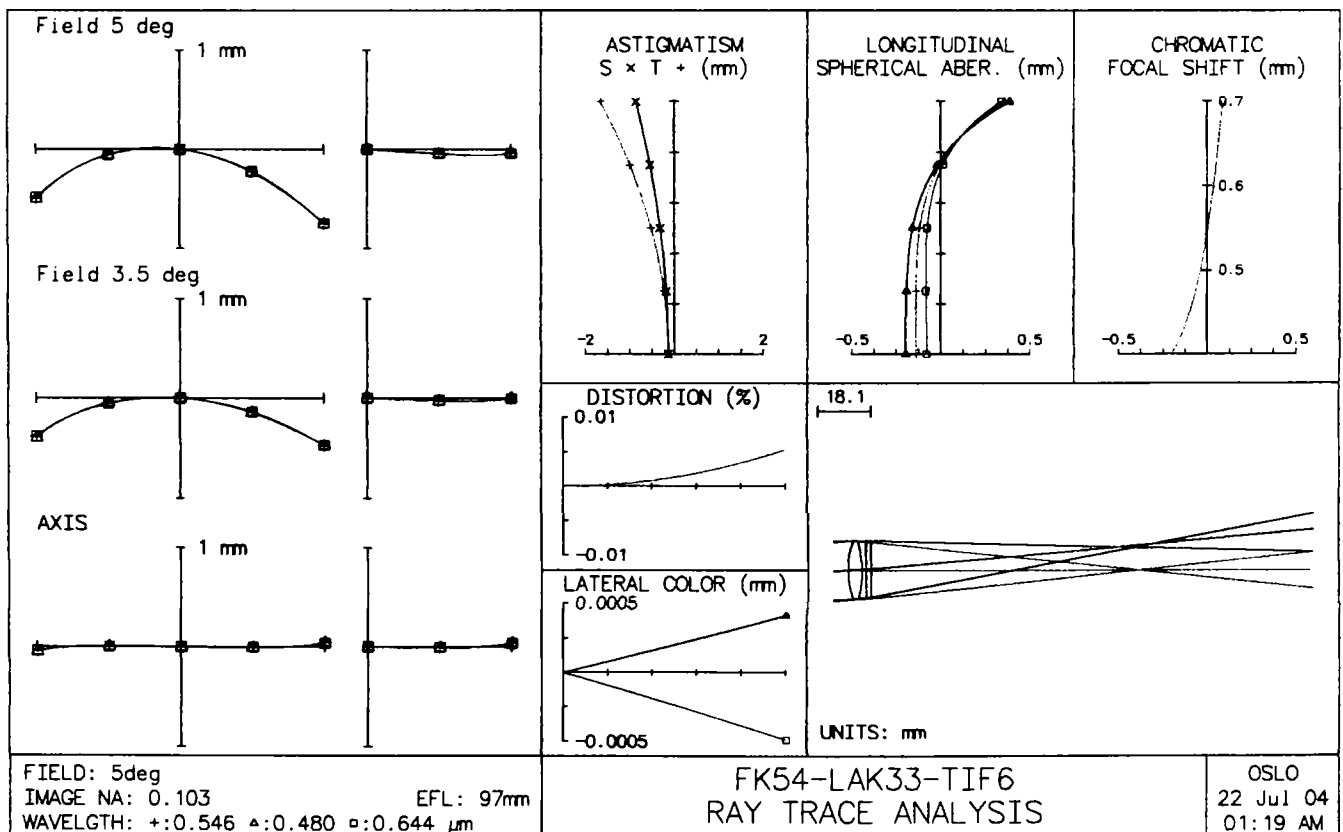


Fig.5.5. Aberrațiile sistemului cu deschiderea f/5 cu evidențierea creșterii accentuate a aberației sferice longitudinale

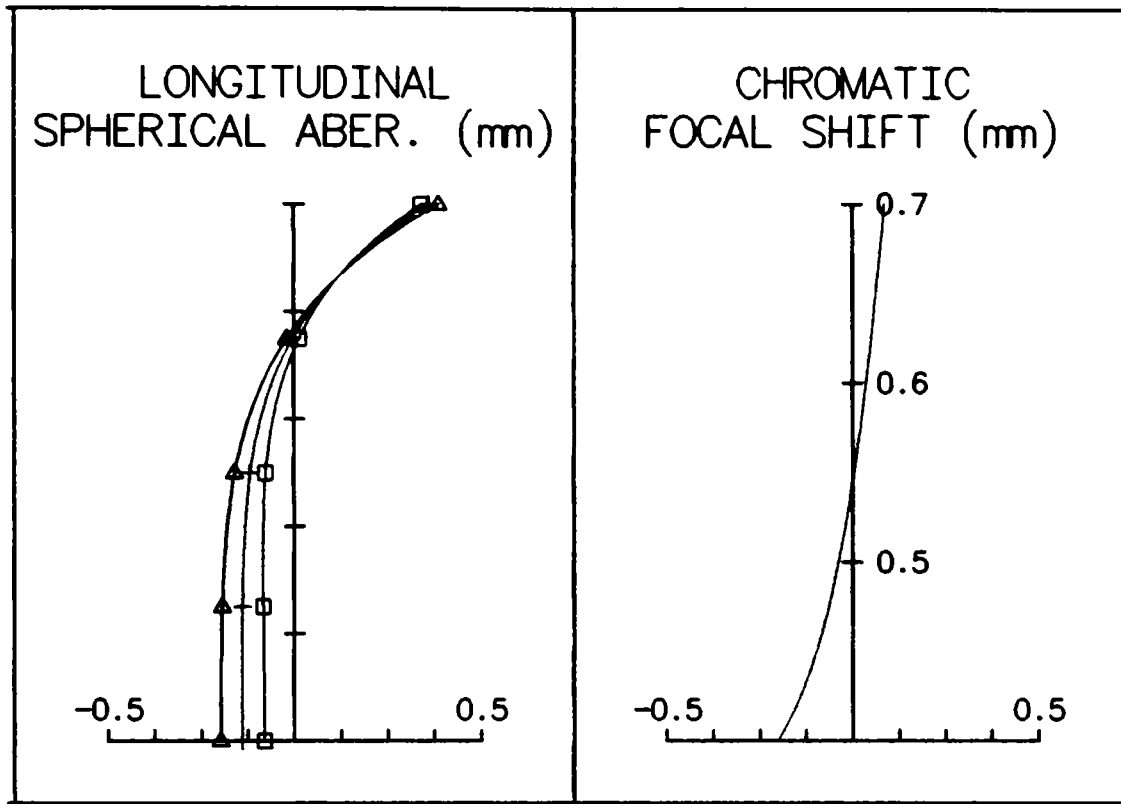


Fig.5.6. Evidențierea păstrării apocromaziei, dar cu creșterea accentuată a aberației sferice

Schimbarea alurii curbelor de sferocromatism nu poate fi modificată prin variații ale razelor sau grosimilor, care pot, eventual să deplaseze întregul grup de curbe pe axa absciselor.

Pentru modificarea formei curbelor de sferocromatism se poate apela la asferizarea unei suprafețe exterioare și, în continuare, se dă curs propunerii de aplicare a procedurii pentru dioptrul al patrulea.

Pentru acest demers se apelează la modulul de optimizare interactivă a programului OSLO LT, care permite operatorului să indice parametrul care se dorește a fi modificat. Se propune asferizarea dioptrului 4 pentru modificarea formei curbelor și controlul poziției acestora prin grosimea lentilei centrale (fig.5.7).

Procedura are un caracter interactiv, în sensul că modificările sunt introduse de către operator, care trebuie să aprecieze efectul schimbărilor de date prin urmărirea vizuală accesibilă imediat în alura curbelor. Modificările se introduc într-o fereastră "Slider", cu un increment al cărei ordin de mărime este hotărât de către operator. În figura 5.8 este prezentată forma finală a curbelor de sferocromatism și fereastra "Slider", pe care se pot observa valorile introduse.

Suprafața ultimului dioptru s-a trasformat din calotă sferică într-o calotă de elipsoid a cărei constantă este 89. Grosimea lentilei centrale a devenit 2.1.

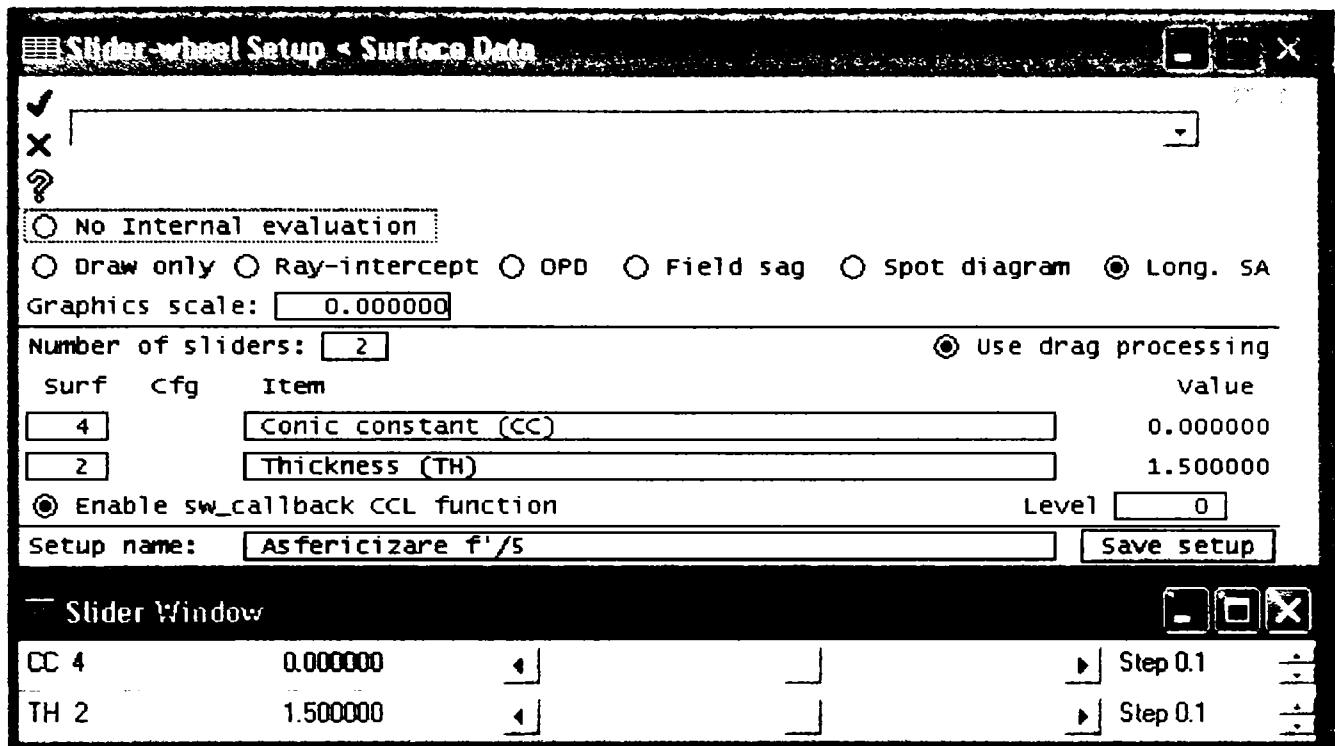


Fig.5.7. Fereastra de setare a variabilelor

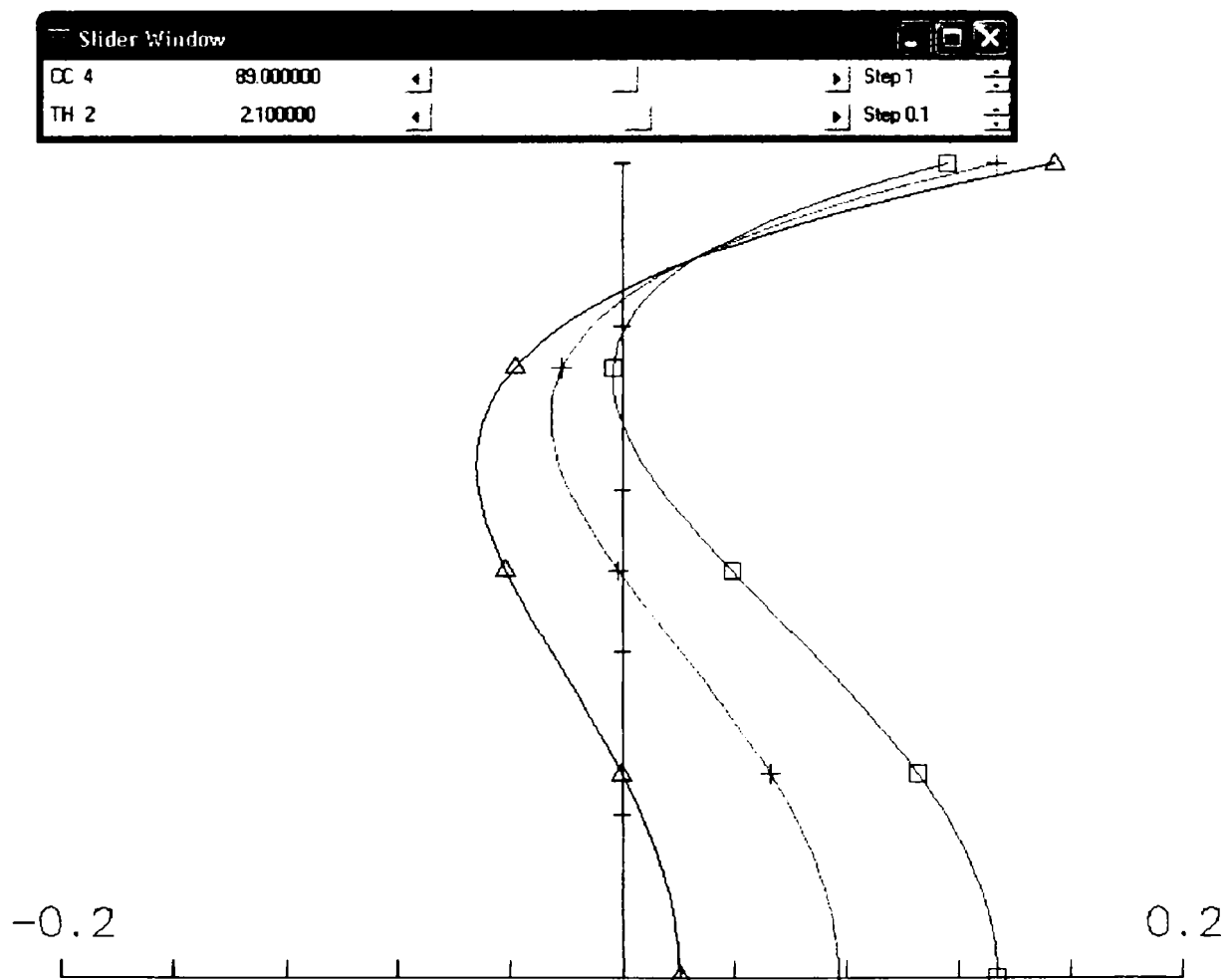


Fig.5.8. Forma finală a curbelor de sferocromatism și a poziției lor în raport cu abscisa de referință prin procedură interactivă cu fereastra "Slider"

Asferizarea a avut ca efect obținerea unei soluții limitate la difracție (fig. 5.9) la deschiderea de 10 mm ($f/5$), ceea ce înseamnă aproape o dublare a aperturilor practice curent.

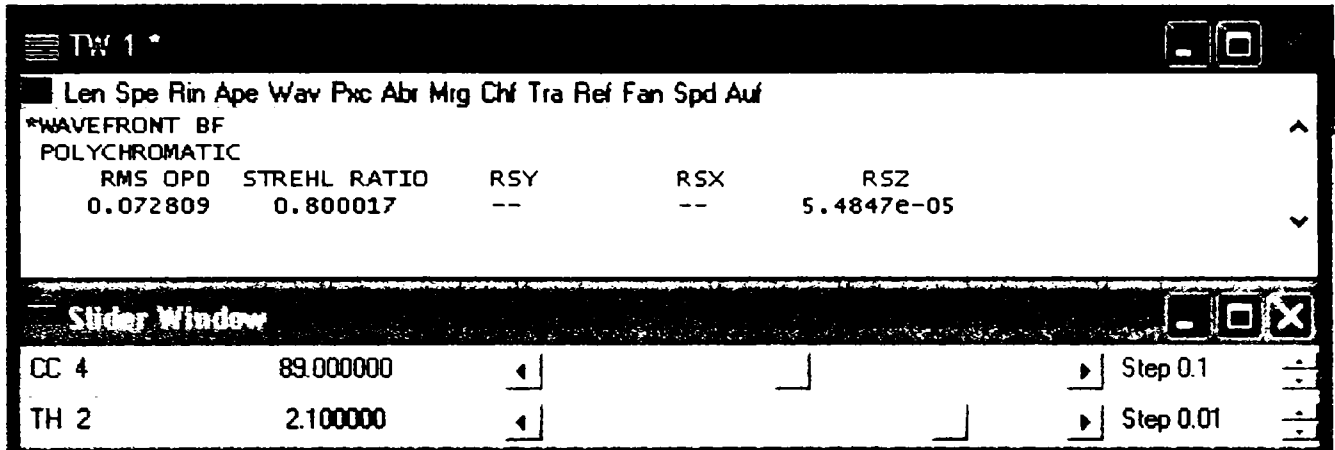


Fig.5.9. Parametri caracteristici ai sistemului cu deschidere $f/5$, cu evidențierea în fereastra "Slider" a valorii constantei conice și a valorii modificate a grosimii lentilei centrale

Figura 5.10 prezintă analiza grafică a aberațiilor sistemului cu deschidere $f/5$

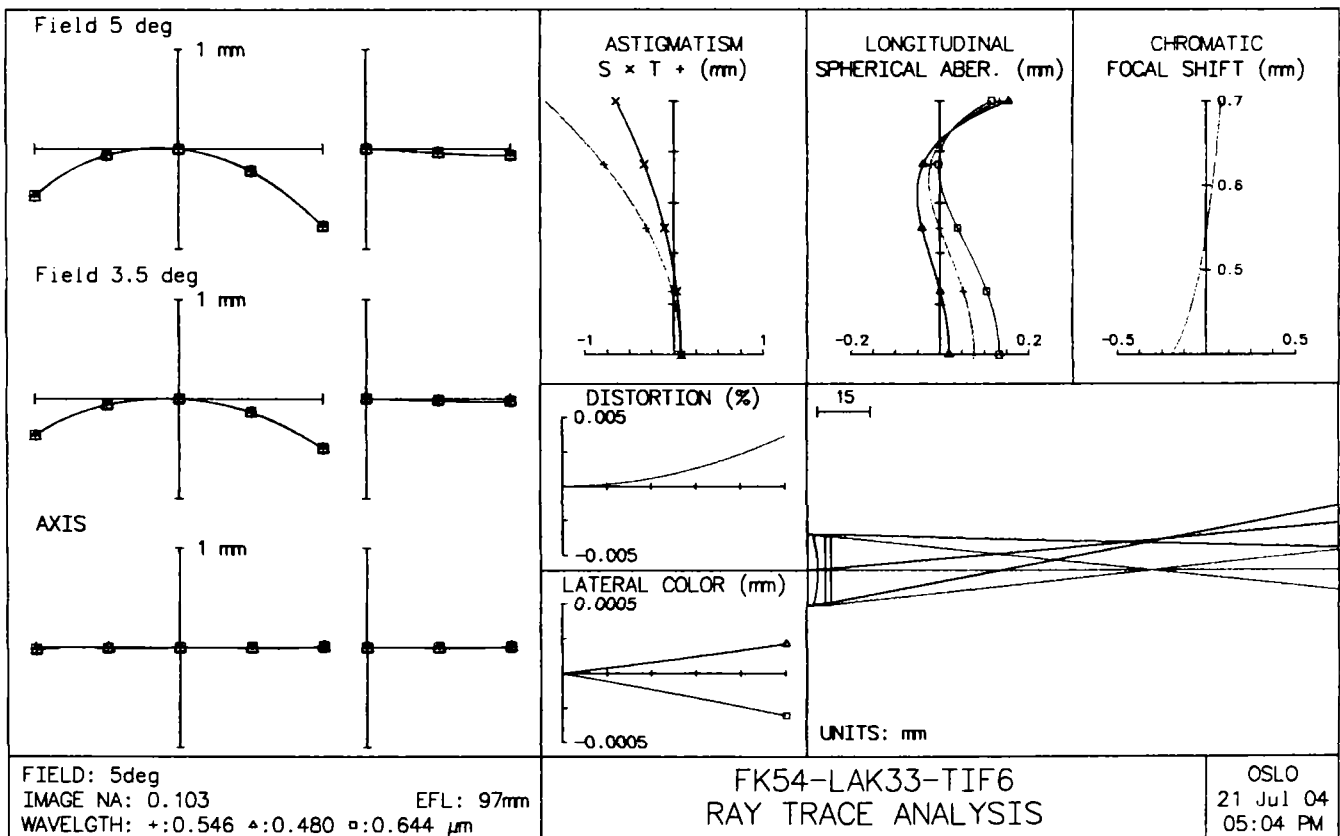


Fig.5.10. Aberațiile geometrice și cromatice ale tripletului $f/5$

În figurile 5.11 și 5.12 sunt redate caracteristicile sistemului scalat pentru $f'=100$ mm.

Surface Data

Command:

Gen Setup Wavelengths Variables Draw On Group Notes

Lens: FK54-LAK33-TIF6_asferic_f/5 Efl 99.997210

Ent beam radius 10.000000 Field angle 5.000000 Primary wavln 0.546074

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.5441e+20	1.3509e+19	AIR	
AST	27.610000	4.850000	10.000000 AS	FK54 C	
2	-41.410000	2.160000	9.759872 S	LAK33 C	
3	1.4120e+03	1.720000	9.764838 S	TIF6 C	
4	-379.250000	0.000000	9.770124 S	AIR	A
IMS	0.000000	92.607080	8.749560 S		

Slider Window

CC 4 89.000000 Step 1

TH 2 2.160000 Step 0.01

TW 1 *

Len S e Rin A e Wav Pxc Abr Mrg Chf Tra Ref Fan Spd Auf

*WAVEFRONT BF POLYCHROMATIC

RMS OPD	STREHL RATIO	RSY	RSX	RSZ
0.066821	0.834339	--	--	--

*LENS DATA

FK54-LAK33-TIF6_asferic_f/5

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	1.5441e+20	1.3509e+19	AIR		
AST	27.610000	4.850000	10.000000 AS	FK54	C	
2	-41.410000	2.160000	9.759872 S	LAK33	C	
3	1.4120e+03	1.720000	9.764838 S	TIF6	C	
4	-379.250000	--	9.770124 S	AIR	*	
IMS	--	92.607080	8.749560 S			

Fig.5.11. Datele complete ale sistemului scalat și optimizat

Pe coloana "SPECIAL" apare simbolul "A", de la asferic. Constanta conice, egală cu 89, fiind supraunitară arată că suprafața este elipsoidală. Caracteristicile elipsei generatoare a suprafeței rezultă cu ajutorul acestei constante a conice $k=89$ și a razei cercului osculator în vârful dioptrului, care se păstrează la valoarea $r=378.25$. Considerând a și b semiaxele elipsei pe direcția axei optice, respectiv a axei y , se pot scrie următoarele relații:

$$k = \frac{b^2}{a^2} - 1, \quad r = \frac{b^2}{a}. \quad (5.16)$$

Rezolvarea sistemului (5.16) conduce la soluțiile $a=4.31$ mm și $b=40.43$ mm.

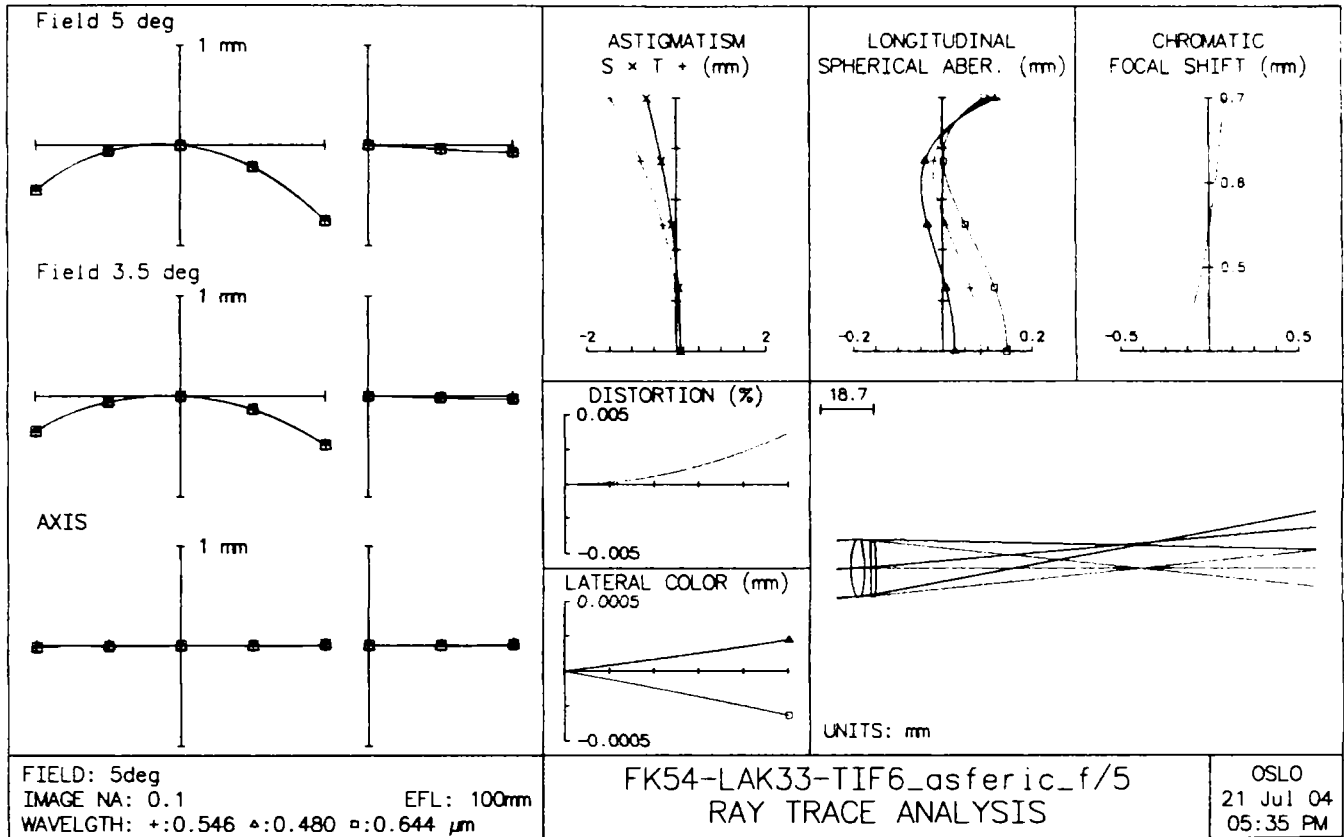


Fig.5.12. Aberrațiile geometrice și cromatice ale tripletului f/5 optimizat

Ecuția elipsei generatoare a suprafeței este de forma:

$$z = \frac{r \left(1 - \sqrt{1 - (k+1) \frac{y^2}{r^2}} \right)}{k+1} = 28.586 \left(1 - \sqrt{1 - 5.56 \cdot 10^{-4} y^2} \right). \quad (5.17)$$

5.3. CONCLUZII

În capitolul 5 au fost expuse rezultatele cercetărilor privind posibilitățile de îmbunătățire a calității apocromatelor prin metode de sinteză și optimizare originale.

Ca metodă alternativă la cea tradițională s-a propus un algoritm de proiectare bazat pe deducerea primei curburi a subansamblului din condiția de minim al aberației sferice primare, având în vedere faptul că principala aberație reziduală a tripletului este cea de deschidere. Metoda a fost aplicată unei combinații de materiale, pentru care prin metoda tradițională, care prevede alegerea arbitrară a primei curburi, nu s-au găsit soluții de calitate corespunzătoare. Metoda a condus la obținerea unei soluții performante și a confirmat matematic observația empirică din capitolul anterior privind alegerea optimă a primei curburi în intervalul $(0.5...0.6)c_a$.

A doua problemă vizată se referă la extinderea deschiderii utile a apocromatelor, care, în general este limitată la f/8. Soluția propusă are la bază ideea asferizării unei suprafețe

exterioare a tripletului. Operația de optimizare, practic de reducere a aberației sferice axiale, s-a realizat interactiv cu ajutorul programului specializat OSLO LT. Asferizarea s-a aplicat ultimului dioptru prin transformarea calotei sferice într-o calotă elipsoidală. Elipsa generatoare păstrează raza sferei de origine ca rază a cercului osculator în vârful dioptrului. Cunoscând constanta conicei, care reprezintă gradul de libertate pus la dispoziția operatorului, se pot determina semiaxele elipsei și ecuația sa în coordonate carteziane, cu originea în vârful dioptrului. Pentru optimizarea poziției curbelor de sferocromatism pe axa absciselor s-a introdus ca variabilă și grosimea la centru a ultimei lentile. Sistemul obținut este limitat la difracție pentru o deschidere $f/5$, ceea ce înseamnă o dublare a aperturii uzuale a apocromatului. Asferizarea nu afectează cromatismul și spectrul secundar al subansamblului.

Printre contribuțiile originale ale autorului se pot formula următoarele:

- ◆ Elaborarea unei metode de sinteză a tripletului apocromat, prin care se elimină alegerea arbitrară a primei curburi a subansamblului
- ◆ Deducerea condiției de minim al aberației sferice primare pentru un ansamblu format din trei lentile lipite, în vederea obținerii formulelor care să constituie algoritmul de sinteză
- ◆ Întocmirea unui program automat de sinteză bazată pe metoda nouă propusă, scris în limbajul QBasic
- ◆ Propunerea unei metode de creștere a deschiderii utile a apocromatului prin asferizarea ultimului dioptru
- ◆ Aplicarea metodei cu ajutorul modulului de optimizare interactivă a programului specializat OSLO LT
- ◆ Obținerea unei soluții cu număr de deschidere $f/5$, ceea ce reprezintă o dublare a aperturii uzuale a apocromatului

Bibliografie: [H1], [K1], [S6], [S7], [W23]

CAP.6. ANALIZĂ CRITICĂ A ABERAȚIILOR CROMATICE ȘI A SPECTRULUI SECUNDAR AL SUBANSABLURILOR LENTICULARE

6.1. ANALIZA ELEMENTELOR DE CONTROL AL CROMATISMULUI SUBANSAMBLURILOR LENTICULARE

Erorile de formare a imaginii se împart în două mari categorii, care tratează separat defectele legate de asemănare, neclaritate, distribuție necorespunzătoare a iluminării – prin categoria aberațiilor geometrice - și erorile de redare a culorilor în planul imagine – prin categoria aberațiilor cromatice.

Aberațiile geometrice sunt datorate exclusiv deschiderii sau/și înclinării mari a fasciculelor luminoase. Corectarea acestora are la bază:

- ◆ Formularea unor criterii de divizare a puterii pe componentele subansamblului, care conține elemente subcorectate și supracorectate
- ◆ Utilizarea unor forme constructive specifice, favorabile reducerii unui anumit tip de aberație vizată
- ◆ Introducerea în sistemele complexe a unor diafragme, prin poziția cărora se poate controla mărimea aberațiilor specifice fasciculelor înclinate

Aberațiile cromatice nu au rădăcini cauzale comune cu aberațiile geometrice și, ca urmare necesită o tratare separată. Relația între aberațiile geometrice și cele cromatice poate fi declarată în sensul că aberațiile geometrice au valori și alură diferită în funcție de lungimea de undă și, ca urmare se poate analiza și o variație cromatică a fiecărui tip de aberație geometrică, fără posibilitatea intervenției asupra dependențelor rezultate, care pot fi privite ca definitive.

Aberațiile cromatice sunt legate direct de doi parametri:

- ◆ Puterea optică a sistemului

◆ Caracteristicile de refracție și dispersie ale sorturilor de sticle

Ca urmare, odată ales sortul sau sorturile de sticle optice și având impusă o anumită putere optică, aberațiile cromatice au valori care nu pot fi modificate prin nici o metodă.

Este important de remarcat faptul că spre deosebire de aberațiile geometrice care în paraxial sunt nule și cresc după diverse legi odată cu înălțimea, cele cromatice se manifestă pe întreaga apertură, cu variație inversă celor geometrice, în sensul că, pentru majoritatea sistemelor, aberațiile cromatice maxime sunt cele paraxiale.

Algoritmii de sinteză încearcă să îmbine modelarea condițiilor de minimizare a una, două sau trei aberații geometrice – funcție de numărul de grade de libertate care se atribuie sistemului – și o formulare a divizării puterii pe lentilele componente din condiția de acromatizare sau apocromazie.

În măsura în care se poate aprecia că aberațiile cromatice, exprimate ca diferențe ale absciselor spectrale extreme, sunt corectate, se poate face o evaluare mai rafinată din punct de vedere al cromatismului, prin determinarea spectrului secundar. În principiu, algoritmii de acromatizare și apocromazie realizează suprapunerea focarelor sau absciselor imagine pentru două sau trei linii spectrale ($F'-C'$ sau $F'-e-C'$) la o înălțime care, în general se află de la zonă spre margine, sau chiar în afara deschiderii utile. Pentru înălțimea de acromazie sau apocromazie spectrul secundar are valorile cele mai reduse, dar crește înspre axa optică unde cromatismul paraxial este maxim. Din acest motiv, variația cromatică a focarului poate fi utilizată ca element de apreciere a spectrului secundar, valorile sale pe axă fiind acoperitoare pentru toate înălțimile de valori nenule.

Pentru aprecierea aberațiilor cromatice și a spectrului secundar este necesară analiza curbelor de sferocromatism (pentru studiul dependenței de înălțime), a variației cromatice a focarului (pentru evaluarea în raport cu lungimea de undă ca variabilă independentă) și a curbelor tangențiale și sagitale (pentru urmărirea evoluției funcției de unghiul de câmp).

Se analizează în continuare caracteristicile cromatice specifice subansamblurilor lenticulare de bază: lentila singulară, dubletul acromat și tripletul apocromat.

6.1.1. Aberațiile cromatice și spectrul secundar al lentilei singulare

Lentila singulară are două grade de libertate, corespunzătoare celor două raze și, ca urmare algoritmul poate avea la bază două condiții, dintre care una trebuie să fie rezervată puterii. În general, a doua condiție vizează minimizarea aberației sferice, rezultând așa-numita "lentilă de cea mai bună formă", pentru că, funcție de indicele de refracție forma lentilei poate fi biconvexă, plan convexă sau menisc (în cazul lentilei pozitive).

Cele două ecuații conțin expresia puterii lentilei infinit subțiri și a primei curburi deduse din condiția de minim al aberației sferice primare:

$$\Phi' = \frac{1}{f'} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = (n-1)(c_1 - c_2) = (n-1)c \quad (6.1)$$

$$-G_2c^2 + 2G_4cc_1 - G_5cp = 0, \quad (6.2)$$

unde Φ este puterea optică, n – indicele de refracție de referință, r_1, r_2 – razele lentilei, c_1, c_2 – curburile lentilei, c – curbura totală a componentei, p – inversul distanței obiect, $G_{2,4,5}$ – coeficienți definiți în relațiile (1.7).

Rezolvarea sistemului format din ecuațiile (6.1), (6.2) conduce la soluțiile:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{0.5(2n+1)c + 2(n+1)p}{n+2} \\ c_2 = \frac{c[0.5n(2n+1) - (n+2)] + 2(n+1)p}{n+2} \end{cases} \wedge s \neq -\infty. \quad (6.3)$$

Pentru cazul frecvent al distanței obiect infinite se obțin soluțiile particulare:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{n(2n+1)c}{2(n+2)} \\ c_2 = \frac{2n^2 - n - 4}{n(2n+1)} c_1 \end{cases} \wedge s = -\infty. \quad (6.4)$$

Pentru păstrarea distanței focale după introducerea grosimii finite, razele r_1 și r_2 ale lentilei echivalente se pot corecta funcție de grosimea d și raportul razelor $q=r_1/r_2$. Raza r_1 este de forma:

$$r_{1(d)} = \frac{r_1}{2} + \sqrt{\frac{r_1^2}{4} - r_1 d \frac{q(n-1)}{n(q-1)}}, \quad (6.5)$$

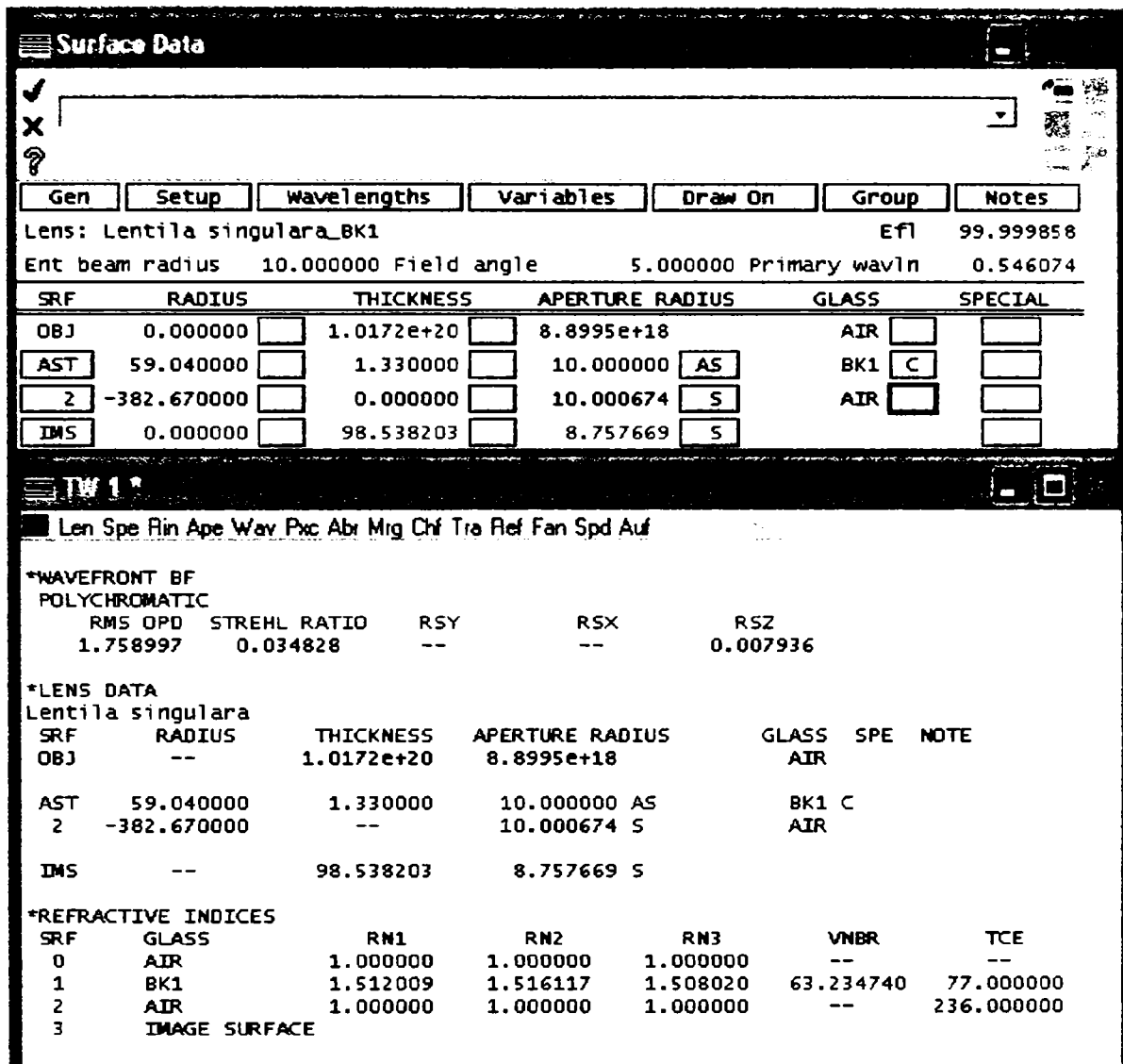
iar $r_{2(d)}$ rezultă din expresia distanței focale a lentilei groase:

$$\begin{aligned} f' &= \frac{n}{n-1} \frac{r_{1(d)} r_{2(d)}}{n(r_{2(d)} - r_{1(d)}) + d(n-1)} \Rightarrow \\ \Rightarrow r_{2(d)} &= \frac{f'(n-1)[nr_1 - (n-1)d]}{n[f'(n-1) - r_1]} \end{aligned} \quad (6.6)$$

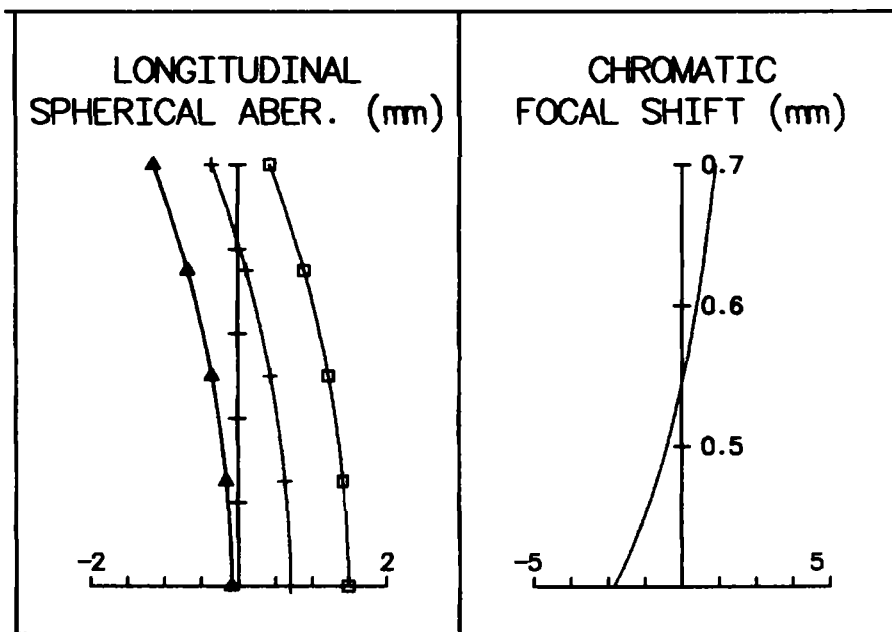
Din punct de vedere al aberațiilor cromatice singurul element de control este sortul de sticlă, ai cărei parametri de refracție și dispersie pot fi considerați ca un grad de libertate suplimentar. Pentru obținerea unei componente cu cromatism rezidual cât mai redus se impune alegerea unui sort cu dispersie mică. Indicele de refracție de referință ar fi indicat la valori mari pentru obținerea curburilor mici, respectiv pentru aberație sferică reziduală cât mai mică. Cele două condiții sunt, în general, contradictorii în raport cu caracteristicile sticlelor optice.

Se prezintă un studiu a cinci variante de soluții obținute pentru o lentilă singulară la care se impune distanța focală $f'=100$ mm, numărul de deschidere $f'/5$ și semiunghiul de câmp 5° ,

pentru materialele BK1, SF57, FK54, PK51A și PSK54, sorturi care aparțin unor familii foarte diferite.



a.



b.

Fig.6.1. Lentila BK1. Caracteristici geometrice și de material, analiza frontului de undă (a).

Detaliu privind aberațiile cromatice axiale (b)

Surface Data

Gen Setup Wavelengths Variables Draw On Group Notes

Lens: Lentila singulara_SF57 EFL 100.004950

Ent beam radius 10.000000 Field angle 5.000000 Primary wavln 0.546074

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0172e+20	8.8995e+18	AIR	
AST	75.520000	1.240000	10.000000	SF57	AS C
2	641.650000	0.000000	9.982800	AIR	S
IMS	0.000000	98.489642	8.758726		S

TW 1

Len Spe Rin Ape Wav Prc Abr Mirg Chf Tra Ref Fan Spd Aul

*WAVEFRONT BF POLYCHROMATIC

RMS OPD	STREHL RATIO	RSY	RSX	RSZ
4.604425	0.014144	--	--	2.3961e-05

*LENS DATA

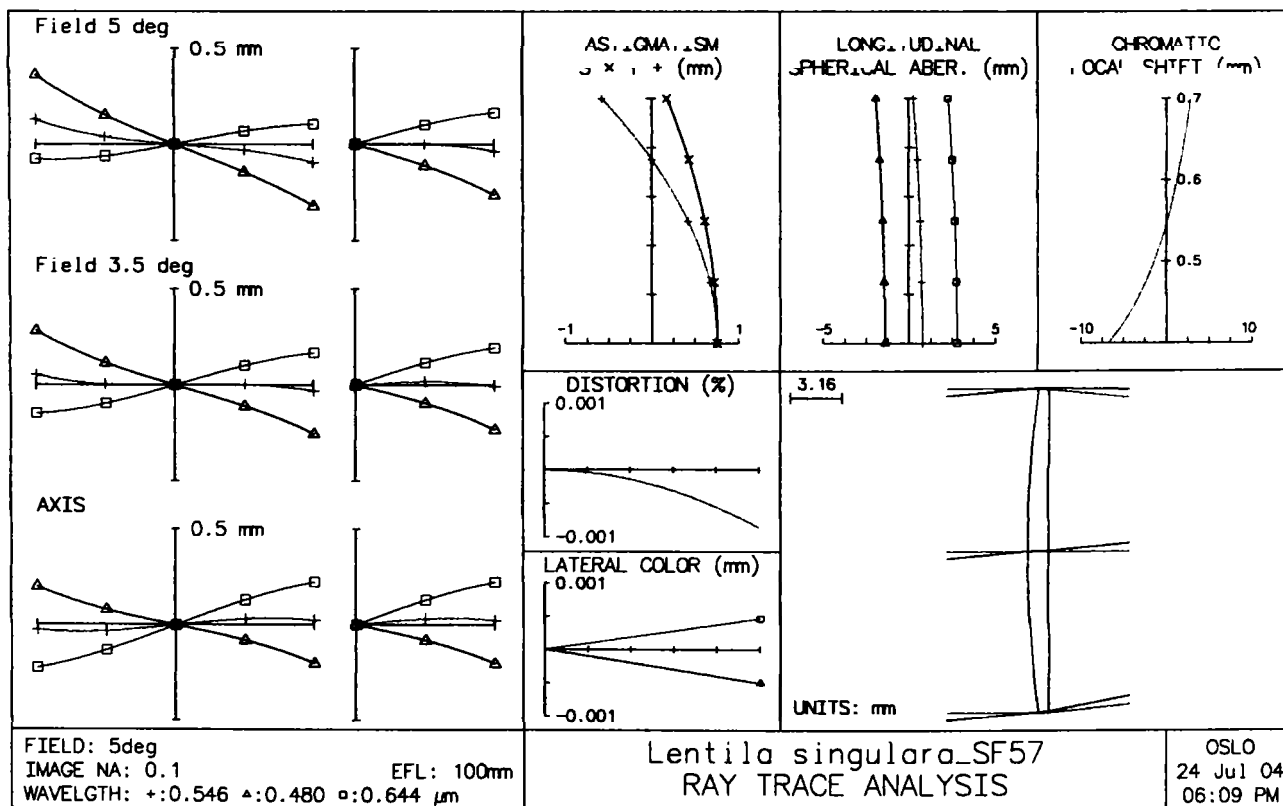
Lentila singulara_SF57

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	1.0172e+20	8.8995e+18	AIR		
AST	75.520000	1.240000	10.000000	SF57	C	AS
2	641.650000	--	9.982800	AIR	S	
IMS	--	98.489642	8.758726		S	

*REFRACTIVE INDICES

SRF	GLASS	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	SF57	1.855036	1.874245	1.838079	23.641663	83.000000
2	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
3	IMAGE SURFACE					

a.



b.

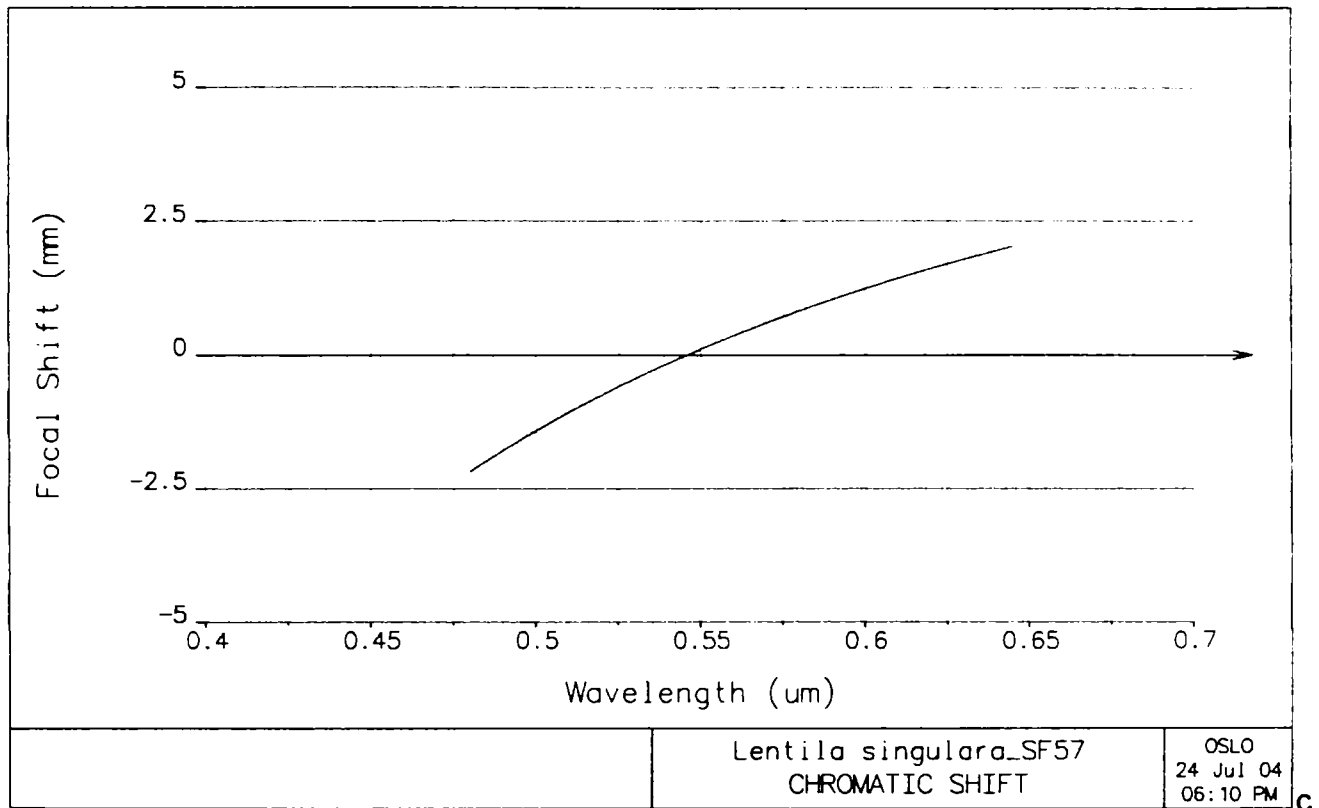
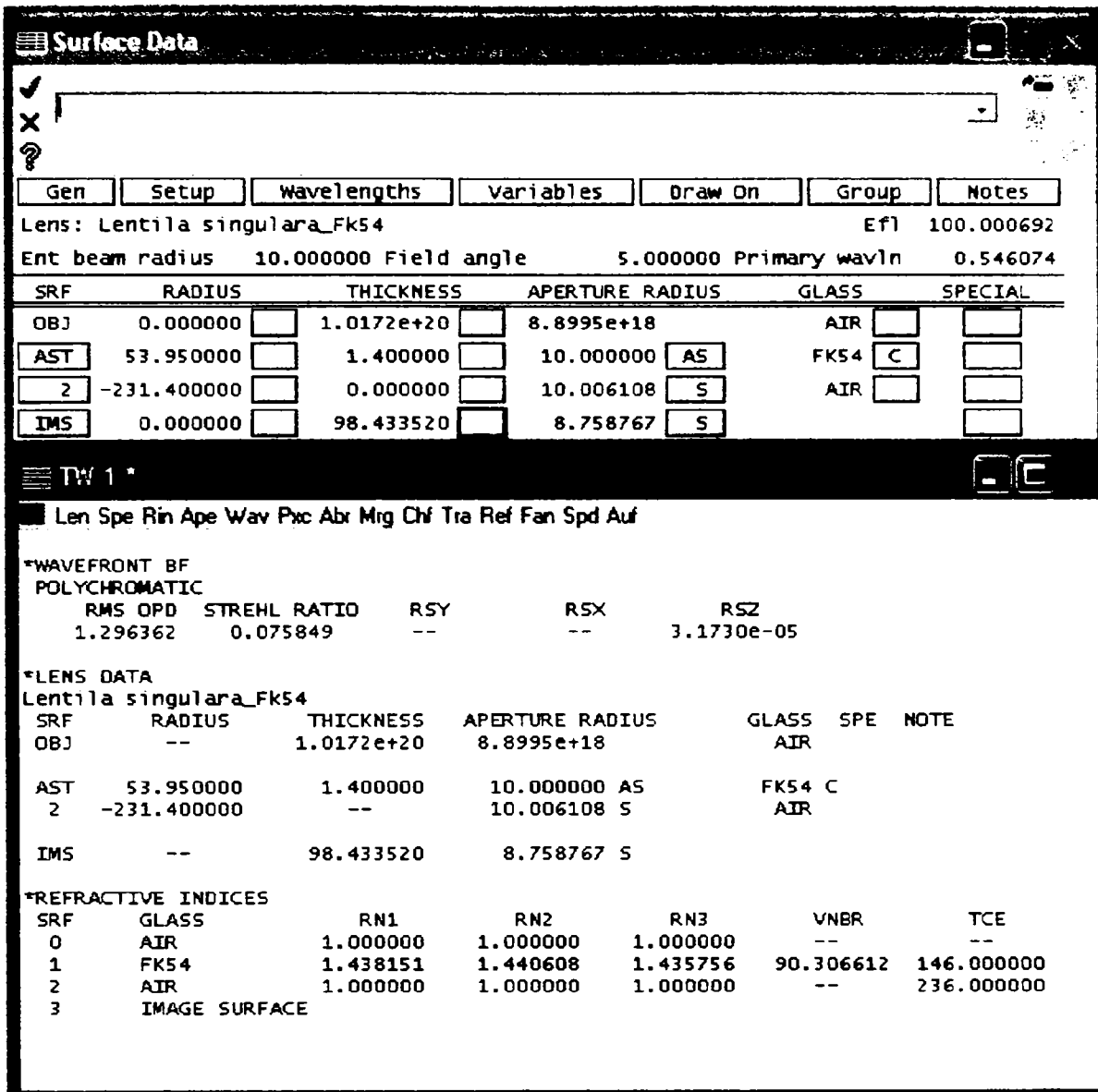
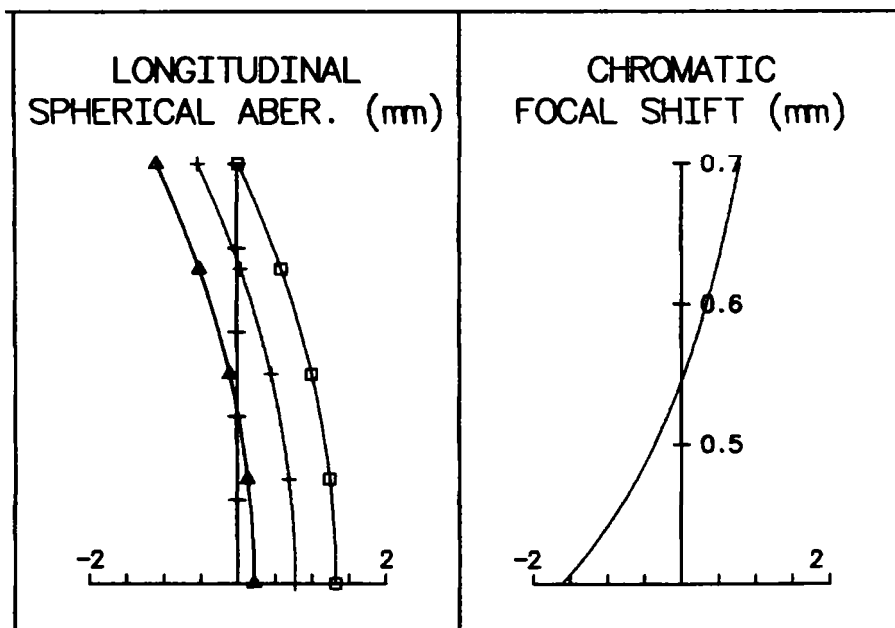


Fig.6.2. Lentila SF57. Caracteristici geometrice și de material, analiza frontului de undă (a). Analiza aberațiilor transversale și reziduale (b). Variația cromatică a focarului pe intervalul spectral de calcul (480...645)nm (c)



a.



b.

Fig.6.3. Lentila FK54. Caracteristici geometrice și de material, analiza frontului de undă (a).

Detaliu privind aberațiile cromatice axiale (b)

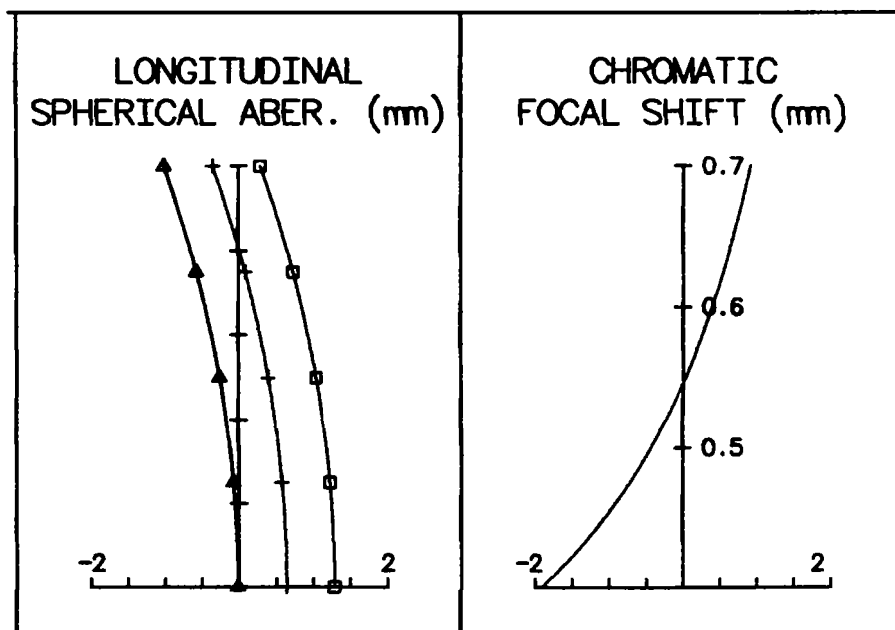
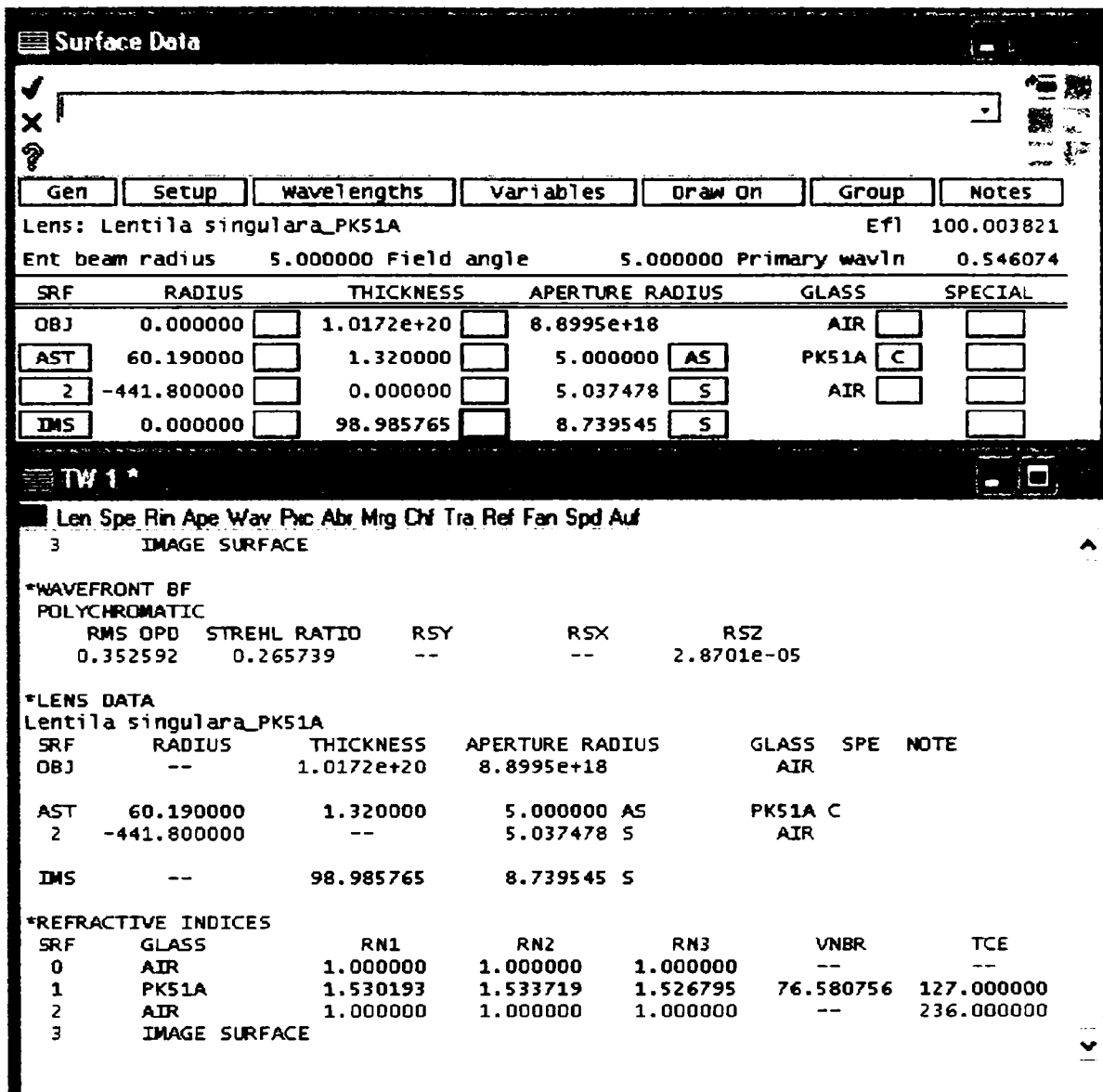


Fig.6.4. Lentila PK51A. Caracteristici geometrice și de material, analiza frontului de undă (a).
Detaliu privind aberațiile cromatice axiale (b)

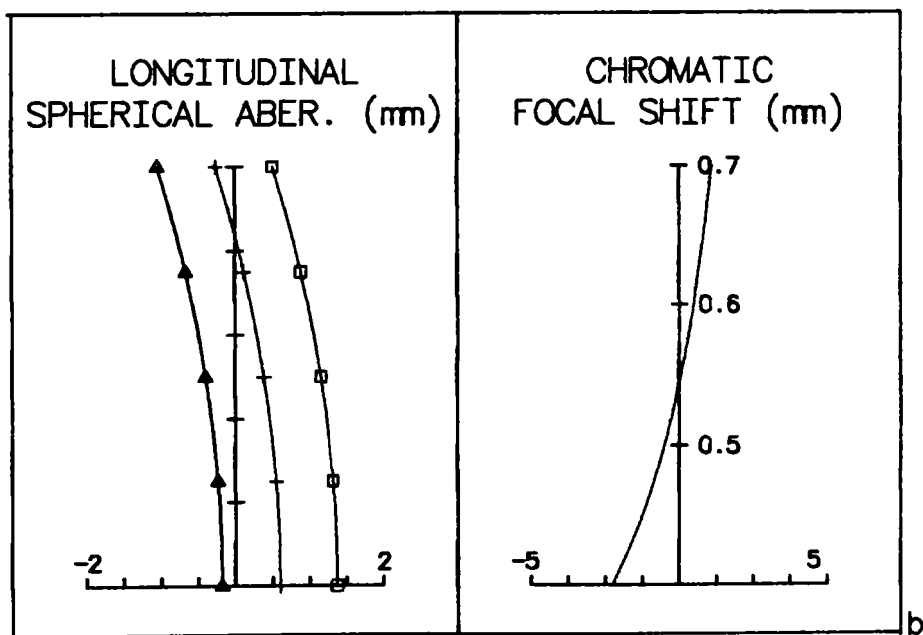
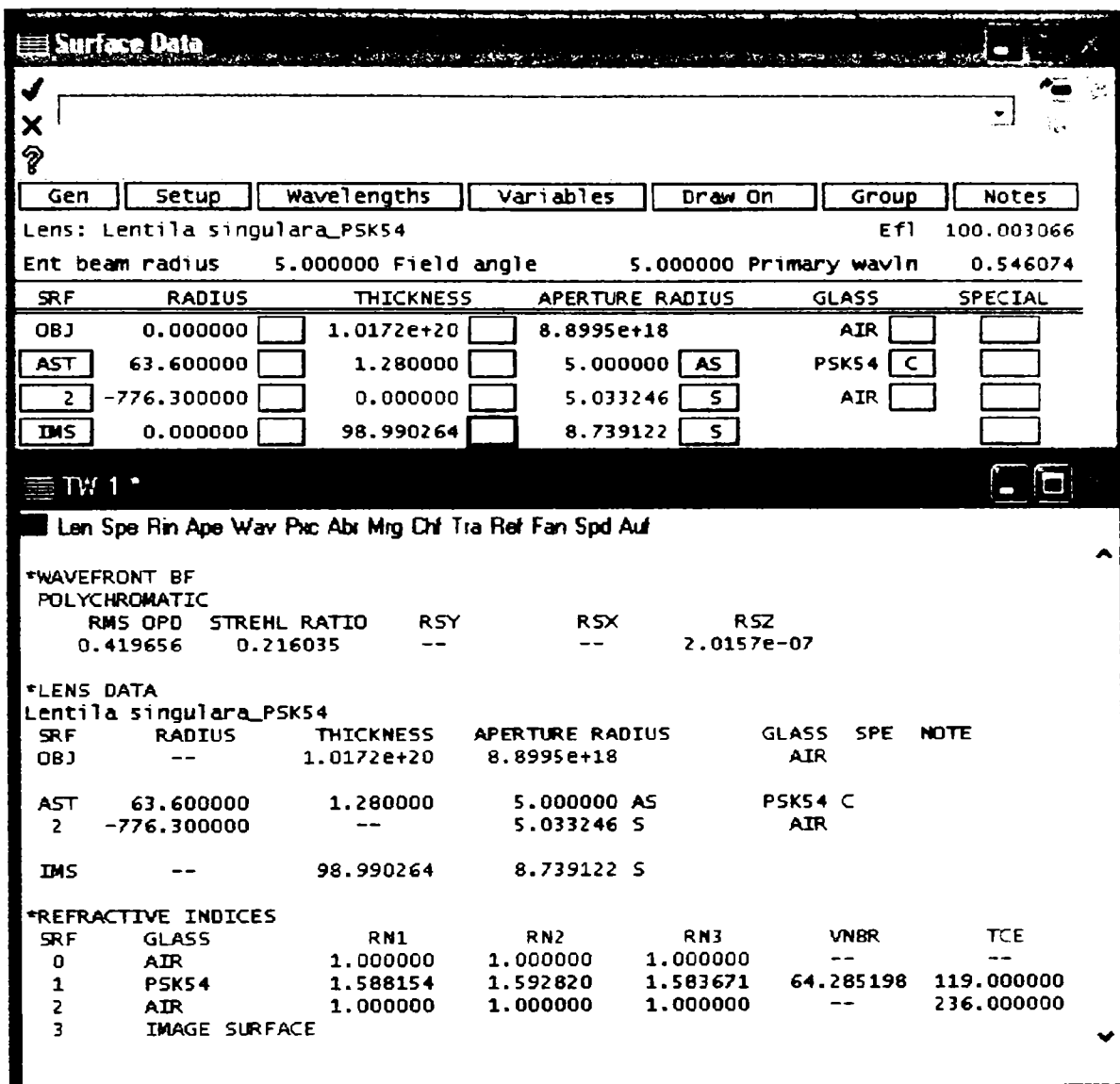


Fig.6.5. Lentila PSK54. Caracteristici geometrice și de material, analiza frontului de undă (a).
 Detaliu privind aberațiile cromatice axiale (b)

În tabelul 6.1 sunt prezentate sintetic caracteristicile lentilelor proiectate și analizate. Valorile aberațiilor sunt scrise în milimetri.

Tabelul 6.1

Sort	n_e	v_e	ds'	$ds'_{cr\ parax}$	$ds'_{sec\ F'-e}$	$ds'_{sec\ e-C'}$	forma	Obs.
BK1	1.52101	63.24	-0.5...+0.75	1.6	~ -0.85	~ 0.75	biconvexă	ds'_{cr} const. pe h
SF57	1.85504	23.64	0...1	4	~ -2.0	~ 2.0	menisc	idem
FK54	1.43815	90.31	-0.5...+0.75	1.25	~ -0.6	~ 0.6	biconvexă	idem
PK51A	1.53019	76.58	-0.25...0.6	1.25	~ -0.6	~ 0.65	biconvexă	idem
PSK54	1.58815	64.29	-0.1...0.6	1.6	~ -0.8	~ 0.8	biconvexă	idem

Analizând figurile 6.1...6.5 și datele din tabelul 6.1 se pot face următoarele observații:

- ◆ Indicii de refracție de referință mici (conform unei analize cunoscute, până la 1.686) conduc la forme constructive biconvexe, favorabile unor aberații sferice reziduale mici, cu caracter de ușoară supracorecție pe toată deschiderea sau cu supracorecție până în zonă și subcorecție spre margine. Rezultatele din tabel corespund unei frontifocale de referință stabilite în urma optimizării prin defocusare. Forma menisc determină aberații sferice mai mari.
- ◆ Din punct de vedere al aberației sferice nici una dintre variante nu se încadrează în toleranța impusă de criteriul Rayleigh (± 0.22 mm la $f/5$).
- ◆ Aberațiile cromatice au valori aproximativ constante pe toată înălțimea, curbele de sferocromatism fiind paralele. Distanța dintre curbele albastră și roșie, respectiv cromatismul axial este determinat numai de caracteristicile sortului de sticlă. Valorile cele mai mici caracterizează soluția pentru care s-a ales sticla cu dispersia cea mai mică (număr Abbe mare), dar indicele de refracție fiind, de asemenea mic, rezultă curburi mari care determină creșterea aberației sferice reziduale.
- ◆ Aberațiile sferice transversale au valori ridicate, după cum rezultă din figura 6.2.b, unde se observă alurile total diferite ale curbelor tangențiale
- ◆ Cele mai bune soluții sunt cele cu indice relativ ridicat și dispersie mică, din categoria sticlelor noi, pentru care aberația sferică, cromatică și spectrul secundar au valori relativ echilibrate.
- ◆ Suma spectrelor secundare F'-e și e-C' este egală cu aberația cromatică paraxială. În fața valorilor spectrelor secundare s-a pus semnul "~" pentru a marca aproximația citirii prin interpolare de pe grafic, având în vedere faptul că acesta este trasat de la violet la roșu, linii corespunzătoare lungimilor de undă 400, respectiv 700 nm. Reprezentarea din figura 6.2.c include numai domeniul spectral de calcul (480...645)nm și indică un spectru secundar foarte accentuat. În general cu cât panta curbei în raport cu axa lungimilor de undă este mai mare, cu atât spectrul secundar

este mai accentuat.

- ◆ Aberațiile cromatice sunt atât de mari încât analiza spectrului secundar pentru lentila singulară este practic inutilă. Totuși se poate remarca faptul că spectrul secundar este constant pe înălțime, ceea pentru alte tipuri de subansambluri nu se poate realiza.
- ◆ Valorile mari ale aberațiilor reziduale, cel puțin la deschiderea $f/5$ analizată determină o calitate slabă a imaginii, nici una dintre soluții nefiind limitată la difracție
- ◆ Dacă totuși s-ar realiza o ierarhizare pe criteriul calității a lentilelor discutate, atunci acestea s-ar plasa în ordinea de preferință: PSK54, PSK51A, Fk54, BK1, SF57.

6.1.2. Aberațiile cromatice și spectrul secundar al dubletului acromat lipit

Dubletul acromat lipit dispune de trei grade de libertate, care sunt utilizate pentru impunerea puterii ansamblului, pentru corectarea aberației sferice și a celei cromatice axiale. Ultimele două condiții se pot realiza prin asocierea unei lentile convergente cu una divergentă pentru compensarea aberațiilor sferice de semn opus și prin utilizarea unor materiale având caracteristici dispersive compensatorii pentru cromatismul sistemului.

Algoritmul de sinteză a dubletului a fost descris în capitolul 1, iar cel de selectare a perechii optime de materiale compatibile, în capitolul 3.

Cu ajutorul acestor algoritmi și programelor automate redate odată cu aceștia s-au proiectat o serie de dublete dintre care se analizează, în continuare, două soluții. Similitudinea observațiilor care se pot face pentru a descrie caracteristicile de calitate a dubletului acromat a limitat exemplele ilustrative la numai două, considerându-se extinderea analizei la un număr mare de soluții ca redundantă.

S-au ales perechile de materiale LAK23-LASFA și K3-F2, declarate ca fiind compatibile în urma demersului din capitolul 3 și s-au proiectat sisteme având impuse aceleași date de intrare ca și toate sistemele analizate în lucrarea prezentă: $f=100$ mm, $f/D=5$, $s=-\infty$, $\omega=5^\circ$.

În figurile 6.6 și 6.7 sunt prezentate foaia de date, fereastra TW1 cu datele complete ale sistemului și, respectiv aberațiile reziduale sub formă grafică, pentru sistemul LAK23-LASF36A.

La o deschidere $f/5$ și un semiunghi de câmp mare, dubletul este limitat la difracție.

De interes pentru prezentul studiu sunt în special curbele de sferocromatism și variația cromatică a focarului. Aceste curbe, reluate în detaliul mărit din figura 6.8, au o alură specifică dubletului acromat.

Pe graficul sferocromatismului se observă corectarea foarte bună a aberației sferice.

Curba care reprezintă aberația sferică, trasată în culoare verde și corespunzătoare liniei spectrale "e", are o alură caracteristică, de forma literei "S" cu partea inferioară aplatizată. În majoritatea cazurilor curba intersectează axa ordonatelor în două puncte unde, aberația sferică este total eliminată. Valoarea reziduală maximă apare la o înălțime din apropierea zonei. Din grafic, rezultă că aberația sferică zonală reziduală este aproximativ 0.05 mm. Celelalte două curbe de sferocromatism, cea albastră și roșie, corespunzătoare liniilor F' și C' sunt plasate în dreapta curbei de referință și se intersectează într-un punct, în care este satisfăcută acromazia, la o înălțime apropiată de cea a aberației sferice reziduale maxime. Spectrul secundar, la înălțimea de acromazie, este maxim pentru linia spectrală "e" și are valoarea de 0.06 mm.

Surface Data

Command:

Gen Setup Wavelengths Variables Draw On Group Notes

Lens: Doublet LaK23-LaSF36A Efl 100.002098
 Ent beam radius 10.000000 Field angle 5.000000 Primary wavln 0.546070

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0205e+20	8.9281e+18	AIR	
AST	153.100000	3.810000	10.000000	LAK23	AS C
2	-32.420000	1.500000	10.099426	LASF36A	S C
3	-82.640000	0.000000	10.169663	AIR	S
IMS	0.000000	98.960020	8.749191		S

TW 1 *

Len Spe Rin Ape Wav Pxc Abr Mrg Chf Tra Ref Fan S, d Auf

*WAVEFRONT BF POLYCHROMATIC

RMS OPD	STREHL RATIO	RSY	RSX	RSZ
0.074437	0.804123	--	--	7.5699e-09

*LENS DATA
 Doublet LaK23-LaSF36A

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	1.0205e+20	8.9281e+18	AIR		
AST	153.100000	3.810000	10.000000	LAK23	AS C	
2	-32.420000	1.500000	10.099426	LASF36A	S C	
3	-82.640000	--	10.169663	AIR	S	
IMS	--	98.960020	8.749191		S	

*REFRACTIVE INDICES

SRF	GLASS	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	LAK23	1.671595	1.677593	1.665836	57.122663	79.000000
2	LASF36A	1.802499	1.814543	1.791499	34.824088	73.000000
3	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	236.000000
4	IMAGE SURFACE					

Fig. 6.6. Foaia de date, analiza statistică a frontului de undă și datele complete ale geometriei și materialelor dubletului LAK23-LASF36A

La înălțimi superioare punctului de acromazie spectrul secundar e-F' crește în timp ce spectrul secundar e-C' scade. La înălțimi inferioare punctului de acromazie spectrul secundar e-F' și e-C' au variații inverse, în sensul că primul scade, iar al doilea crește, valorile extreme fiind pe axă.

De interes este zona paraxială, unde se observă că aberația cromatică axială este maximă. Focarele spectrale se află pe axa optică în ordinea F'_a, F'_F, F'_C, primele două foarte apropiate.

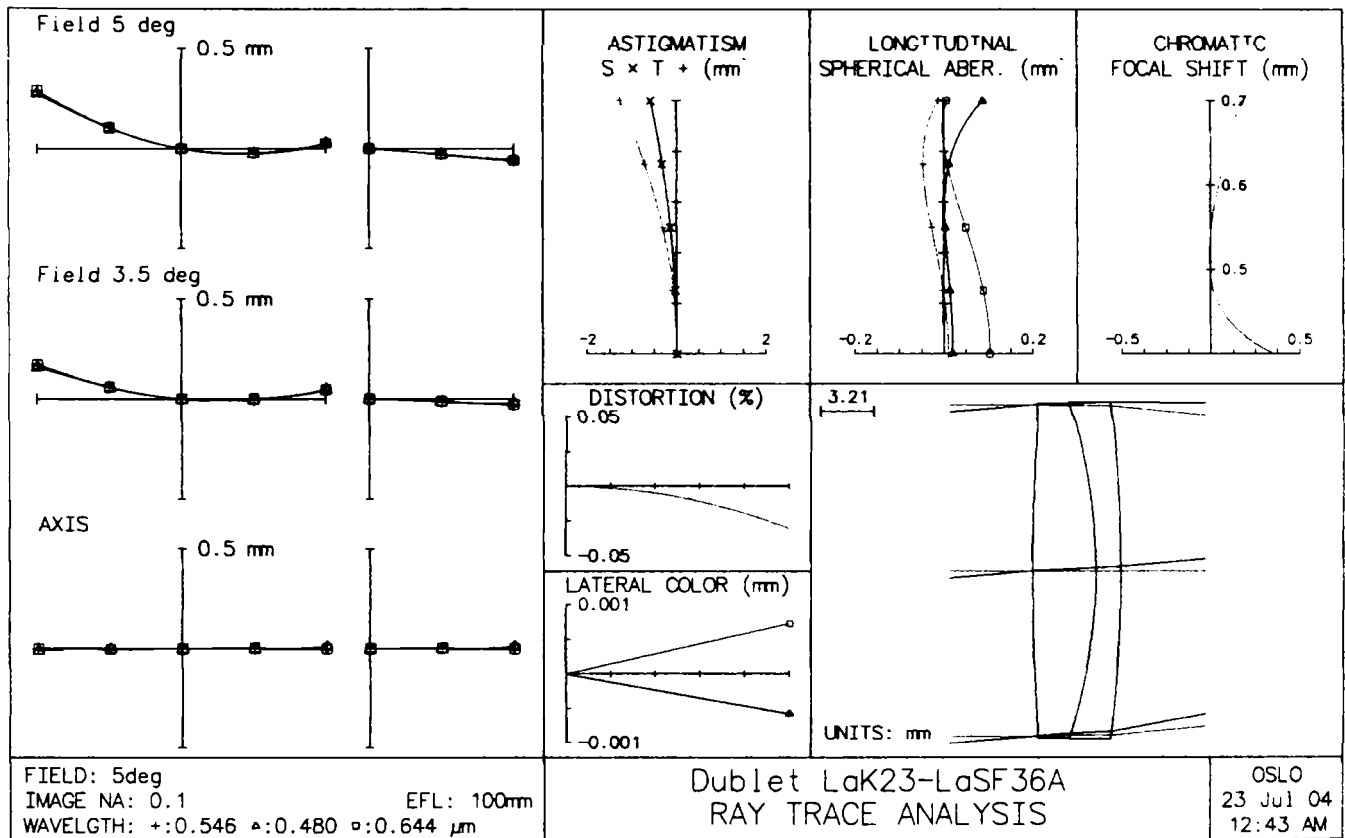


Fig.6.7. Aberațiile geometrice și cromatice reziduale ale dubletului LAK23-LASF36A

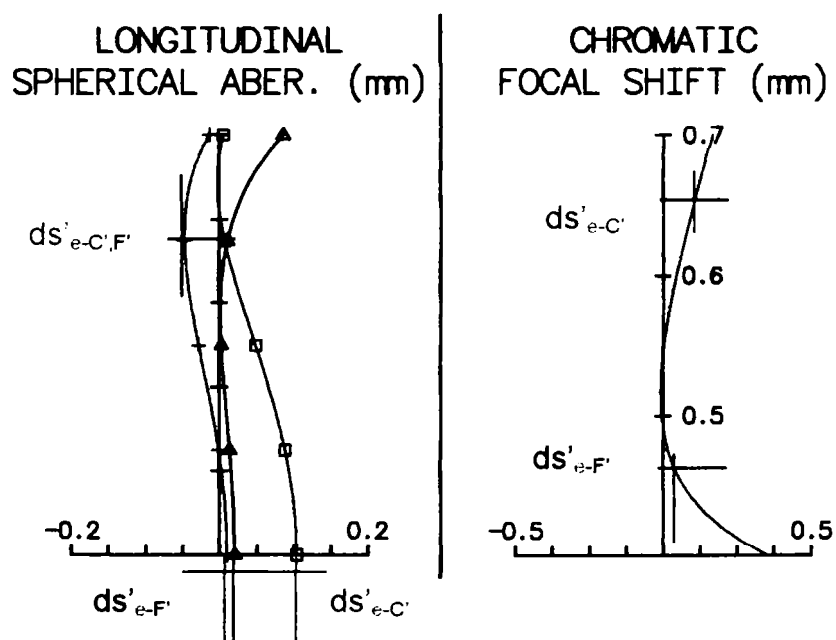


Fig.6.8. Detaliu privind caracteristicile cromatice pentru dubletul LAK23-LASF36A

Această ordine a focarelor, care indică de fapt că cel mai scurt focar de calcul este cel verde, celelalte fiind mai lungi, conduce la o formă specifică a variației cromatice a focarului, cu valori ale spectrului secundar raportat la linia "e", în majoritate pozitive (fig.6.9).

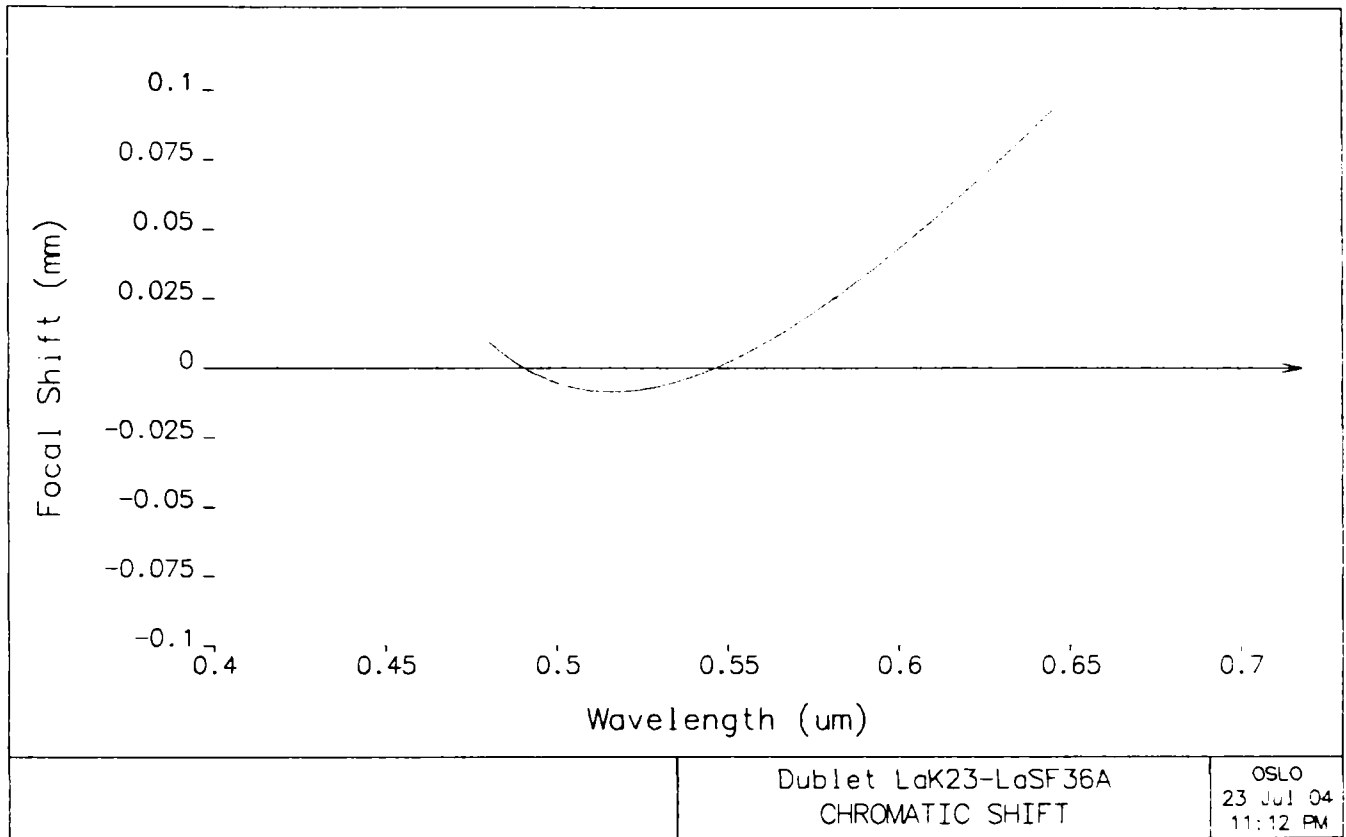


Fig.6.9. Variația cromatică a focarului pentru intervalul spectral de calcul 480nm-645nm

Din figura 6.9, care conține reprezentarea la o scară mai mare, rezultă că, în realitate, cel mai scurt focar se află la o lungime de undă în intervalul (515...520) nm.

Atât pe figura 6.8, cât și pe următoarea se pot deduce valorile spectrului secundar $ds'_{e-F}=0.01\text{mm}$ și $ds'_{e-C}=0.09$, a căror sumă constituie aberația cromatică paraxială $ds'_{cr}=0.1\text{mm}$. În figura 6.8 sunt evidențiate segmentele a căror măsură caracterizează spectrul secundar.

Al doilea exemplu de dublet acromat propus pentru analiză asociază sorturile K3-F2. Caracteristicile sale geometrice și de material, precum și rezultatele statisticii aplicate frontului de undă sunt redată în figura 6.10.

O discuție cu concluzii absolut similare celor formulate pentru soluția anterioară de dublet poate fi expusă pe baza figurilor următoare 6.11...6.13. Cercetarea detaliată a graficelor evidențiază nu numai alurile identice ale curbelor, ci chiar valori egale ale aberațiilor reziduale.

În concluzie se poate spune că un dublet acromat lipit, proiectat corect, asigură puterea impusă, are aberație sferică reziduală de valori extrem de mici și aberații cromatice suficient

de mici pentru ca sistemul să fie limitat la difracție.

Problema care poate fi pusă în discuție are în vedere spectrul secundar. Acromazia este satisfăcută, practic, pentru o singură înălțime, la care spectrul secundar are o valoare relativ ridicată, comparativă cu aceea a aberației sferice reziduale.

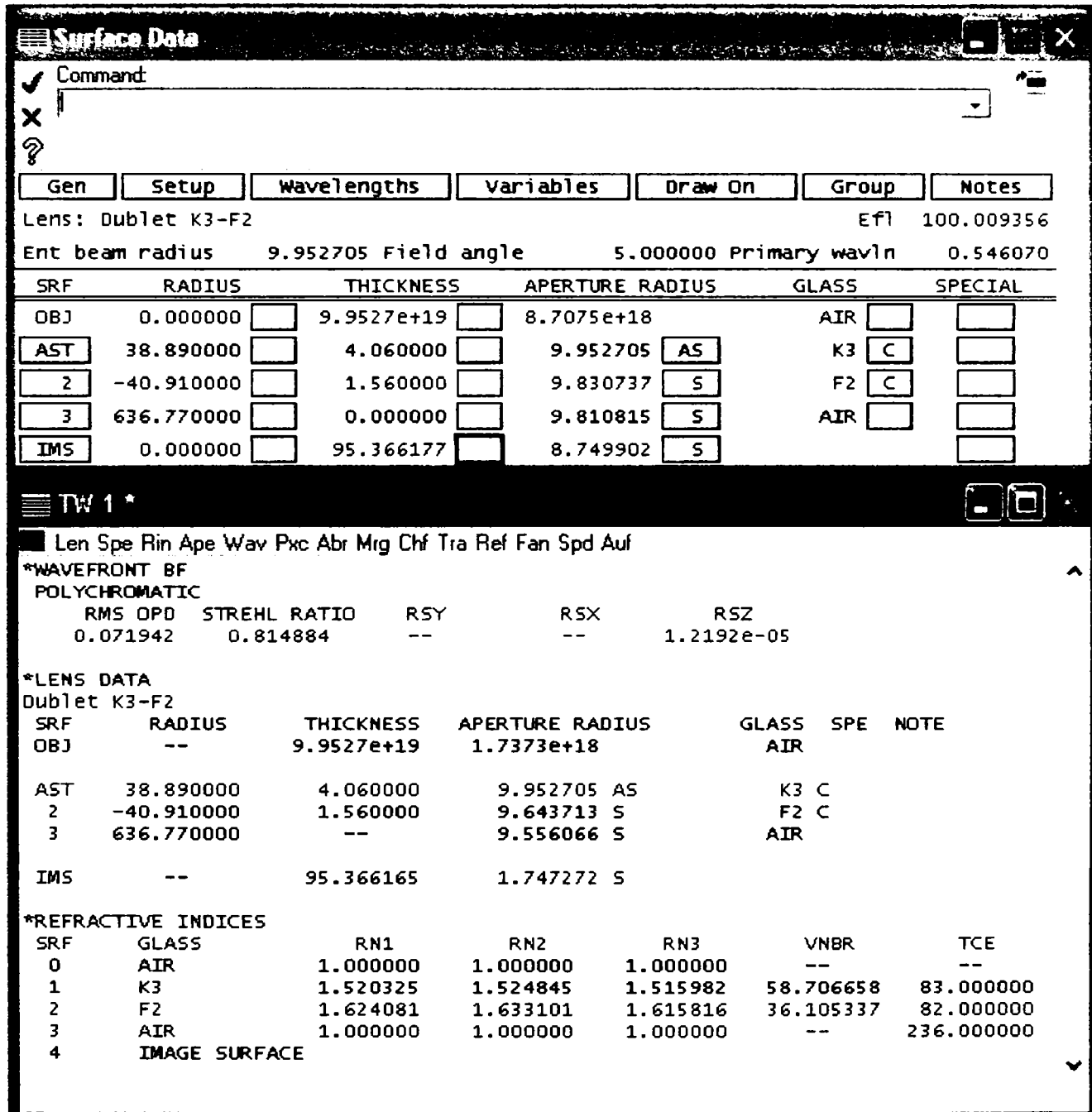


Fig.6.10. Foaia de date, analiza statistică a frontului de undă și datele complete ale geometriei si materialelor dubletului K3-F2

În plus, spectrul secundar este puternic variabil și pe înălțime și pe scara spectrală. Valorile maxime apar in paraxial unde abscisa C' este la o distanță de abscisa de referință e, aproape egală cu cromatismul axial paraxial.

Totuși, față de lentila singulară, dubletul acromat este superior în raport cu toate criteriile de calitate.

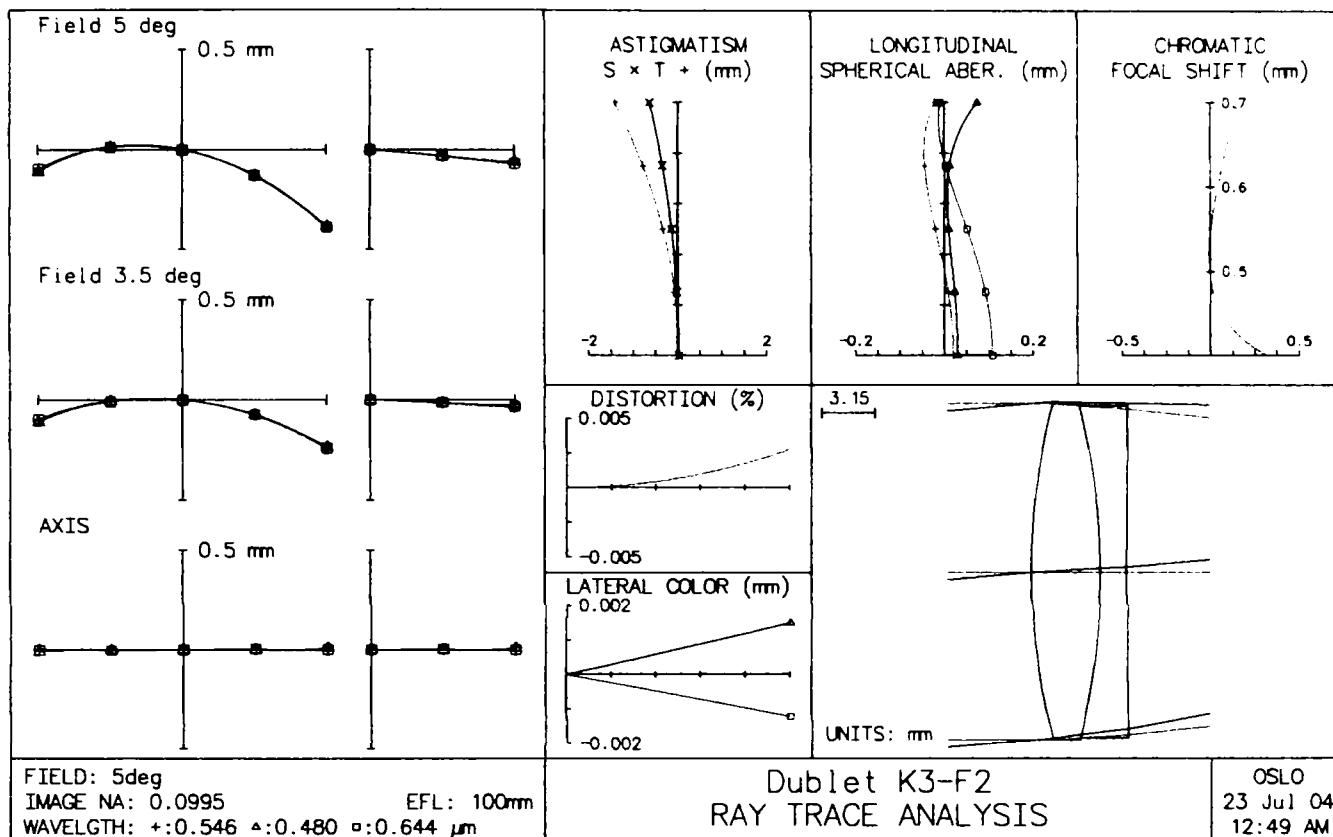


Fig.6.11. Aberațiile geometrice și cromatice reziduale ale dubletului K3-F2

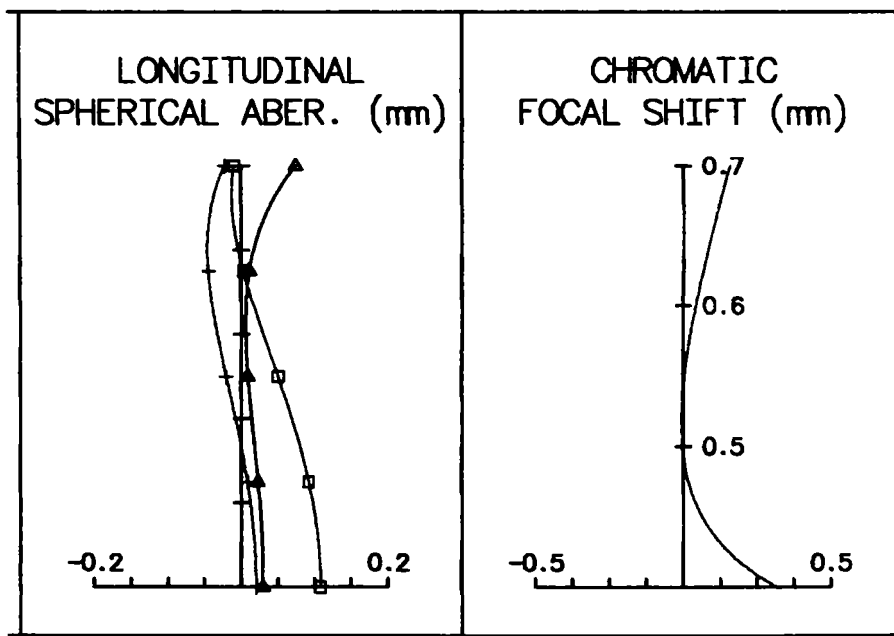


Fig.6.12. Detaliu privind sferocromatismul și variația cromatică a focarului pentru dubletul K3-F2

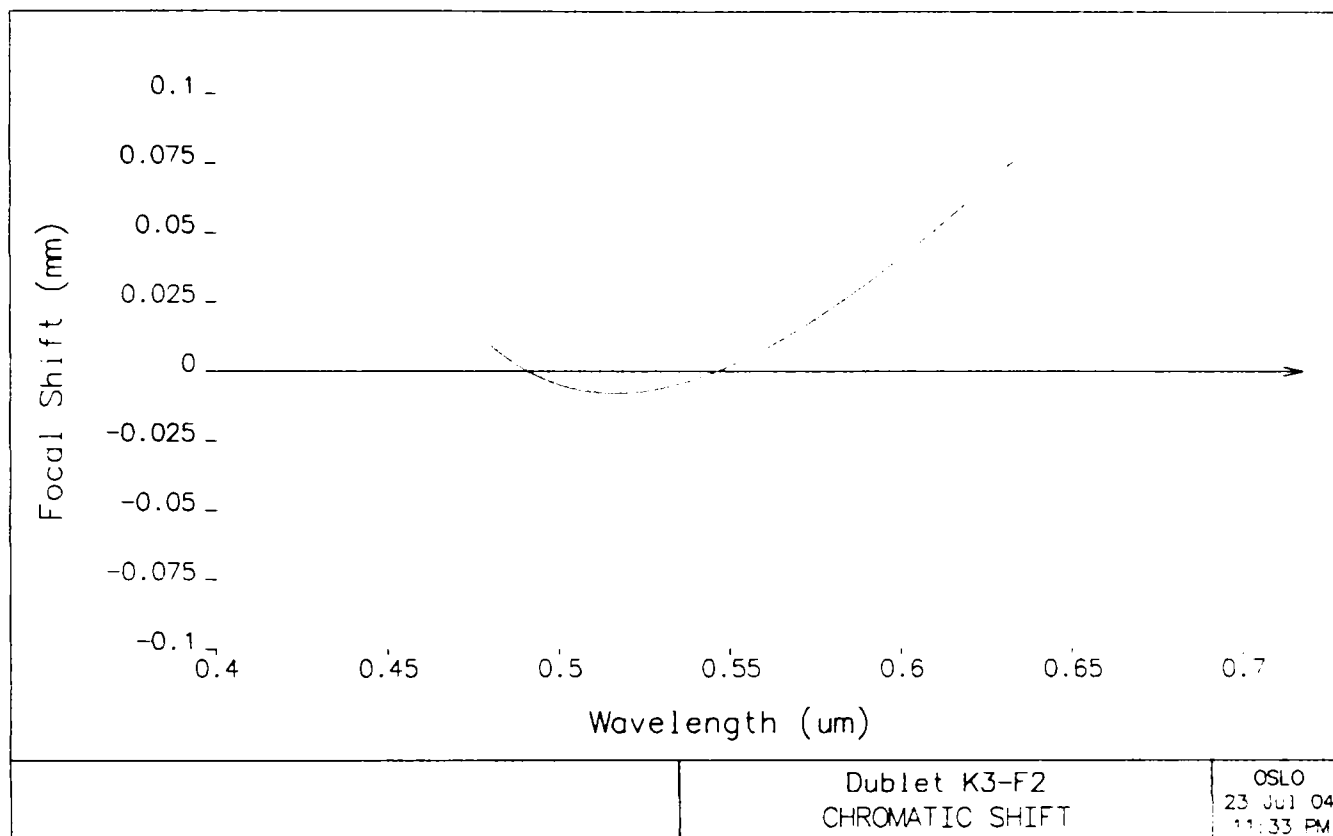


Fig.6.13. Variația cromatică a focarului pentru domeniul spectral de calcul

6.1.3. Aberațiile cromatice și spectrul secundar al tripletului apocromat lipit

Tripletul apocromat lipit este destinat, în special, corectării spectrului secundar. Sinteza sa bazată pe teoria lentilelor subțiri și a aberațiilor primare utilizează condițiile de impunere a puterii, de apocromazie și anulare a spectrului secundar. Având în vedere faptul că subansamblul necesită trei componente, care pun la dispoziție patru grade de libertate și se modelează matematic numai cele trei condiții enunțate mai sus, rezultă dificultățile de proiectare analizate în capitolele anterioare.

Indiferent de metoda de proiectare, dacă sorturile de materiale sunt corespunzător combinate, rezultă soluții de bună calitate. Caracteristicile sticlelor și relațiile dintre parametrii de refracție și dispersie ai acestora determină aberațiile cromatice reziduale, care nu pot fi corectate prin nici o metodă de schimbare a geometriei lentilelor componente.

Pentru analiza mai detaliată a caracteristicilor cromatice ale tripletului lipit s-au ales trei soluții de bună calitate dintre cele prezentate în capitolul anterior. Se consideră două exemple de subansambluri apocromate care combină sticle din familiile FK-LAK-TIF și un exemplu de combinație ca FK-KZFS-TIF. Analiza celor două tipuri de combinații prezintă similitudini, dar și elemente particulare specifice.

În figura 6.14 sunt redate informații complete pentru sistemul FK54-LAK28-TIF6, incluzând geometria subansamblului, caracteristicile de material și rezultatele statisticii

aplicate frontului de undă.

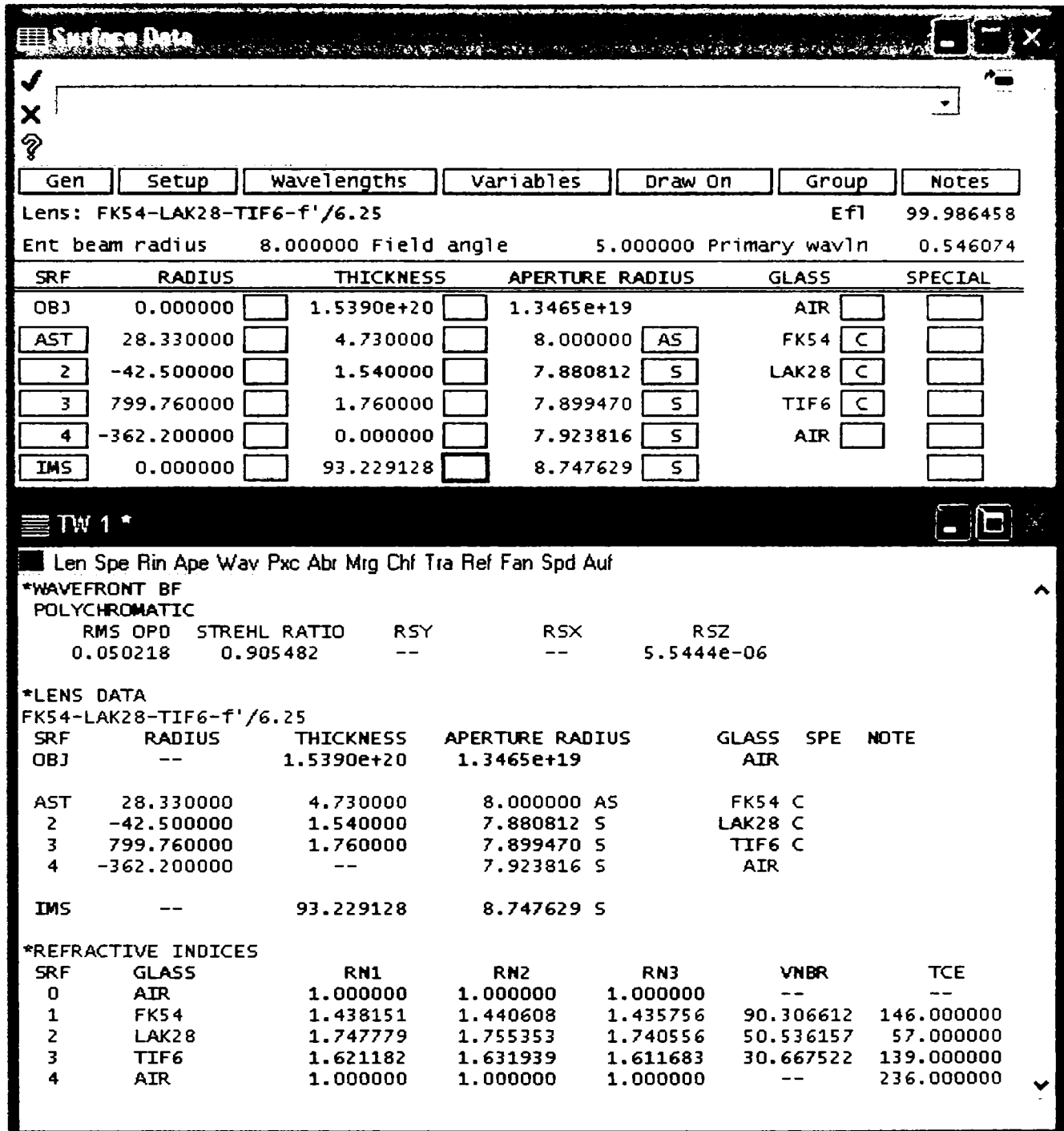


Fig.6.14. Caracteristicile geometrice, de material și analiza frontului de undă pentru tripletul apocromat FK54-LAK28-TIF6

Se observă că tripletul la o deschidere mai mare decât cele uzuale (f'/6.25) este limitat la difracție (RMS OPD = 0.050, raportul Strehl = 0.905) și, ca urmare este de cea mai bună calitate.

Din punct de vedere cromatic (fig.6.15), aberațiile transversale nu prezintă nici un fel de problemă chiar la unghiul de câmp cu valori aproape duble față de cele uzuale. Curbele de interceptare a razelor sunt practic suprapuse pentru cele trei lungimi de undă de calcul, iar

aberația cromatică laterală este extrem de redusă (<5μm). Pentru comparație se pot urmări curbele transversale trasate pentru lentila singulară (fig.6.2.b).

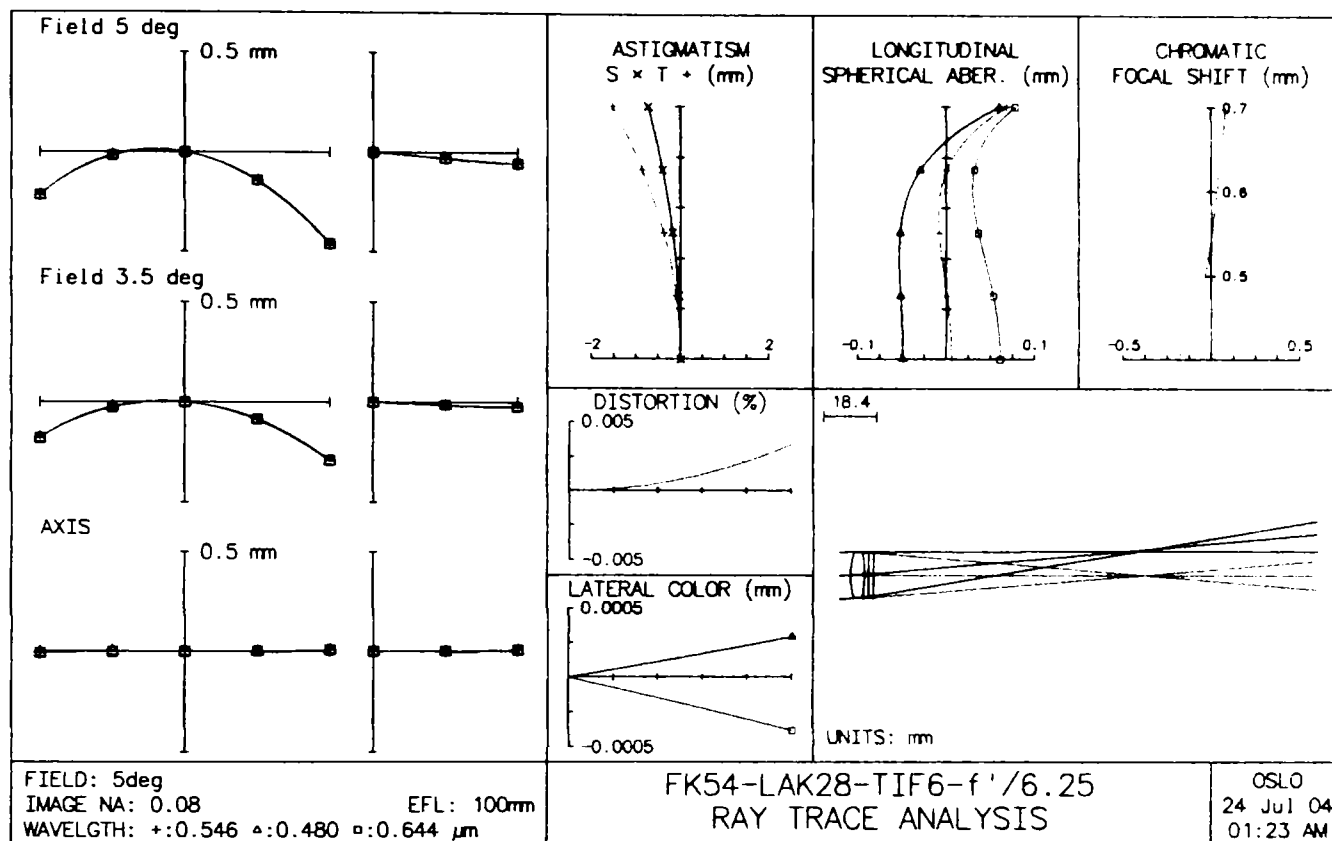


Fig.6.15. Aberațiile geometrice și cromatice reziduale ale tripletului FK54-LAK28-TIF6

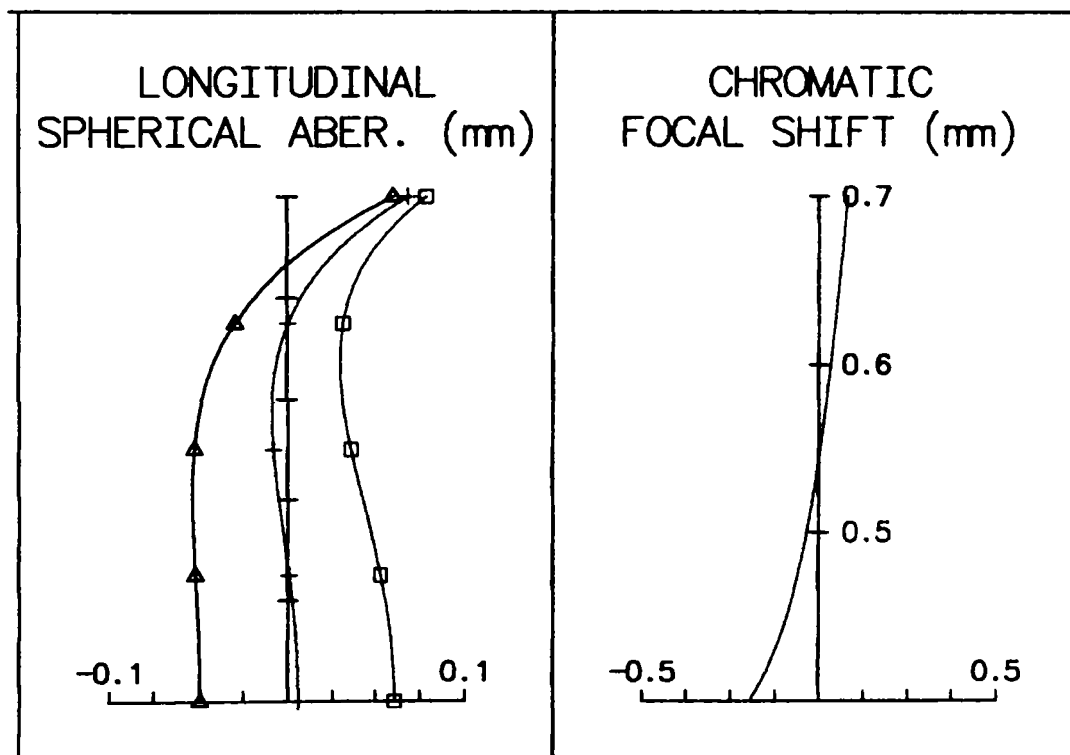


Fig.6.16. Detaliu reprezentând curbele de sferocromatism și variația cromatică a focarului pentru tripletul FK54-LAK28-TIF6

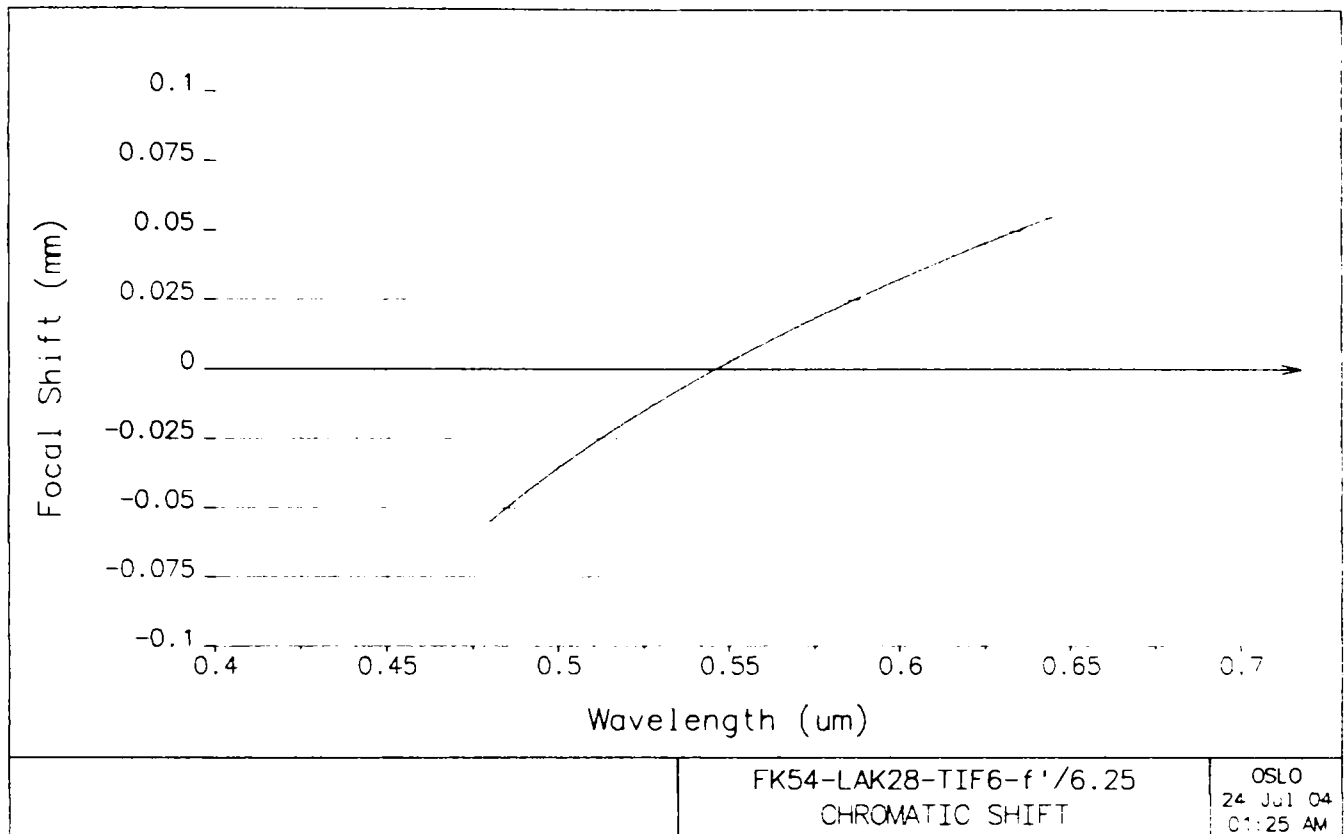


Fig. 6.17. Variația cromatică a focarului în intervalul spectral de calcul (480...645)nm pentru tripletul FK54-LAK28-TIF6

De interes este analiza aberațiilor cromatice axiale și spectrul secundar. În detaliul din figura 6.16 sunt redată mărit curbele de sferocromatism și variația cromatică a focarului. Se observă că aberația sferică are forma similară celei specifice acromatului. În cazul analizat este practic neglijabilă până în zonă, de unde are o creștere accentuată, fiind maximă în zona marginală. Valoarea reziduală este de aproximativ 0.06 mm. La deschiderea maximă tradițională $f'/8$, sistemul ar putea fi considerat lipsit complet de aberație sferică. Curbele de culoare roșie și albastră au o alură specifică tripletului apocromat. Ele sunt aproximativ echidistante față de curba centrală verde pe toată înălțimea. Spectrele secundare relative la liniile extreme F' și C' au valori echilibrate, scăzătoare odată cu creșterea înălțimii, până la anulare în punctul de apocromazie unde se intersectează toate cele trei curbe. Acest punct, în cazul considerat, se află la mică distanță față de înălțimea maximă impusă. De la caz la caz, punctul de apocromazie se află la distanță mai mică sau mai mare față de axa optică și, se poate întâmpla, deci, să nu se afle în deschiderea utilă a sistemului. Cazul cel mai favorabil corespunde unei poziții a punctului de apocromazie la o înălțime în jurul zonei sau chiar mai jos. Astfel cromatismul paraxial ar avea valori mult reduse, ca de altfel și spectrul secundar.

Aberația cromatică axială paraxială reziduală este de aproximativ 0.11mm, iar spectrele secundare relative la liniile extreme F' și C' reprezintă cam jumătate din aceasta. Valorile

paraxiale ale acestor parametri sunt maxime, fiind în scădere până la anulare în punctul de apocromazie. Este acoperitor deci studiul variației cromatice a focarului, prezentate în figura 6.16 pentru un spectru larg (400-700) nm și pentru spectrul de calcul (480...645) nm în figura 6.17. Alura curbei este caracteristică sistemelor apocromate. Variația este aproape o dreaptă, care în mod ideal ar fi o verticală. Ca urmare, sistemul este cu atât mai bine corectat la spectru secundar, cu cât panta dreptei este mai mare (în reprezentarea cu λ pe ordonată – fig.6.16) sau mai mică (în reprezentarea cu λ pe abscisă – fig.6.17).

Prin comparație între figurile 6.2.c și 6.17 se pot evalua diferențele cu totul apreciable dintre performanțele lentilei singulare și ale unui apocromat. Față de dubletul acromat, deși aberația cromatică paraxială este comparabilă, tripletul apocromat are spectrul secundar echilibrat, uniform scăzător până la anulare și ca valori este cu unu sau două ordine de mărime mai redus. La acromat curbele F' și C' deși au un punct de concurență, sunt la distanță de curba e pe toată înălțimea. Spectrul secundar este prezent pe întreaga apertură, variabil astfel încât impune o formă specifică a variației cromatice a focarului și poate atinge valori apropiate de aberația cromatică totală.

În figurile 6.18...6.21 este prezentat și analizat tripletul FK54-LAK33-TIF6, cu ultimul dioptru asferizat pentru creșterea deschiderii utile a subansamblului. Apertura acestuia este caracterizată prin numărul de deschidere $f/5$, ceea ce reprezintă o dublare a valorilor practicate curent, datorită limitărilor impuse de aberația sferică reziduală.

Se observă că înălțimea de apocromazie este cam la același nivel ca și pentru soluția analizată anterior, dar apertura fiind mai mare, este bine pus în evidență.

Sistemul, care utilizează o combinație de materiale din aceleași familii ca și în primul exemplu discutat, prezintă caracteristici absolut similare. Asferizarea nu a influențat comportamentul cromatic, ci a condus la reducerea aberației sferice, astfel încât a fost posibilă obținerea unei soluții limitate la difracție cu deschidere foarte mare.

Din punct de vedere al cromatismului și spectrului secundar se pot face aceleași observații ca și pentru tripletul FK54-LAK28-TIF6.

Surface Data

Gen
 Setup
 Wavelengths
 Variables
 Draw On
 Group
 Notes

Lens: FK54-LAK33-TIF6_asferic_f/5 Efl 99.997210
 Ent beam radius 10.000000 Field angle 5.000000 Primary wavln 0.546074

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.5441e+20	1.3509e+19	AIR	
AST	27.610000	4.850000	10.000000 AS	FK54	C
2	-41.410000	2.160000	9.759872 S	LAK33	C
3	1.4120e+03	1.720000	9.764838 S	TIF6	C
4	-379.250000	0.000000	9.770124 S	AIR	A
IMS	0.000000	92.607078	8.749560 S		

TW 1 *

Len
 Spe
 Rin
 Ape
 Wav
 Pxc
 Abr
 Mrg
 Chf
 Tra
 Ref
 Fan
 Spd
 Auf

***WAVEFRONT BF**
POLYCHROMATIC

RMS OPD	STREHL RATIO	RSY	RSX	RSZ
0.066821	0.834339	--	--	1.9758e-06

***LENS DATA**
FK54-LAK33-TIF6_asferic_f/5

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
OBJ	--	1.5441e+20	1.3509e+19	AIR		
AST	27.610000	4.850000	10.000000 AS	FK54	C	
2	-41.410000	2.160000	9.759872 S	LAK33	C	
3	1.4120e+03	1.720000	9.764838 S	TIF6	C	
4	-379.250000	--	9.770124 S	AIR	*	
IMS	--	92.607078	8.749560 S			

***REFRACTIVE INDICES**

SRF	GLASS	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
0	AIR	1.000000	1.000000	1.000000	--	--
1	FK54	1.438151	1.440608	1.435756	90.306612	146.000000
2	LAK33	1.757404	1.764819	1.750309	52.198549	60.000000
3	TIF6	1.621182	1.631939	1.611683	30.667522	139.000000

Fig.6.18. Caracteristicile geometrice, de material și analiza frontului de undă pentru tripletul apocromat FK54-Lak33-TIF6

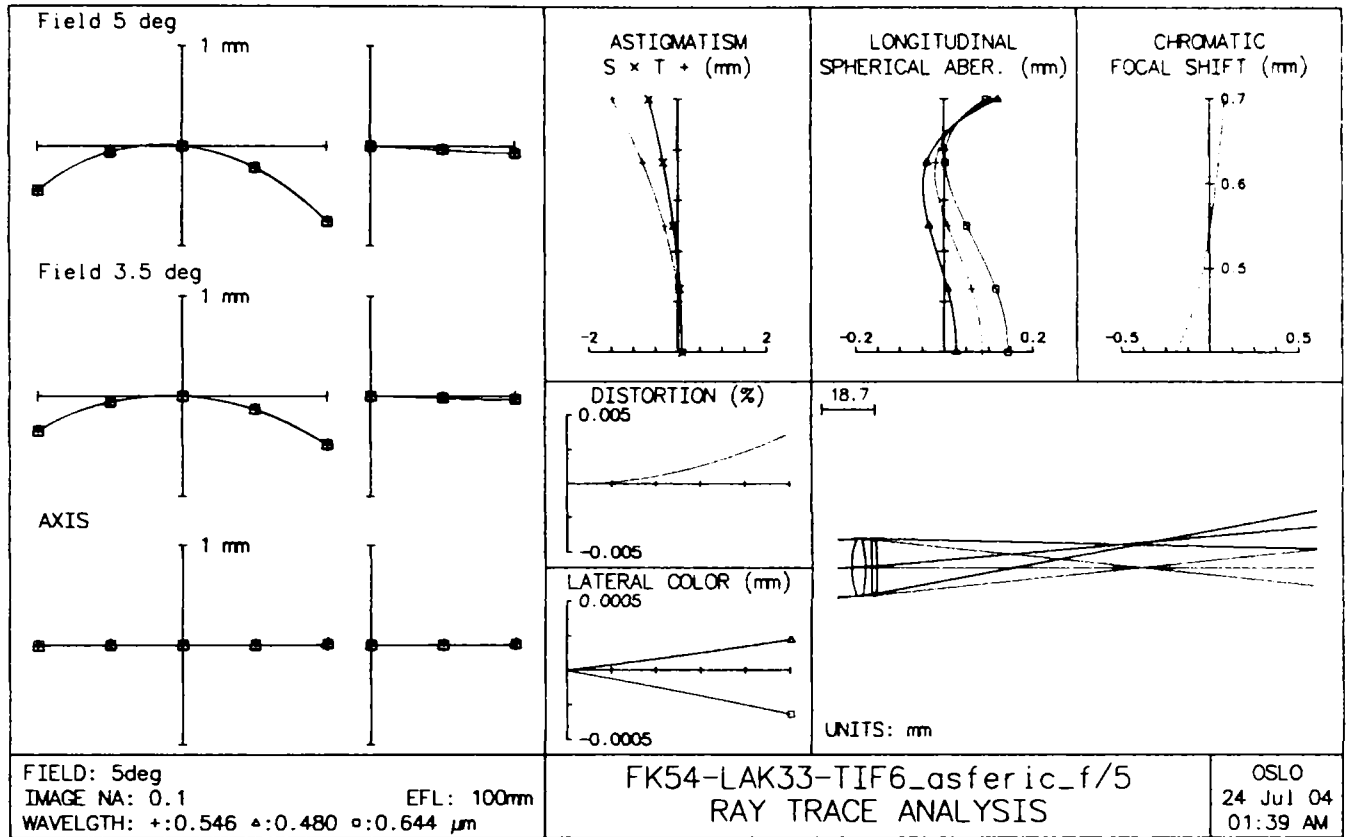


Fig.6.19. Aberațiile geometrice și cromatice reziduale ale tripletului FK54-LAK33-TIF6

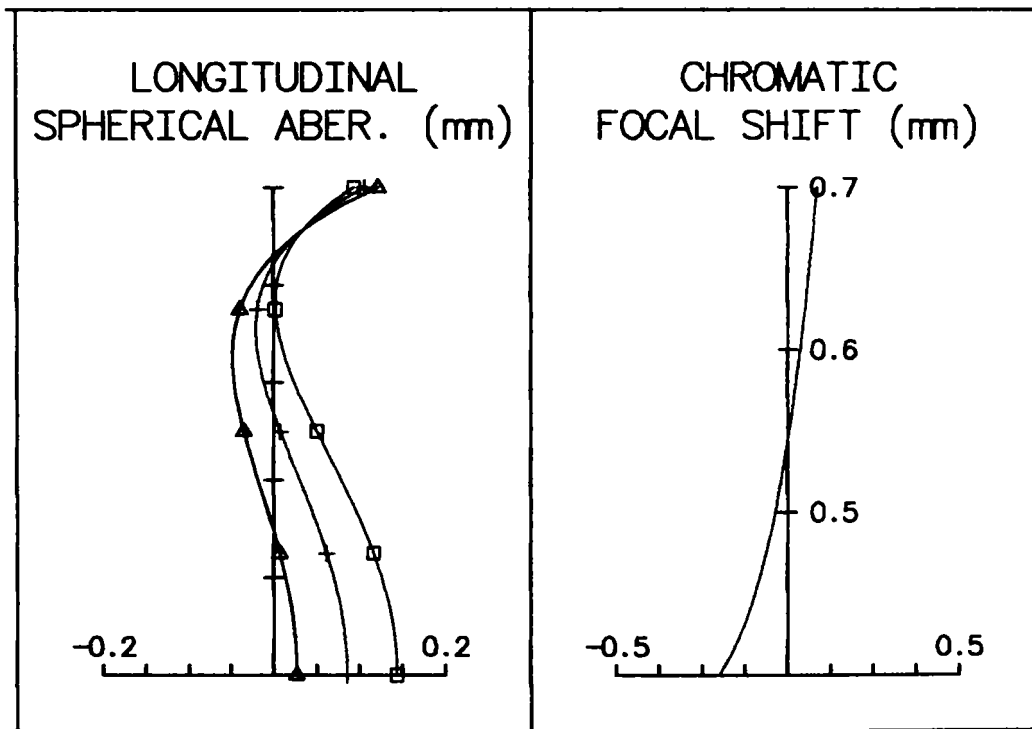


Fig.6.20. Detaliu reprezentând curbele de sferocromatism și variația cromatică a focarului pentru tripletul FK54-LAK33-TIF6

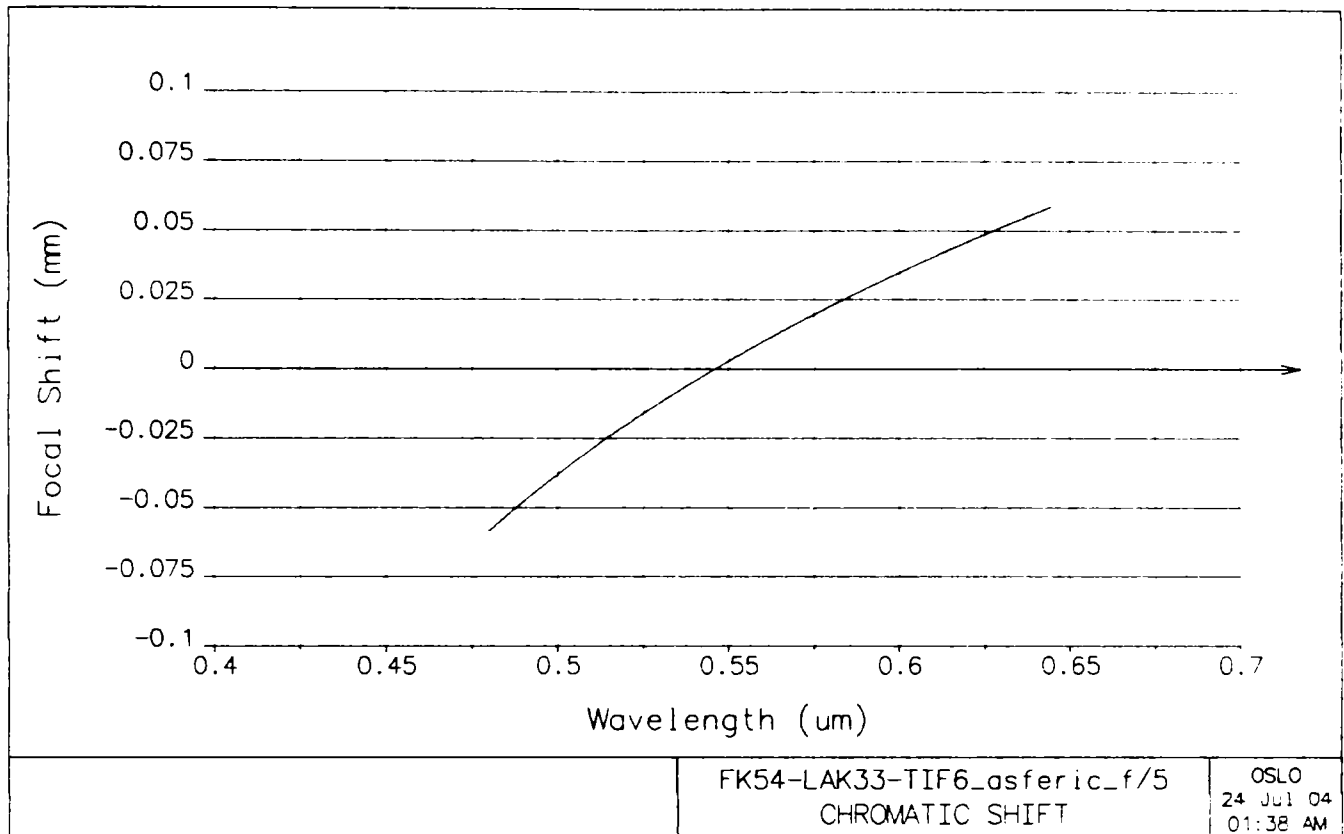


Fig. 6.21. Variația cromatică a focarului în intervalul spectral de calcul (480...645)nm pentru tripletul FK54-LAK33-TIF6

Următorul exemplu pune în discuție o combinație care pentru lentila centrală conține o sticlă din familia KZFS. Tripletul FK54-KZFS1-TIF6 este prezentat și analizat în figurile 6.22...6.25.

Cele două combinații se deosebesc prin relațiile dintre indicii de refracție și de dispersie:

- ◆ FK54-LAK33-TIF6: 438.903-757.522-621.307
- ◆ FK54-KZFS1-TIF6: 438.903-616.483-621.307

care influențează forma curbelor de sferocromatism, datorită distribuției puterii diferite pe lentile. Din punct de vedere al cromatismului și spectrului secundar comportamentul este similar.

Din figura 6.22 rezultă că tripletul este de foarte bună calitate (RMS OPD = 0.059 și raportul Strehl = 0.864) până la deschiderea $f/8$. Această limitare este impusă de aberația sferică reziduală care are valori mai mari decât în cazurile analizate anterior. Alura curbelor de sferocromatism este monoton crescătoare, cu pantă tot mai mare în raport cu înălțimea. În urma optimizării prin defocusare sfericitatea a fost anulată la înălțimea corespunzătoare zonei, astfel încât sistemul este supracorectat cu o valoare reziduală maximă de aproximativ +0.2 sub această înălțime și este supracorectat cam cu aceeași valoare până la margine.

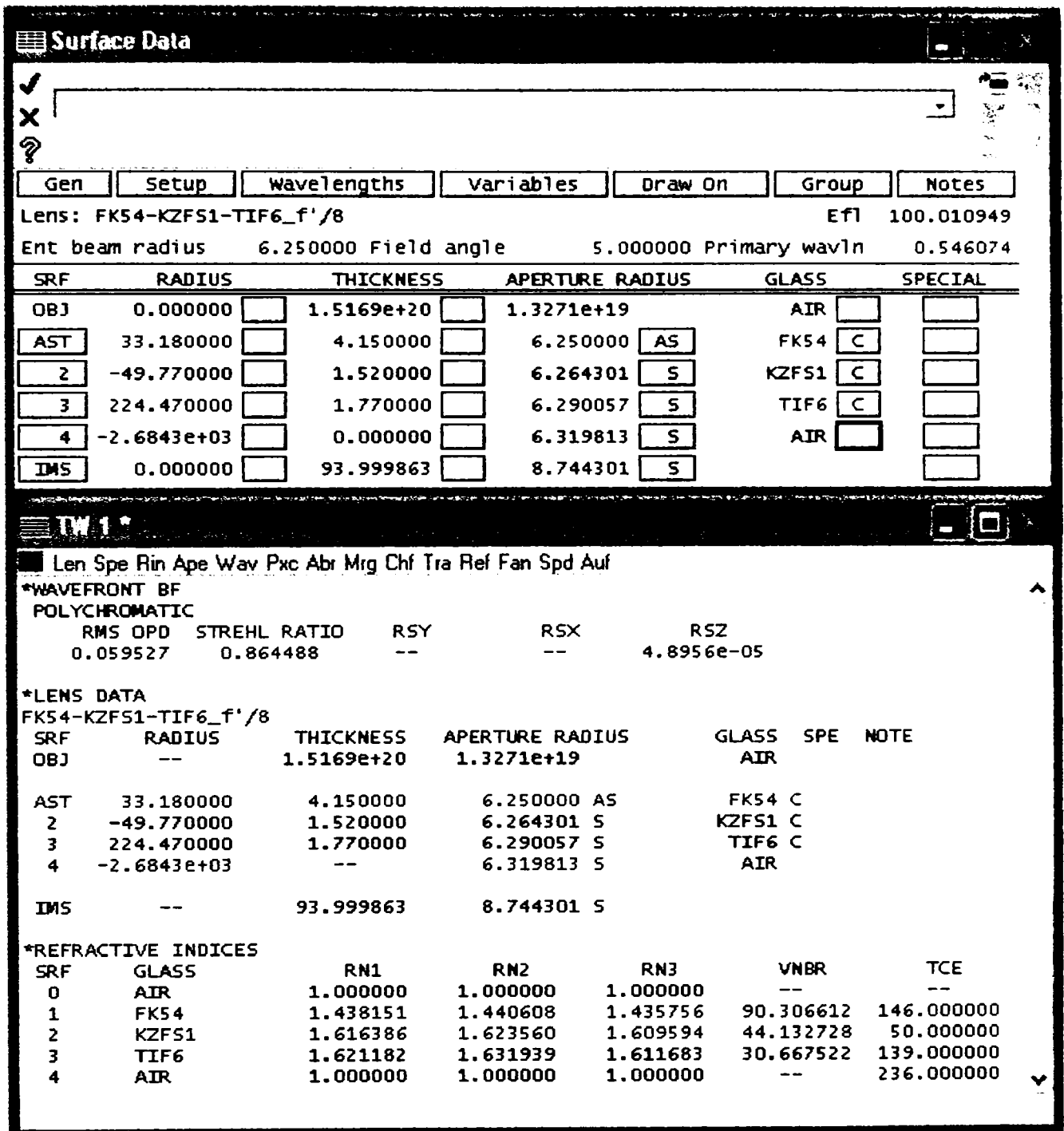


Fig.6.22. Caracteristicile geometrice, de material și analiza frontului de undă pentru tripletul apocromat FK54-KZFS1-TIF6

Curbele corespunzătoare liniilor F' și C' se află în stânga, respectiv dreapta curbei e, echidistante față de aceasta și la distanțe scăzătoare până la anulare în punctul de apocromazie.

Aberația cromatică axială este maximă pe axă și are valoarea de 0.11, spectrele secundare e-F' și e-C' fiind egale, așa cum rezultă și din figurile 6.24 și 6.25.

Alura variației cromatice a focarului este specifică apocromatului, fiind aproximativ liniară și cu înclinare mică în raport cu axa lungimilor de undă.

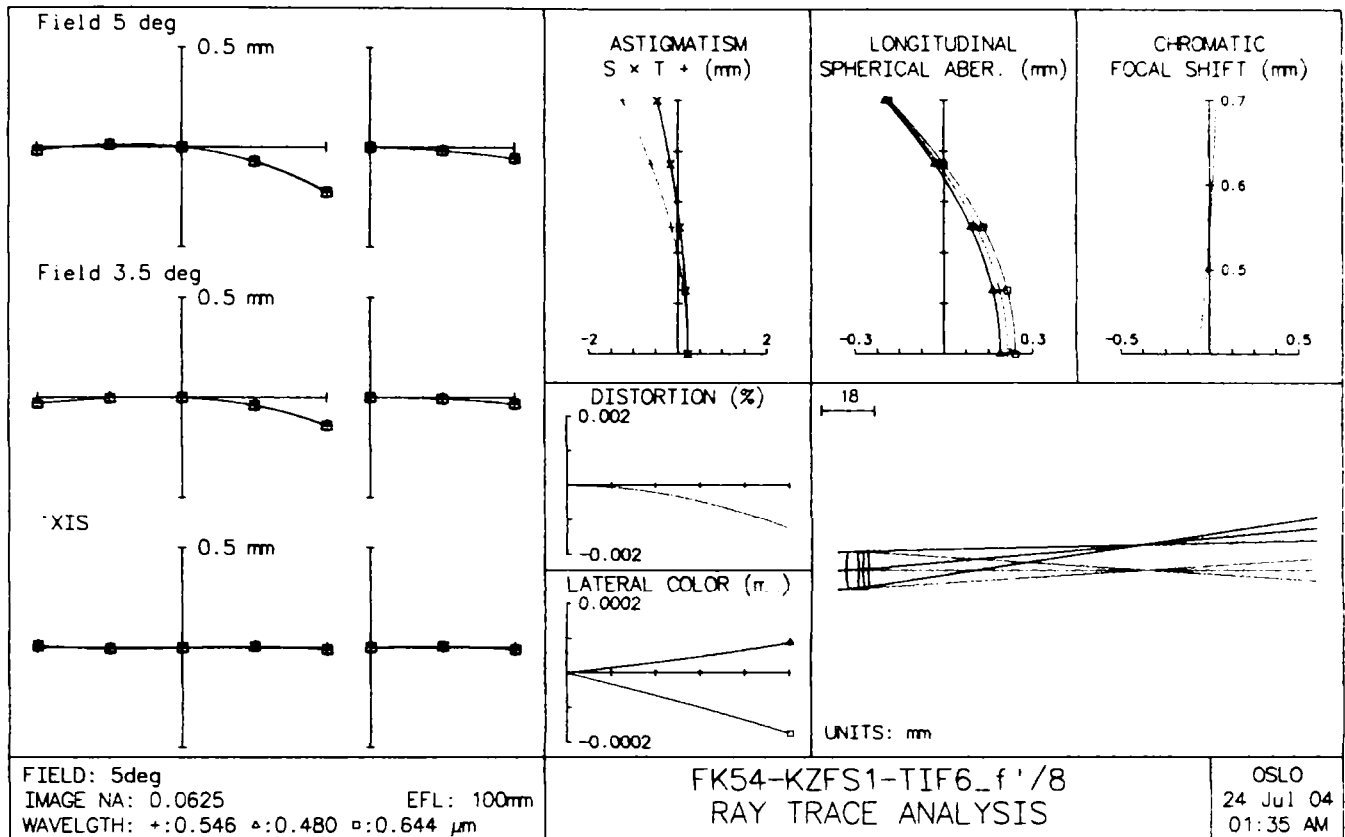


Fig. 6.23. Aberațiile geometrice și cromatice reziduale ale tripletului FK54-KZFS1-TIF6

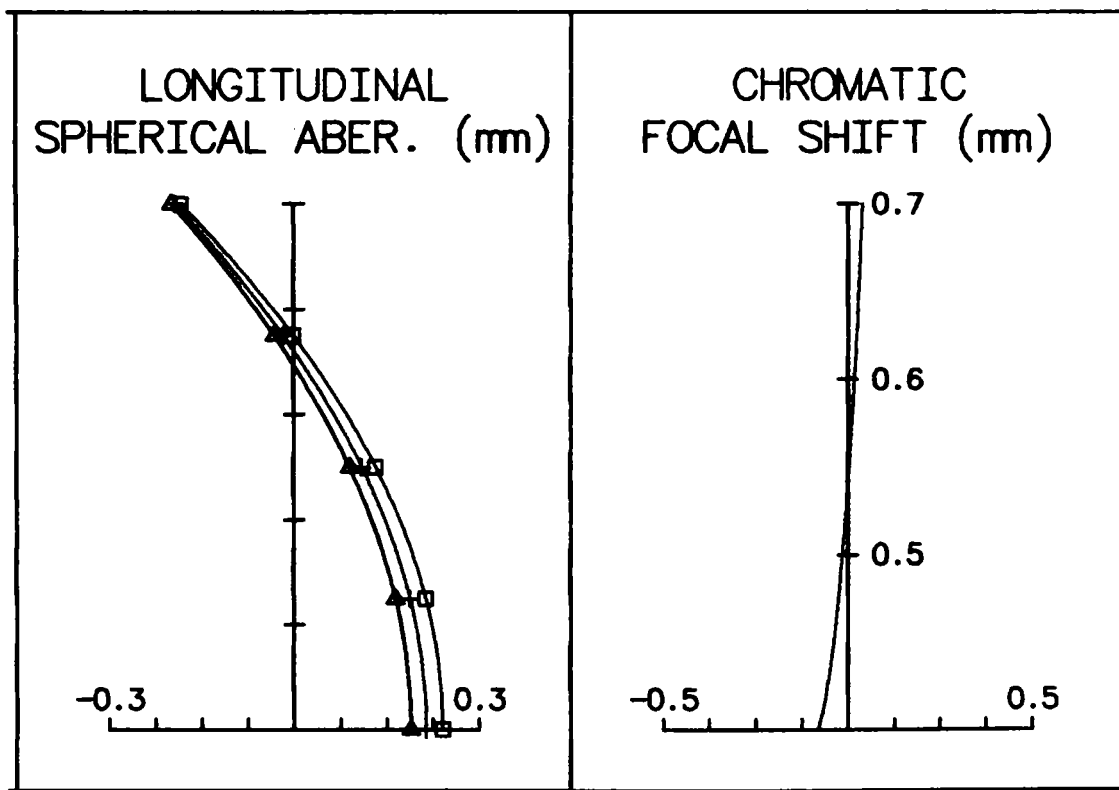


Fig. 6.24. Detaliu reprezentând curbele de sferocromatism și variația cromatică a focarului pentru tripletul FK54-KZFS1-TIF6

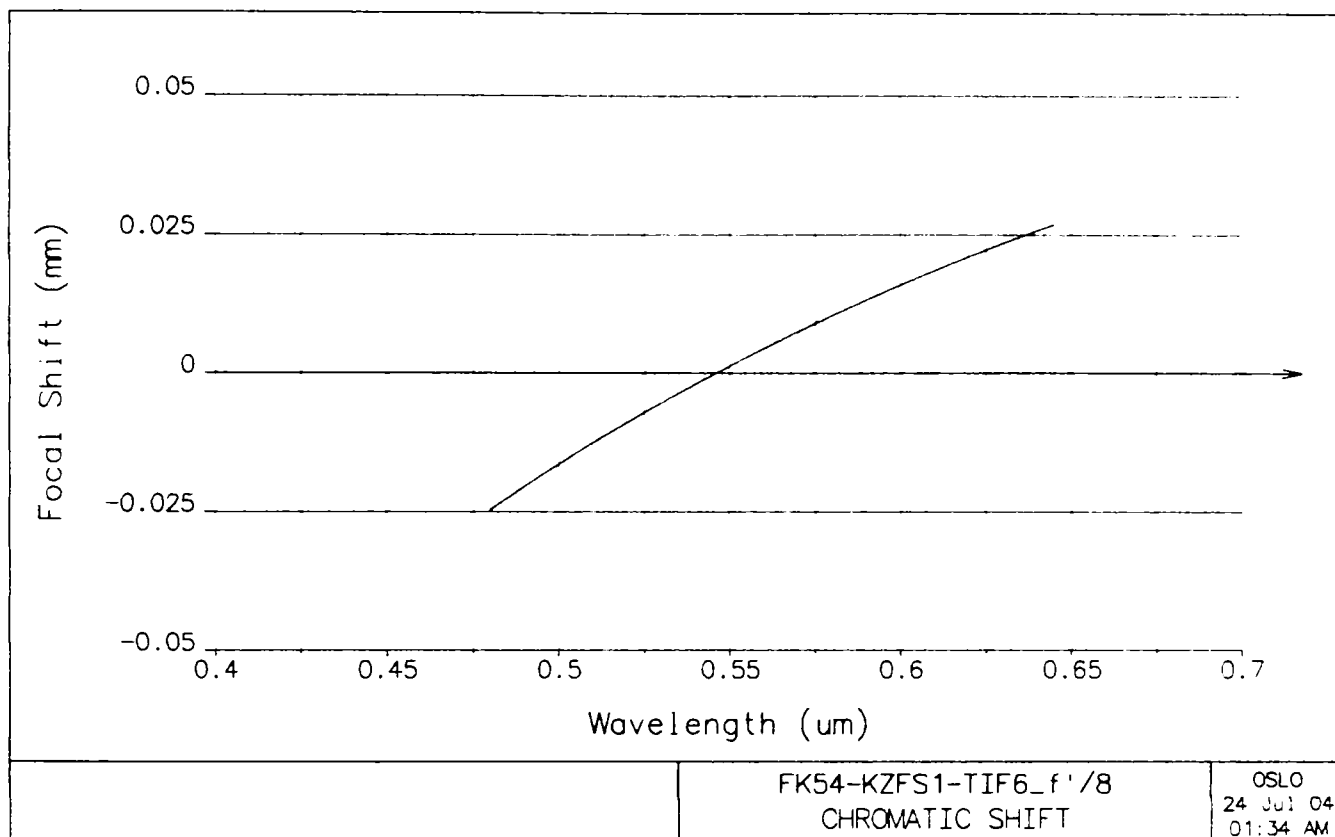


Fig. 6.25. Variația cromatică a focarului în intervalul spectral de calcul (480...643)nm pentru tripletul FK54-KZFS1-TIF6

Toate soluțiile cu sort intermediar din familia KZFS au alură similară a sferocromatismului și, ca urmare, deschiderea limitată la $f'/8$, în timp ce tripletele cu sort LAK pentru lentila din mijloc, prin forma mai favorabilă a sferocromatismului, sunt utile până la $f'/6.25$ sau chiar $f'/5$.

6.2. CONCLUZII

Capitolul 6 prezintă o analiză detaliată a caracteristicilor cromatice ale componentelor de bază ale ansamblurilor optice: lentile singulare, dublete acromate și triplete apocromate.

Lentilele singulare nu includ în algoritmul de sinteză elemente de control al cromatismului. Singurul element care poate influența mărimea aberațiilor cromatice este alegerea unui sort de sticlă optică având dispersie redusă. Criteriul contravine cerinței de indice de refracție de referință ridicat pentru obținerea unor curburi mici și aberație sferică redusă. Există, însă, sorturi de sticlă noi, care satisfac în oarecare măsură ambele cerințe, având indice mediu și dispersie relativ redusă. Totuși lentila singulară nu poate constitui un element limitat la difracție.

Dubletul acromat are caracteristici net superioare componenteii singulare, față de care sfericitatea și cromatismul sunt reduse cu unu până la două ordine de mărime. Dubletul acromat suprapune focarele de la extremitățile spectrului de calcul, liniile F' și C' pentru o

înălțime de incidență din jurul zonei. Deși aberația cromatică se poate considera corectată, rămâne spectrul secundar, variabil pe înălțime și dezechilibrat în raport cu liniile F' și C' . Atât curbele de sferocromatism, cât și variația cromatică a focarului au o alură particulară, care permit imediata identificare a acromatului. Metodele de sinteză permit obținerea, fără dificultăți a unor soluții limitate la difracție.

Tripletul apocromat, față de acromat, îmbunătățește mult calitatea imaginii, prin reducerea și echilibrarea spectrului secundar. S-au analizat soluții care conțin sortul intermediar din familia LAK și, respectiv KZFS și care conduc la forme specifice ale curbelor de sferocromatism. Din punct de vedere al spectrului secundar, comportarea este similară. Totuși alurile diferite ale sferocromatismului permit utilizarea tripletului la aperturi mai mari pentru prima familie de sorturi menționate.

Creșterea deschiderii utile până la dublarea celei indicate în literatură este strict legată de reducerea aberației sferice reziduale, care se poate realiza prin asferizarea unei suprafețe. Această intervenție asupra formei nu influențează caracteristicile cromatice, acestea fiind determinate strict de sorturile combinate de materiale și divizarea puterii pe lentile.

Printre contribuțiile autorului se pot enumera și următoarele:

- ◆ Sinteza unui set de lentile singulare de cea mai bună formă din punct de vedere al aberației sferice și analiza calității imaginii acestora
- ◆ Atribuirea unor sorturi de sticle optice cu caracteristici diferite, pe criterii privind relația dintre parametri de refracție și dispersie, în vederea studiului comportării lentilelor din punct de vedere al aberațiilor cromatice reziduale
- ◆ Sinteza unui set de dublete acromate pe baza unui soft original prezentat în capitolul 1 și cu perechi de materiale a căror compatibilitate a fost fundamentată în capitolul 3
- ◆ Discutarea critică a caracteristicilor dubletului acromat, cu evidențierea limitelor privind performanțele cromatice ale subansamblului
- ◆ Analiza critică a trei dintre soluțiile de triplete sintetizate în capitolul 4, considerate ca performante, cu evidențierea particularităților determinate de familiile de materiale combinate și a posibilităților de extindere a aperturii utile față de recomandările din literatură
- ◆ Comparația critică a calității imaginii din punct de vedere cromatic a celor trei elemente analizate: lentila singulară, dubletul acromat și tripletul apocromat.

Bibliografie: [G3], [G9], [G10], [G11], [H2], [K1], [S4], [S6], [S7], [W14], [W20], [W21]

CAP.7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE

Elaborarea prezentei teze a avut la origine observația că în literatura de specialitate nu există coerență, completudine și certitudine, atât în privința sintezei, cât și a analizei comparate a subansamblurilor optice la care se impune corectarea aberațiilor cromatice totale și a spectrului secundar. Metodele actuale de proiectare, bazate exclusiv pe teoria aberațiilor primare, omit sau nu pot să includă toți parametri de interes într-o aplicație, astfel încât s-a considerat necesară o temeinică analiză critică a soluțiilor rezultate prin diverse metode, perfecționarea sau completarea acestora.

Cromatismul este determinat exclusiv de caracteristicile de refracție și dispersie ale materialelor optice asociate în subansambluri și, în principiu, nu se poate interveni asupra valorilor reziduale prin corectări ale geometriei componentelor. Pomind de la importanța alegerii materialelor și de la slaba reprezentare a subiectului în literatură, teza și-a propus o aprofundare a studiului compatibilității materialelor optice în scopul formării unor combinații care să asigure performanțe cromatice superioare.

Subansamblul specific pentru comportament cromatic superior este tripletul apocromat, a cărei sinteză vizează exclusiv cromatismul axial și spectrul secundar. Ca rezultat, soluțiile suferă calitativ din cauza aberațiilor geometrice, cu precădere cea de apertură, ceea ce conduce la o limitare drastică a deschiderii utile a subansamblului. Teza și-a propus un studiu și în sensul găsirii unor metode sau selectării soluțiilor pe anumite criterii, astfel încât apertura utilă să crească.

Pe parcursul întregii lucrări s-au avut în vedere metodele de evaluare a imaginii cele mai evoluat și de cea mai mare finețe, de la analiza aberațională tradițională la analiza statistică a frontului de undă și parametri derivați din funcția optică de transfer.

Toate sintezele de sisteme prezentate în teză s-au derulat cu ajutorul unor programe automate originale, iar analizele s-au realizat cu un program specializat profesional.

Demersul fundamental și aplicativ din capitolele anterioare poate fi sintetizat prin următoarele realizări:

- ◆ Studiul criteriilor de compatibilitate a materialelor optice pentru formarea

combinațiilor favorabile acromaziei sau apocromaziei subansamblurilor și modelarea matematică a relațiilor dintre caracteristicile de refracție și dispersie ale sorturilor de sticle optice

- ◆ Elaborarea și aplicarea algoritmilor deduși analitic prin programe originale pe baza de date constituită din catalogul Schott, astfel încât s-au făcut 139 de recomandări pentru dublete acromate și 22 pentru triplete apocromate
- ◆ Stabilirea limitelor metodelor actuale de sinteză a tripletului apocromat prin analiza unui număr de 88 de triplete originale, având la bază combinațiile de sorturi deduse ca favorabile. Rezultatele analizei pot fi sintetizate astfel:
 - Cel mai semnificativ factor de influență a calității subansamblului este reprezentat de tripletul de materiale, respectiv de relațiile dintre caracteristicile de refracție și dispersie ale sorturilor de sticlă
 - Forma lentilelor componente și a subansamblului format din acestea depinde de sorturile de sticle și alegerea raportului între prima curbura și curbură totală a primei lentile; funcție de acești parametri rezultă șapte forme constructive
 - Cele mai performante soluții au structura C-D-C și forma globală biconvexă
 - Cele mai bune soluții, din punct de vedere difracțional, rezultă pentru valori ale primei curburii care nu sunt în conformitate cu recomandările generale din literatură, atunci când acestea există; se propune alegerea $c_1 = (0.5 \dots 0.6)c_a$
 - Cele mai favorabile combinații de sticle trebuie să conțină un sort din familia flor crown (FK) pentru prima lentilă, un sort din familia flint special scurt (KZFS) sau crown lanthan (LAK) pentru a doua lentilă și un sort flint titan (TIF) sau flint greu (SF) pentru ultima lentilă
 - Soluțiile brute, rezultate în urma aplicării algoritmului de calcul nu au caracteristici corespunzătoare, dar pot fi substanțial îmbunătățite prin optimizarea bazată pe analiza statistică a parametrilor frontului de undă; defocusarea conduce la cele mai bune rezultate
 - Geometria subansamblului, așa cum rezultă pe baza algoritmului de sinteză este definitivă; intervenția asupra razelor sau grosimilor nu este eficientă în creșterea calității, respectiv micșorarea aberațiilor
- ◆ Recomandarea concretă a sorturilor cu precizarea caracteristicilor aberaționale, difracționale și a limitei de apertură
- ◆ Elaborarea unei metode noi de sinteză a tripletului apocromat prin determinarea primei curburii din condiția de minim al aberației sferice primare
- ◆ Propunerea unei metode de creștere a aperturii utile a tripletului prin asferizarea

ultimului dioptru. Metoda a permis obținerea unor sisteme limitate la difracție cu deschidere de $f'/5$ față de valorile uzuale $f'/10...f'/8$

- ◆ Analiza comparativă și critică a componentelor de bază din construcția unui subansamblu funcțional: lentila singulară, dubletul și tripletul.

Având în vedere enumerarea de mai sus se poate aprecia că teza și-a atins scopul formulat în primul capitol al lucrării.

Printre contribuțiile originale ale autorului se amintesc următoarele:

- ◆ Sinteza bibliografică a unui material foarte bogat privind metodele de proiectare a subansamblurilor acromate și apocromate, metode care nu fac obiectul unui standard nici în România, nici pe plan internațional
- ◆ Selectarea, conform experienței proprii de proiectare, a celor mai eficiente metode, la nivel mondial, pentru sinteza dubletului acromat lipit și nelipit și a tripletului apocromat lipit
- ◆ Elaborarea unor programe automate originale, scrise în limbajul QBasic, pentru sinteza dubletului acromat și a tripletului apocromat
- ◆ Sinteza cu un grad ridicat de compresie a informației dintr-un material extrem de vast, eterogen ca metodă de abordare, de largă acoperire privind școlile europene și americane de inginerie optică, cu privire la metodele moderne de apreciere a calității sistemelor optice
- ◆ Sinteza criteriilor geometrice și ondulatorii de apreciere a calității și echivalarea acestora
- ◆ Stabilirea parametrilor optici necesari în sinteza subansamblurilor de tip dublet și triplet
- ◆ Formularea unor criterii de selecție a perechii de materiale compatibile pentru sinteza dubletului acromat și modelarea matematică în scopul propunerii unui algoritm
- ◆ Formularea unor criterii de selecție a sorturilor compatibile pentru sinteza unui triplet apocromat și modelarea matematică necesară elaborării unui algoritm
- ◆ Aplicarea algoritmilor unei baze de date conținând sorturile cuprinse în catalogul Schott, cu ajutorul unor softuri originale
- ◆ Crearea unor recomandări de perechi, respectiv triplete de materiale compatibile sub formă tabelară.
- ◆ Sinteza și analiza a 88 de triplete apocromate originale
- ◆ Studiul critic al compatibilității sorturilor de sticle optice și recomandarea celor mai favorabile combinații pentru obținerea soluțiilor limitate la difracție

- ◆ Recomandarea de alegere a primei curburi în domeniul $(0.5...0.6)c_a$
- ◆ Analiza și optimizarea soluțiilor pentru evidențierea performanțelor maxime ale fiecărei soluții, cu utilizarea softului specializat OSLO LT
- ◆ Elaborarea unei metode de sinteză a tripletului apocromat, prin care se elimină alegerea arbitrară a primei curburi a subansamblului
- ◆ Deducerea condiției de minim al aberației sferice primare pentru un ansamblu format din tri lentile lipite, în vederea formulării unui algoritm de sinteză
- ◆ Întocmirea unui program automat de sinteză bazată pe metoda nouă propusă, scris în limbajul QBasic
- ◆ Propunerea unei metode de creștere a deschiderii utile a apocromatului prin asferizarea ultimului dioptru
- ◆ Aplicarea metodei cu ajutorul modulului de optimizare interactivă a programului specializat OSLO LT
- ◆ Obținerea unei soluții cu număr de deschidere $f'/5$, ceea ce reprezintă o dublare a aperturii uzuale a apocromatului
- ◆ Sinteza unui set de lentile singulare de cea mai bună formă din punct de vedere al aberației sferice
- ◆ Atribuirea unor sorturi de sticle optice cu caracteristici diferite, pe criterii privind relația dintre parametrii de refracție și dispersie, în vederea studiului comportării lentilelor din punct de vedere al aberațiilor cromatice reziduale
- ◆ Sinteza unui set de dublete acromate pe baza unui soft original prezentat în capitolul 1 și cu perechi de materiale a căror compatibilitate a fost fundamentată în capitolul 3
- ◆ Discutarea critică a caracteristicilor dubletului acromat, cu evidențierea limitelor privind performanțele cromatice ale subansamblului
- ◆ Analiza critică a trei dintre soluțiile de triplete sintetizate în capitolul 4, considerate ca performante, cu evidențierea particularităților determinate de familiile de materiale combinate și a posibilităților de extindere a aperturii utile față de recomandările din literatură
- ◆ Comparația critică a calității imaginii din punct de vedere cromatic a celor trei elemente analizate: lentila singulară, dubletul acromat și tripletul apocromat.

BIBLIOGRAFIE

- 1 [B1] Bodea R., Gruescu, C.,
ș.a. *Resolution, Contrast and Image Quality of Endoscopes Using Optical Fibers, Part I*, Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, CD-ROM Edition, Vol. III (XIII), 2004, ISSN 1583-0691
- 2 [B2] Bodea R., Gruescu, C.,
ș.a. *Resolution, Contrast and Image Quality of Endoscopes Using Optical Fibers, Part II*, Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering, CD-ROM Edition, Vol. III (XIII), 2004, ISSN 1583-0691
- 3 [B3] Boreman, G.D., *Transfer Function Techniques*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 32, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- 4 [B4] Băcescu, D., *Construcția și perfecționarea obiectivelor sistemelor optice de măsurare*, Teza de doctorat, UP București, 1996
- 5 [C1] Calciu, M., ș.a., *Utilajul și tehnologia confecționării lentilelor și prismelor*, E.D.P., București, 1973
- 6 [C2] Crețu, E., Tomiuc, L., *Optică tehnică*, Tipografia Academiei de Înalte Studii Militare, București, 1993
- 7 [C3] Crețu, E., ș.a., *Aplicații în calculul și proiectarea sistemelor optice*, Ed. Academiei Tehnice Militare, București, 1995
- 8 [C4] Crețu, E., Câmpeanu, M., *Tehnici de laborator în optica tehnică și construcția aparatului artileristic*, Tipografia Academiei de Înalte Studii Militare, București, 1994
- 9 [C5] Curatu, E., *Calitatea sistemelor optice. Funcția optică de transfer*, Ed. Academiei Române, București, 1992
- 10 [D1] Davidescu A.
Gruescu C. *Diagrama spot – criteriu de calitate a imaginii*, A XXVIII-a Sesiune de Comunicări Științifice cu participare internațională, Academia Tehnică Militară, Bucuresti, 1999
- 11 [D2] Dodoc, P., *Calculul și construcția aparatelor optice*, E.D.P., București, 1983
- 12 [D3] Duma, V.F., *Contribuții la analiza și sinteza sistemelor de scanare*, Teza de doctorat, UP Yimișoara, 2001
- 13 [D3] Duma, V.F., Nicoară, I., *Some Optical Characteristics of Centered Optical Systems*, Buletinul Științific al UPT, Tom 39(53), 1994
- 14 [G1] Goodman, D.S., *General Principles of Geometric Optics*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 1, McGraw Hill Inc., NY, 1995
- 15 [G2] Gruescu, C., *Elemente de optică tehnică și aparate optice*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000

- 16 [G3] Gruescu, C., Nicoară, I., *The cemented achromat – a critical view*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara, Tom 45(59), seria Mecanică, 1999
- 17 [G4] Gruescu, C., Strauți Negru, G., Nicoara I. *Aspects concerning the influence of execution errors of optical components upon the image quality*, The VIth international Conference on Precision Mechanics and Mechatronics COMEFIM-6, Brasov, 2002, volume 1-20a, p 281-284
- 18 [G5] Gruescu, C., *Analiza aberației sferice și a comei sagitale pentru lentile singulare*, Analele Universității Aurel Vlaicu Arad, 2000, Mecanică, p.252-255
- 19 [G6] Gruescu C., Balaban, G., *Analyse of transverse spherical aberration of a tilted lens*, The 8.th Symposium on Mechanisms and Mechanical Transmissions with international participation, Timișoara, 2000, p.143-148
- 20 [G7] Gruescu, C., Nicoară, I., *Study on image quality in respect with the lens position errors*, Sesiunea de Comunicări cu participare internațională, Agenția de Cercetare pentru Tehnologii Militare, București, 2001
- 21 [G8] Gruescu, C., Nicoară, I., *Considerations on eyeglasses image quality*, Proceedings of the VIIth Symposium. Academia Română Filiala Timișoara Ed. Politehnica 2003, p.209-216, ISBN 973-625-065-2
- 22 [G9] Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I., *Image Quality Optimization of an Achromatic Doublet Using Defocusing and Methods Based on OPD*, Romanian Journal of Opto-electronics, Romanian Society of Optoelectronics, vol. XII, nr.4/2003, ISSN 1453-0600
- 23 [G10] Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I., *Glass Choise for Achromatic Optical Systems*, Romanian Journal of Opto-electronics, Romanian Society of Optoelectronics, vol. XII, nr.4/2003, ISSN 1453-0600
- 24 [G11] Gruescu, C., Bodea, R., Nicoară, I., *Image Quality Optimization of an Apochromatic Triplet Using Defocusing and Methods Based on OPD*, Proceedings of COMEFIM '7, The 7-th International Conference on Mechatronics and Precision Engineering, Bucharest, 2004, p.263
- 25 [G12] Gruescu C., Negru-Străuți-G., Bodea R., *Application of Electra Method on Optical Products Chioce*, Buletinul Științific al Universității "Politehnica" din Timișoara România, Tom 48 (62) 2003, Fascicola 1,2 Management. Economic Engineering. Transportation Engineering
- 26 [G13] Gruescu, C., Pommersheim, A., *Optică tehnică*, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 1999
- 27 [G14] Gruescu, C., Zsivanov, D., *Aparate spectrale și fotometrice*, Lito, UPT, 1997
- 28 [H1] Halvorson, M., Gygymyr, D., *Learn Basic Now*, Microsoft Press, 1989

- 29 [H2] Hecht, E., *Optics* 3rd ed., Eddison Wesley Longman, Inc., NY, 1998
- 30 [H3] Hütte *Manualul inginerului, Fundamente*, E.T., București, 1995
- 31 [H4] Homei, D., *Contribuții la optimizarea unor parametri specifici aparaturii artileristice, opto-mecanice și optoelectronice*, Teza de doctorat, ATM București, 2003
- 32 [H4] Hodam, F., *Technische Optik*, VEB Verlag Technik, Berlin, 1965
- 33 [J1] Johnson, B.R., *Lenses*, in Handbook of Optics, vol.II, ch.1, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 34 [J2] Jones, R.V., *Instruments and Experiences*, John Wiley, New York, 1988
- 35 [K1] Kingslake, R., *Lens design fundamentals*, Academic Press, N.Y.,1978
- 36 [L1] Luca, E., ș.a., *Fizica generală*, E.D.P., București, 1981
- 37 [L2] Lytle, J.D., *Polymeric Optics*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 38 [M1] Malacara, D., Malacara, Z., *Optical Metrology*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 29, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 39 [M2] Mihalca, I., *Optică, partea I*, Lito IPT, 1981
- 40 [M3] Mîrzu, M., Crețu, E., Nicoară, I., *Optica ondulatorie și Fourier*, ED. Academiei Tehnice Militare și ED. Pro Transilvania, București, 1996
- 41 [M4] Moisil, G., Curatu, E., *Optică, Teorie și aplicații*, E.T., București, 1986
- 42 [M5] Marian, A.M., *Contribuții privind parametrizarea fenomenului cromatic*, Teza de doctorat, UP Timișoara, 2002
- 43 [M6] Mazăre, P., *Contribuții la studiul reflectorilor cu diagrama de directivitate $\cos^2(\theta)$* , Teza de doctorat, ATM București, 2004
- 38 [N1] Naumann, A., Schroder, G., *Bauelemente der Optik. Taschenbuch der technischen Optik*, Carl Hanser Verlag München Wien, 1992
- 39 [N2] Nicoară, I., *Calculul și construcția aparatelor optice*, vol.I, II, Lito I.P.T., 1987
- 44 [N3] Nicoară, I., ș.a., *Calculul și construcția aparatelor optice*, Îndrumător de proiectare, Lito IPTVT, 1984
- 45 [N4] Nicoară, I., ș.a., *Aparate optice, Tehnici de laborator*, Ed. Mirton, Timișoara, 1996
- 46 [N5] Nicoară, I., Gruescu, C., ș.a. *Aparate optice*, vol I, Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara, 2000

- 47 [N6] Nicoară, I., ș.a., *Considerations on Eyeglasses Image Quality*, Proceedings of the VIth Symposium. Academia Română Filiala Timișoara Ed. Politehnica 2003, p.209-216, ISBN 973-625-065-2
- 48 [N7] Nossiter, J., *Microsoft Excel 97*, Ed. Teora, București, 1998
- 49 [O1] O'Shea, D.C., *Elements of Modern Optical Design*, John Wiley&Sons, New York, 1985
- 50 [O2] O'Shea, D.C., Harrigan, E., *Aberration Curves in Lens Design*, in Handbook of Optics, vol.I, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 51 [P1] Pommersheim, A., *Optica tehnică, curs pentru subingineri, vol.I, Lito I.P.T.,1989*
- 52 [P2] Pommersheim, A. Ș.a., *Optica tehnică, Lucrări de laborator, Lito UTT, 1995*
- 53 [P3] Pommersheim, A., Gruescu, C., *Metoda pentru calculul unui dublet acromatic corectat la aberația de sfericitate, Analele Universității din Oradea, 1992*
- 54 [P4] Pommersheim, A., Gruescu, C., *Metoda de proiectare a unui triplet apalanat, Analele Universității din Oradea, 1994*
- 55 [P5] Popescu, I.I.,Toader,I., *Optica, E.S.T., București, 1989*
- 56 [P6] Popescu, I.M., *Teoria electromagnetică macroscopică a luminii, Ed. Științifică și Enciclopedică, București, 1986*
- 57 [P7] Popovici, V., Nicoară, I., *Sisteme optice laser, Ed. Mirton, Timișoara, 1998*
- 58 [P8] Plummer, W.T., *Precision: How To Achieve A Little More Of It, Even After Assembly, Polaroid Corporation, 38 Henry Street, Cambridge, MA 02139 USA*
- 59 [P9] Plummer, W.T., *Fast Automatic Lens Testing of Extended-Field Image Quality, Appl. Optics 15(3),805-810(1976)*
- 60 [R1] Reimelt, C., ș.a., *Program for the Automated Design of Aphocal Optical Systems, The VIth international Conference on Precision Mechanics and Mechatronics COMEFIM-6, Brasov 2002, vol. 3-21a, p 195-202*
- 61 [R2] Reimelt, C., *Aplicarea tehnicilor de proiectare orientate pe obiecte în construcția aparatelor și echipamentelor, Teza de doctorat, UP Timișoara, 2003*
- 62 [R3] Rojișteanu, C., *Contribuții la studiul parametrilor de sistem optimi ai telemetrelor laser, Teza de doctorat, ATM București, 2003*
- 63 [S1] Schröder, G., *Technische Optik. Grundlagen und Anwendungen. Vogel Buchverlag Würzburg. 1990*
- 64 [S2] Shannon, R.R., *Optical Specification, in Handbook of Optics, vol.I, ch.34, McGraw Hill Inc., NY,1995*

- 65 [S3] Shannon, R.R., *Tolerancing Techniques*, in Handbook of Optics, vol.I, ch.36, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 66 [S4] Sinclair, D.C., *Optical Design Software*, in Handbook of Optics, vol.I. ch. 34, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 67 [S5] Străuți-Negru, G., Gruescu, C., *Application of Multi-Attribute Utility Theory (MAUT) on Optical Products Domain*, Al VII-lea Simpozion International de Management SIM 2003 "Managementul Organizatiilor Performante la începutul Mileniului 3", Timisoara – Romania 12-13 decembrie, 2003, suport CD-ROM
- 68 [S6] Smith, W.J., *Modern Optical Engineering*, 3rd ed., McGraw Hill, NY, 2000
- 69 [S7] Smith, W.J., *Techniques of First-Order Layout*, in Handbook of Optics, vol.I, ch. 32, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 70 [S8] Sterian, P., Stan., M., *Fizica*, E.D.P., București, 1985
- 71 [S9] Subbarao, M.M *The Optical Transfer Function of Diffraction-limited System for Polychromatic Illumination*, State University. NY
- 72 [S10] STAS 3003-79 *Optica geometrică. Terminologie și simboluri*
- 73 [S11] STAS 4702-88 *Desene tehnice. Desene de execuție pentru piese optice*
- 74 [S12] SR ISO 9334 - 95 *Optică și instrumente optice. Funcția de transfer optic. Definiții și relații matematice*
- 75 [S13] SR ISO 9335 - 95 *Optică și instrumente optice. Funcția de transfer optic. Principii și proceduri de măsurare*
- 76 [S14] Strong, J., *Procedures in Applied Optics* pp. 63-69, Marcel Dekker, New York, 1989
- 77 [S15] Sinclair, D.C., *Whither Optical Design?*, Optics and Photonics News, June 2000
- 78 [T1] Toader,E., Spulber,V., *Optică pentru tehnicieni*, E.T., București, 1985
- 79 [T2] Tropf, W.J., ș.a., *Properties of Crystals and Glasses*, in Handbook of Optics, vol.II, ch. 33, McGraw Hill Inc., NY,1995
- 80 [T3] Trufașu, A.O., *Cercetarea și realizarea unor noi utilaje optice pentru mașini-unelte de înaltă precizie*, Teza de doctorat UP București, 1997
- 81 [T4] Tufiș, M., *Contribuții la studiul transmisiei imaginilor prin fibre optice*, Teza de doctorat, ATM București, 2004-08-02
- 82 [Z1] Zsivanov, D., ș.a., *Analiza asistată de calculator a sferocromatismului sistemelor optice*, Analele Universității Oradea, 1995, Fascicola Mecanică, p.7-14
- 83 [V1] Vedinș, I., *Contribuții la studiul stabilității imaginii prin sisteme optice*, Teza de doctorat, ATM București, 2002

- 84 [W1] www.optikos.com *How to Measure MTF and other Properties of Lenses*
- 85 [W2] www.alma.com *Alignment Tolerances for ALMA Optics, ALMA Memo 395 by B. Lazareff*
- 86 [W3] www.edmundoptics.com *Lenses, prisms*
- 87 [W4] www.homeschooloffish.com *Lenses*
- 88 [W5] www.OptiCentric.com *Tools for Production and Lab*
- 89 [W6] www.osscc.org/bios/fellows-wjsmith.htm
- 90 [W7] www.micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/index.html
- 91 [W8] www.microscopyu.com/articles/formulas/formulasindex.html
- 92 [W9] www.micro.magnet.fsu.edu/optics/timeline/people/index.html
- 93 [W10] www.sff.net/people/Jeff.Hecht/history.html
- 94 [W11] www.ee.umd.edu/~taylor/optics.htm
- 95 [W12] www.occfiber.com/
- 96 [W13] www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Abbe.html
- 97 [W14] www.OSLO.com
- 98 [W15] www.Interoptik.ro
- 99 [W16] www.sinopt.com
- 100 [W18] jsfejes@swva.net
- 101 [W19] www.atmsite.org/keyword.html
- 102 [W20] www.wtptoptics.com/Assembly.html
- 103 [W21] www.astrosurf.com/buil/us/stage/calcul/design_us.htm
- 104 [W22] www.sinopt.com/learning1/optsoft/whither/whither.htm

ANEXE

ANEXA 1.1 Recomandări pentru alegerea adaosului de montaj

D [mm]	Modul de fixare			
	Sertizare		Cu inel filetat	
	ΔD [mm]	$f^{\Delta f}$ [mm]	ΔD [mm]	$f^{\Delta f}$ [mm]
≤ 6	0.6	$0.1^{+0.1}$	-	-
6...10	0.8	$0.3^{+0.2}$	1.0	$0.1^{+0.1}$
10...18	1.0	$1.4^{+0.2}$	1.5	$0.2^{+0.2}$
18...30	1.5	0.5^{+2}	2.0	$0.3^{+0.2}$
30...50	2.0	$0.7^{+0.3}$	2.5	$0.4^{+0.2}$
50...80	2.5	$1^{+0.5}$	3.0	$0.5^{+0.2}$
80...100	-	-	3.5	$0.6^{+0.4}$
>100	-	-	4.0	$0.7^{+0.5}$

ANEXA 1.2 Recomandări pentru alegerea grosimii la margine (centru) pentru lentila convergentă (divergentă)

D_t [mm]	d_{\min} [mm]	
	Lentila convergentă	Lentila divergentă
6...10	0.6	-
10...18	1.0	1.0
18...30	1.5	1.5
30...50	2.0	2.2
50...80	3.0	3.8
80...120	4.0	5.8
120...150	5.0	7.5

ANEXA 3.1 Familiile de sorturi de sticle minerale

Sort	Cod	Densitate [g/cm ³]	Compoziție chimică
Crown ușor	479587 TiK1	2.39	sticlă alumino-borosilicată alcalină
Flor crown	487704 FK5	2.45	sticlă (boro)fosfidă cu conținut mare de flor
Flint titan	511510TiF1	2.47	sticla aluminoborosilicată alcalină cu titan
Borosilicat	517642 BK7	2.51	70%SiO ₂ , 10%B ₂ O ₃ , 8%Na ₂ O, 8%K ₂ O, 3%BaO, 1%CaO
Crown fosfat	518651PK2	2.51	70%P ₂ O ₅ , 12%K ₂ O, 10%Al ₂ O ₃ , 5%CaO, 3%B ₂ O ₃
Crown	522595K5	2.59	74%SiO ₂ , 11%K ₂ O, 9%Na ₂ O, 6%CaO
Crown flint	523515KF9	2.71	67%SiO ₂ , 16%Na ₂ O, 12%PbO, 3%ZnO, 2%Al ₂ O ₃
Crown bariu ușor	526600LK1	2.70	sticla borosilicat
Flint antimoniu	527511KzF6	2.54	sticlă borosilicat cu antimoniu
Crown zinc	533580ZK1	2.71	71%SiO ₂ , 17%Na ₂ O, 12%ZnO
Flint extra ușor	548458LLF1	2.94	63%SiO ₂ , 24%PbO, 8%K ₂ O, 5%Na ₂ O
ULTRAN 30*	548743	4.02	
Crown fosfat greu	552635PSK3	2.91	60%P ₂ O ₅ , 28%BaO, 5%Al ₂ O ₃ , 3%B ₂ O ₃
Crown bariu	573575BaK1	3.19	60%SiO ₂ , 19%BaO, 10%K ₂ O, 5%ZnO, 3%Na ₂ O, 3%B ₂ O ₃
Flint bariu ușor	580537BaLF4	3.17	51%SiO ₂ , 20%BaO, 14%ZnO, 6%Na ₂ O, 5%K ₂ O, 4%PbO
Flint ușor	581409LF5	3.22	53%SiO ₂ , 34%PbO, 8%K ₂ O, 5%Na ₂ O
Crown special lung	586610LgSk2	4.15	sticla floroborată cu aluminiu și pământuri alcaline
Flint flor*	593355FF5	2.64	
Crown bariu greu	613586SK4	3.57	39%SiO ₂ , 41%BaO, 15%B ₂ O ₃ , 5%Al ₂ O ₃
Flint special scurt	613443KzFSN4	3.20	sticla cu borat de plumb și aluminiu
Crown bariu extra greu	618551SSK4	3.63	35%SiO ₂ , 42%BaO, 10%B ₂ O ₃ , 8%ZnO, 5%Al ₂ O ₃
Flint	620364F2	3.61	47%SiO ₂ , 44%PbO, 7%K ₂ O, 2%Na ₂ O
Flint bariu greu	650392BaSF10	3.91	43%SiO ₂ , 33%PbO, 11%BaO, 7%K ₂ O, 5%ZnO, 1%Na ₂ O
Flint bariu*	670472BaF10	3.61	46%SiO ₂ , 22%PbO, 16%BaO, 8%ZnO, 8%K ₂ O
Crown lanthan	720504LaK10	3.81	sticla borosilicată cu oxizi ai pământurilor rare
Crown tantal*	741526TaC2	4.19	B ₂ O ₃ /La ₂ O ₃ /ThO ₂ /RO
Flint niobiu*	743492NbF1	4.17	
Flint lanthan	744447LaF2	4.34	sticla borosilicată cu oxizi ai pământurilor rare
Flint greu	805254SF6	5.18	33%SiO ₂ , 62%PbO, 5%K ₂ O
Flint tantal greu*	835430TaFD5	4.92	B ₂ O ₃ /La ₂ O ₃ /ThO ₂ /Ta ₂ O ₃

* sorturi din producția altor firme decât Schott

Anexa 3.2 Cristale optice și proprietățile lor

Cristal	Domeniu util λ[mm]	n_d	v_d	Valori ale indicelui de refracție la diverse lungimi de undă (în paranteze)
NaF	0.15...14	1.326		(0.2)=1.38; (3)=1.31; (10.6)=1.23; (15)=1.09
MgF ₂	0.12...8	1.389		(3)=1.36; (5)=1.34
LiF	0.11...8	1.392	99.0	(0.2)=1.45; (1)=1.39; (5)=1.33; (8)=1.21
CaF ₂	0.12...12	1.434	95.2	(0.2)=1.47; (2)=1.42; (5)=1.40; (10.6)=1.28
BaF ₂	0.18...12	1.474	81.7	(0.2)=1.53; (3)=1.46; (10.6)=1.39
KCl	0.21...27	1.490	44.0	(0.2)=1.78; (5)=1.47; (10.6)=1.45; (20)=1.40
NaCl	0.21...20	1.544	42.8	(0.2)=1.82; (3)=1.52; (10.6)=1.49; (20)=1.37
SiO ₂ (cuarț)	0.15...4	1.553	68.7	(0.19)=1.69; (0.26)=1.61; (1)=1.53; (2)=1.52
KBr	0.28...37	1.560	33.4	(10.6)=1.53; (30)=1.44
KI	0.3...30	1.667	23.3	(10.6)=1.62; (30)=1.56
CsBr	0.22...40	1.698		(3)=1.67; (10.6)=1.66; (200)=1.64; (930)=1.61
MgO	0.28...6.5	1.737	53.4	(1)=1.72; (30)=1.68; (50)=1.63
Al ₂ O ₃ (safir)	0.17...5.5	1.769		(1)=1.76; (30)=1.71; (5)=1.63
CsI	0.26...60	1.788		(5)=1.74; (10.6)=1.74; (300)=1.71; (50)=1.64
ZnS	0.4...14	2.37		(10)=2.29; (50)=2.25; (10.60)=2.19
KRS5	0.45...45	2.629		(1)=2.45; (10.6)=3.28; (15)=2.7
GaAs	1.5...15			(3)=3.32; (10.6)=3.28; (15)=2.7
ZnSe	0.5...20	2.626		(1)=2.48; (3)=2.43; (10.6)=2.40; (20)=2.63
CdTe	1.0...24			(1)=2.83; (5)=2.69; (10.6)=2.67; (20)=2.63
Si	1.2...15			(3)=3.43; (10.6)=3.95
Ge	1.8...23			(3)=4.05; (10.6)=4.00; (15)=4.00

Anexa 3.3. Sticle organice și proprietățile lor

Denumire	n_d	v_d	Temp. max. [°C]	Densitate [g/cm³]
Polimetilpentan (TPX)	1.466	56.4	180	
Polimetacrilat (PMMA)	1.491	57.2	90	1.19
Aliilglicolcarbonat CR39	1.499	57.8	100	1.32
Metilmetacrilatstirol (NAS)	1.562	34.7	95	1.10
Stirocrlnitril (SAN)	1.571	35.3	95	
Policarbonat	1.585	30.0	120	1.20
Polistirol (PS)	1.590	30.8	80	1.06
Perfalit 1.5 –	1.502	58.2	-	~1.3
Perfalit 1.6	1.597	40.5	-	~1.3
Polieteremidă	1.660	18.3	-	-
Policiclohehilmacrilat (PCHMA)	1.505	56.1	-	-

ANEXA 3.4 Sorturile de sticle optice din catalogul Schott și caracteristicile de refracție și dispersie principale

nr.crt	sort	n_e	n_F	n_C	v_e	n_g	n_s	P_{ge}
1	BAF3	1.585650	1.592210	1.579525	45.073884	1.59857	1.57257	0.678393
2	BAF4	1.608890	1.616130	1.602176	42.577737	1.62318	1.59463	0.680347
3	BAF50	1.686370	1.694400	1.678883	43.156201	1.7022	1.67043	0.678904
4	BAF51	1.655690	1.663290	1.648606	43.569347	1.67068	1.64059	0.679079
5	BAF13	1.672450	1.680250	1.665196	43.590632	1.68784	1.65700	0.67965
6	BAF52	1.611700	1.618560	1.605304	45.041294	1.62522	1.59805	0.678851
7	BAF8	1.626890	1.633830	1.620409	45.593325	1.64055	1.61305	0.678219
8	BAF9	1.646466	1.653466	1.639902	47.662105	1.66023	1.63243	0.677096
9	BAFN10	1.673412	1.680840	1.666455	46.816211	1.68804	1.65853	0.677693
10	BAFN11	1.669996	1.677174	1.663253	48.129601	1.68411	1.65554	0.676703
11	BAFN6	1.591890	1.598227	1.585936	48.155280	1.60436	1.57910	0.676835
12	BAK1	1.574870	1.580000	1.569970	57.265471	1.58488	1.56421	0.671362
13	BAK2	1.542120	1.546770	1.537650	59.440103	1.55117	1.53234	0.669379
14	BAK4	1.571240	1.576480	1.566250	55.853852	1.58146	1.56038	0.671926
15	BAK5	1.558972	1.563862	1.554286	58.372668	1.56850	1.54876	0.670306
16	BAK50	1.570070	1.575104	1.565231	57.739088	1.57987	1.55947	0.669429
17	BALF4	1.582139	1.587727	1.576830	53.424652	1.59307	1.57065	0.673102
18	BALF5	1.549821	1.555111	1.544803	53.337315	1.56017	1.53898	0.673441
19	BALF50	1.591660	1.597611	1.586030	51.086542	1.60333	1.57951	0.674571
20	BALKN3	1.520540	1.524957	1.516283	60.007506	1.52914	1.51118	0.668862
21	BASF1	1.629871	1.638355	1.622072	38.683580	1.64671	1.61345	0.683466
22	BASF10	1.654098	1.662867	1.646038	38.866652	1.6715	1.63714	0.68345
23	BASF12	1.674031	1.683056	1.665737	38.917660	1.69195	1.65656	0.683592
24	BASF13	1.701896	1.711457	1.693125	38.288054	1.72091	1.68342	0.684326
25	BASF2	1.668853	1.678688	1.659880	35.562543	1.68845	1.65007	0.685929
26	BASF51	1.728232	1.738248	1.719009	37.850104	1.74810	1.70877	0.68296
27	BASF52	1.705872	1.714847	1.697528	40.755420	1.72362	1.68807	0.680208
28	BASF54	1.741685	1.753902	1.730651	31.899356	1.76616	1.68807	0.689262
29	BASF56	1.661388	1.670862	1.652724	36.464792	1.68024	1.64322	0.685129
30	BASF57	1.655164	1.663338	1.647595	41.617218	1.67134	1.63911	0.681238
31	BASF6	1.671329	1.679704	1.663582	41.640538	1.68791	1.65493	0.68156
32	BASF64A	1.708239	1.717652	1.699547	39.119520	1.72691	1.68982	0.682345
33	BK1	1.512009	1.516117	1.508020	63.235502	1.51998	1.50317	0.666472
34	BK10	1.499596	1.503372	1.495891	66.780805	1.50690	1.49127	0.663457
35	BK3	1.500140	1.504030	1.496324	64.898227	1.50767	1.49157	0.66367
36	BK6	1.533168	1.537541	1.528930	61.920033	1.54166	1.52380	0.667086
37	BK7	1.518722	1.522829	1.514719	63.961687	1.52669	1.50980	0.665609
38	BK8	1.522101	1.526271	1.518045	63.469663	1.53019	1.51309	0.666035
39	F1	1.630036	1.639321	1.621546	35.444045	1.64852	1.61222	0.685252
40	F13	1.626463	1.635606	1.618099	35.784406	1.64466	1.60890	0.685102
41	F14	1.605130	1.613429	1.597492	37.968261	1.62160	1.58900	0.683176
42	F15	1.609446	1.617899	1.601676	37.566838	1.62623	1.59306	0.683555
43	F2	1.624080	1.633101	1.615817	36.108438	1.64202	1.60671	0.684654
44	F3	1.616853	1.625600	1.608828	36.778255	1.63424	1.59996	0.684204
45	F4	1.620581	1.629485	1.612421	36.368063	1.63829	1.60342	0.684565
46	F5	1.607182	1.615557	1.599479	37.765782	1.62381	1.59093	0.683408
47	F6	1.640624	1.650167	1.631908	35.085380	1.65963	1.62235	0.685593
48	F7	1.629526	1.638849	1.621016	35.300879	1.64809	1.61169	0.685676

49	F8	1.599115	1.607124	1.591728	38.911903	1.61500	1.58349	0.68258
50	F9	1.624313	1.632916	1.616406	37.813100	1.64141	1.60762	0.683771
51	FK3	1.466186	1.469782	1.462672	65.571488	1.47315	1.45834	0.664631
52	FK5	1.489143	1.492656	1.485690	70.225612	1.49593	1.48137	0.662793
53	FK51	1.487937	1.490882	1.485079	84.074727	1.49364	1.48165	0.66616
54	FK52	1.487471	1.490516	1.484527	81.396439	1.49338	1.48102	0.667457
55	FK54	1.438151	1.440608	1.435756	90.307703	1.44291	1.43285	0.665222
56	FN11	1.625023	1.634122	1.616718	35.911798	1.64320	1.60748	0.686391
57	K10	1.503489	1.508068	1.499101	56.151260	1.51243	1.49389	0.670793
58	K11	1.502071	1.506242	1.498038	61.197685	1.51019	1.49315	0.66812
59	K3	1.520325	1.524845	1.515983	58.711988	1.52913	1.51082	0.669735
60	K4	1.521107	1.525758	1.516640	57.147742	1.53017	1.51131	0.669845
61	K5	1.524583	1.529099	1.520241	59.220193	1.53338	1.51507	0.669533
62	K50	1.524643	1.529098	1.520345	59.933880	1.53331	1.51518	0.668492
63	K7	1.513139	1.517483	1.508952	60.151251	1.52159	1.50394	0.668698
64	KF3	1.516781	1.521639	1.512145	54.435492	1.52627	1.50669	0.671788
65	KF6	1.519780	1.524915	1.514905	51.928249	1.52984	1.50920	0.673586
66	KF9	1.525831	1.531103	1.520836	51.217369	1.53616	1.51501	0.674041
67	KZFN1	1.553790	1.559552	1.548336	49.375356	1.56509	1.54197	0.674466
68	KZFN2	1.531882	1.537178	1.526828	51.389484	1.54224	1.52083	0.672074
69	KZFS1	1.616386	1.623560	1.609594	44.133246	1.63048	1.60159	0.674806
70	KZFS6	1.594869	1.601178	1.588860	48.291397	1.60723	1.58173	0.672891
71	KZFS7A	1.684957	1.694529	1.676097	37.161449	1.70393	1.66608	0.681673
72	KZFS8	1.725402	1.736399	1.715305	34.388436	1.74727	1.70407	0.684123
73	KZFSN2	1.560818	1.566102	1.555711	53.972355	1.57111	1.54948	0.668355
74	KZFSN4	1.616692	1.623894	1.609901	44.069378	1.63085	1.60198	0.675832
75	KZFSN5	1.658035	1.666678	1.649977	39.401255	1.67512	1.64075	0.679513
76	KZFSN9	1.601592	1.608204	1.595317	46.683939	1.61456	1.58791	0.673907
77	LAF11A	1.762577	1.775274	1.751048	31.477793	1.78794	1.73849	0.687493
78	LAF13	1.780368	1.791173	1.770409	37.583156	1.80179	1.75933	0.682642
79	LAF2	1.747957	1.756660	1.739829	44.439892	1.76510	1.73065	0.678367
80	LAF20	1.685844	1.693222	1.678908	47.915441	1.70034	1.67099	0.676372
81	LAF22A	1.786772	1.797882	1.776579	36.932606	1.80886	1.76531	0.684242
82	LAF3	1.720554	1.728341	1.713229	47.681194	1.73585	1.70485	0.676186
83	LAF9	1.801654	1.816656	1.788206	28.176823	1.83180	1.77385	0.691517
84	LAFN10	1.788674	1.797983	1.779937	43.704755	1.80699	1.76991	0.677041
85	LAFN21	1.792261	1.800881	1.784105	47.226891	1.80915	1.77465	0.674346
86	LAFN23	1.692302	1.699516	1.685507	49.419473	1.70646	1.67774	0.675703
87	LAFN24	1.760960	1.769174	1.753178	47.571745	1.77706	1.74411	0.674148
88	LAFN28	1.776857	1.784931	1.769182	49.327689	1.79264	1.76024	0.67282
89	LAFN7	1.754583	1.765920	1.744184	34.716983	1.77713	1.73264	0.684362
90	LAFN8	1.739394	1.748666	1.730775	41.327152	1.75772	1.72105	0.680126
91	LAK10	1.723401	1.730785	1.716367	50.174125	1.73784	1.70809	0.672426
92	LAK11	1.661043	1.666957	1.655362	57.011251	1.67256	1.64861	0.669671
93	LAK16A	1.736876	1.744184	1.729890	51.550294	1.75114	1.72164	0.671247
94	LAK21	1.643037	1.648503	1.637761	59.858656	1.65367	1.63143	0.668364
95	LAK23	1.671594	1.677593	1.665837	57.127841	1.68328	1.65902	0.669954
96	LAK28	1.747779	1.755353	1.740556	50.536753	1.76257	1.73207	0.671891
97	LAK31	1.699677	1.706011	1.693563	56.208322	1.71200	1.68620	0.668384
98	LAK33	1.757404	1.764819	1.750309	52.199167	1.77187	1.74193	0.670934
99	LAK8	1.716160	1.722974	1.709616	53.611024	1.72944	1.70181	0.669895
100	LAK9	1.694013	1.700509	1.687771	54.482345	1.70667	1.68033	0.669718

101	LAKL12	1.680842	1.687196	1.674746	54.688231	1.69322	1.66751	0.670023
102	LAKL21	1.643037	1.648514	1.637717	59.554766	1.65367	1.63121	0.66652
103	LAKN12	1.680827	1.687171	1.674776	54.923954	1.69320	1.66772	0.67157
104	LAKN13	1.696599	1.703332	1.690201	53.051124	1.70975	1.68279	0.67272
105	LAKN14	1.699798	1.706256	1.693577	55.194912	1.71237	1.68612	0.668972
106	LAKN22	1.653908	1.659915	1.648160	55.627591	1.66562	1.64141	0.67079
107	LAKN6	1.645142	1.650849	1.639667	57.695877	1.65626	1.63320	0.670042
108	LAKN7	1.654255	1.659979	1.648750	58.265200	1.66539	1.64220	0.669171
109	LASF18A	1.920161	1.935158	1.906524	32.135297	1.95012	1.89159	0.687196
110	LASF3	1.812732	1.823164	1.803028	40.361990	1.83335	1.79202	0.679968
111	LASF32	1.809739	1.823853	1.797013	30.168833	1.83806	1.78321	0.689965
112	LASF33	1.811531	1.824029	1.800153	33.989057	1.83646	1.78775	0.686617
113	LASF35	2.030353	2.049155	2.013434	28.844507	2.06806	1.99531	0.690276
114	LASF36A	1.802499	1.814543	1.791501	34.827068	1.82649	1.77943	0.685673
115	LASFN15	1.883474	1.895599	1.872248	37.834406	1.90746	1.85969	0.681188
116	LASFN30	1.807302	1.816305	1.798806	46.133931	1.82495	1.78903	0.675031
117	LASFN31	1.885774	1.897025	1.875294	40.760463	1.90793	1.86358	0.678882
118	LASFN9	1.856507	1.870588	1.843761	31.927026	1.88467	1.82997	0.68843
119	LF5	1.584818	1.592305	1.577892	40.574972	1.59964	1.57014	0.681534
120	LF7	1.578300	1.585582	1.571550	41.215616	1.59271	1.56396	0.681002
121	LF8	1.567499	1.574260	1.561204	43.467969	1.58085	1.55408	0.679579
122	LLF1	1.550987	1.557248	1.545130	45.467250	1.56333	1.53845	0.678187
123	LLF2	1.543444	1.549423	1.537833	46.888898	1.55521	1.53139	0.677102
124	LLF6	1.534312	1.539987	1.528966	48.483208	1.54546	1.52279	0.675882
125	LLF7	1.551702	1.558018	1.545794	45.130898	1.56415	1.53904	0.678143
126	PK1	1.505578	1.509404	1.501828	66.738260	1.51298	1.49717	0.663737
127	PK2	1.520112	1.524168	1.516149	64.861624	1.52797	1.51126	0.664749
128	PK3	1.527358	1.531499	1.523318	64.460757	1.53538	1.51835	0.665064
129	PK50	1.522322	1.526123	1.518607	69.492494	1.52968	1.51403	0.664499
130	PK51A	1.530193	1.533719	1.526796	76.581668	1.53704	1.52278	0.668391
131	PSK2	1.570881	1.575488	1.566407	62.860751	1.57982	1.56096	0.666443
132	PSK3	1.554399	1.558846	1.550078	63.233966	1.56303	1.54482	0.666384
133	PSK50	1.559507	1.563737	1.555391	67.042607	1.56771	1.55037	0.665882
134	PSK52	1.605301	1.610024	1.600732	65.141817	1.61447	1.59524	0.667419
135	PSK53A	1.622471	1.627491	1.617640	63.188870	1.63223	1.61191	0.668883
136	PSK54	1.588154	1.592820	1.583671	64.285961	1.59723	1.57839	0.669371
137	SF1	1.723105	1.736099	1.711412	29.290543	1.74917	1.69888	0.690317
138	SF10	1.734301	1.748051	1.722000	28.187707	1.76198	1.70887	0.692321
139	SF11	1.791899	1.808341	1.777344	25.547512	1.82518	1.76200	0.695731
140	SF12	1.652845	1.663021	1.643587	33.592120	1.67315	1.63348	0.686838
141	SF13	1.747102	1.761529	1.734242	27.379578	1.77621	1.72056	0.693576
142	SF14	1.768590	1.784067	1.754856	26.311425	1.79989	1.74033	0.69503
143	SF15	1.704443	1.716877	1.693265	29.834874	1.72941	1.68125	0.690746
144	SF16	1.650604	1.660680	1.641431	33.800410	1.67070	1.63142	0.686597
145	SF18	1.727340	1.740536	1.715477	29.024653	1.75381	1.70277	0.690528
146	SF19	1.671581	1.682323	1.661825	32.762639	1.69303	1.65121	0.687358
147	SF2	1.652219	1.662383	1.642971	33.599572	1.67249	1.63289	0.68671
148	SF3	1.746201	1.760267	1.733599	27.981996	1.77446	1.72017	0.691589
149	SF4	1.761667	1.776357	1.748528	27.369316	1.79121	1.73456	0.692165
150	SF5	1.677639	1.688757	1.667562	31.971219	1.69986	1.65664	0.687999
151	SF53	1.734298	1.747898	1.722103	28.466506	1.76162	1.70908	0.691399
152	SF54	1.747028	1.761169	1.734370	27.874688	1.77547	1.72088	0.692019

153	SF55	1.768471	1.783663	1.754926	26.740927	1.79908	1.74058	0.693233
154	SF56A	1.791799	1.808000	1.777397	25.873637	1.82450	1.76220	0.694245
155	SF57	1.855036	1.874245	1.838079	23.641919	1.89456	1.82038	0.699775
156	SF58	1.927646	1.950839	1.907379	21.344672	1.97486	1.88647	0.699664
157	SF59	1.963487	1.988992	1.941312	20.207276	2.01557	1.91856	0.701379
158	SF6	1.812650	1.829705	1.797504	25.236777	1.84707	1.78157	0.694428
159	SF63	1.754775	1.769268	1.741821	27.499451	1.78394	1.72805	0.692443
160	SF64A	1.711350	1.723818	1.700153	30.059869	1.73644	1.68804	0.691432
161	SF8	1.694158	1.705941	1.683507	30.943427	1.71774	1.67201	0.688867
162	SF9	1.659065	1.669395	1.649666	33.405589	1.67967	1.63941	0.686742
163	SFL4A	1.761700	1.776519	1.748497	27.181780	1.79191	1.73427	0.695875
164	SFL56	1.791791	1.808009	1.777403	25.869981	1.82462	1.76211	0.695279
165	SFL57	1.855096	1.874508	1.838019	23.434511	1.89456	1.82007	0.697971
166	SFL6	1.812651	1.829765	1.797505	25.190481	1.84733	1.78147	0.696016
167	SK1	1.612815	1.618369	1.607510	56.430671	1.62365	1.6013	0.671314
168	SK10	1.625410	1.631059	1.620013	56.621232	1.63643	1.61369	0.671255
169	SK11	1.566052	1.570811	1.561461	60.546490	1.5753	1.55597	0.668256
170	SK12	1.585470	1.590514	1.580622	59.183920	1.59529	1.57487	0.669485
171	SK13	1.594229	1.599460	1.589219	58.022436	1.60442	1.58332	0.670416
172	SK14	1.605484	1.610594	1.600559	60.341689	1.61542	1.59467	0.668596
173	SK15	1.625548	1.631075	1.620250	57.789704	1.63631	1.61400	0.670112
174	SK16	1.622863	1.628140	1.617772	60.076133	1.63312	1.61167	0.668296
175	SK18A	1.641285	1.647235	1.635607	55.149785	1.65290	1.62894	0.671659
176	SK2	1.609937	1.615471	1.604651	56.368741	1.62073	1.59847	0.671248
177	SK3	1.611274	1.616591	1.606169	58.653213	1.62163	1.60012	0.669814
178	SK4	1.615212	1.620591	1.610050	58.361455	1.62569	1.60394	0.669949
179	SK5	1.591424	1.596353	1.586661	61.021483	1.60100	1.58094	0.667829
180	SK51	1.623355	1.628658	1.618272	60.019979	1.63369	1.61227	0.67032
181	SK55	1.622873	1.628158	1.617758	59.894467	1.63314	1.61158	0.667468
182	SK6	1.616344	1.621964	1.610980	56.113746	1.62731	1.60472	0.671525
183	SK7	1.609726	1.614978	1.604678	59.193803	1.61995	1.59869	0.66946
184	SK8	1.613776	1.619422	1.608390	55.635905	1.62480	1.60210	0.671785
185	SSK1	1.619928	1.625856	1.614296	53.625105	1.63152	1.60776	0.673014
186	SSK2	1.625089	1.631159	1.619334	52.863802	1.63697	1.61267	0.673679
187	SSK3	1.617697	1.623945	1.611801	50.863709	1.62995	1.60502	0.675134
188	SSK4A	1.620319	1.626111	1.614803	54.856418	1.63163	1.60838	0.672193
189	SSK50	1.620750	1.626845	1.614980	52.315586	1.63269	1.60831	0.674195
190	SSK51	1.606287	1.612119	1.600753	53.341521	1.61770	1.59433	0.673453
191	SSKN5	1.661519	1.668244	1.655169	50.592953	1.67471	1.64785	0.675042
192	SSKN8	1.620671	1.627132	1.614588	49.479031	1.63337	1.60758	0.676126
193	TIF3	1.550723	1.557567	1.544421	41.892692	1.56434	1.53731	0.683619
194	TIF6	1.621182	1.631939	1.611684	30.667856	1.64309	1.60151	0.697574
195	TIFN5	1.597506	1.606394	1.589437	35.235380	1.61531	1.58053	0.68813
196	UBK7	1.518720	1.522820	1.514725	64.081596	1.52667	1.50982	0.66555
197	UK50	1.524635	1.529074	1.520350	60.138923	1.53327	1.51520	0.668344
198	ZK1	1.535341	1.540075	1.530799	57.717012	1.54457	1.52541	0.670176
199	ZKN7	1.510452	1.514697	1.506327	60.982718	1.51869	1.50129	0.666343

ANEXA 4.1 Caracteristicile geometrice ale tripletelor obținute prin sinteză cu combinațiile de materiale declarate compatibile pentru apocromazie

Nr. crt.	$c_1/c_a=0.5$	$c_1/c_a=0.6$	$c_1/c_a=0.7$	$c_1/c_a=0.8$
1	FK51-KZFS1-TIF6			
	1.1 ca= 4.9002D-02 c1= 2.4501D-02 r(1)= 40.81 r(2)=-40.81 r(3)= 323.60 r(4)=-527.63 d(1)= 4.00 d(2)= 1.50 d(3)= 1.75 f= 99.587 s'(4)= 94.614	1.2 ca= 2.9402D-02 c1= 2.4501D-02 r(1)= 34.01 r(2)=-51.02 r(3)= 125.15 r(4)= 332.78 d(1)= 4.00 d(2)= 1.50 d(3)= 2.05 f= 97.880 s'(4)= 91.550	1.3 ca= 4.9002D-02 c1= 3.4301D-02 r(1)= 29.15 r(2)=-68.02 r(3)= 77.58 r(4)= 126.50 d(1)= 4.01 d(2)= 1.50 d(3)= 2.54 f= 95.362 s'(4)= 87.499	1.4 ca= 4.9002D-02 c1= 3.9201D-02 r(1)= 25.51 r(2)=-102.04 r(3)= 56.21 r(4)= 78.09 d(1)= 4.03 d(2)= 1.50 d(3)= 3.03 f= 91.975 s'(4)= 82.575
2	FK51-KZFSN2-TIF6			
	2.1 ca= 5.9304D-02 c1= 2.9652D-02 r(1)= 33.72 r(2)=-33.72 r(3)= 201.38 r(4)= 238.27 d(1)= 4.53 d(2)= 1.50 d(3)= 1.96 f= 97.423 s'(4)= 90.475	2.2 ca= 5.9304D-02 c1= 3.5582D-02 r(1)= 28.10 r(2)=-42.16 r(3)= 91.77 r(4)= 98.74 d(1)= 4.54 d(2)= 1.50 d(3)= 2.55 f= 94.010 s'(4)= 85.180	2.3 ca= 5.9304D-02 c1= 4.1513D-02 r(1)= 24.0988 r(2)=-56.21 r(3)= 59.43 r(4)= 62.27 d(1)= 4.57 d(2)= 1.50 d(3)= 3.15 f= 89.376 s'(4)= 78.7172	2.4 ca= 5.9304D-02 c1= 4.7443D-02 r(1)= 21.08 r(2)=-84.31 r(3)= 43.94 r(4)= 45.48 d(1)= 4.62 d(2)= 1.50 d(3)= 3.74 f= 83.668 s'(4)= 71.306
3	FK52-KZFSN2-TIF6			
	3.1 ca= 6.1083D-02 c1= 3.0541D-02	3.2 ca= 6.1083D-02 c1= 3.6649D-02	3.3 ca= 6.1083D-02 c1= 4.2758D-02	3.4 ca= 6.1083D-02 c1= 4.8866D-02

	$r(1) = 32.74$ $r(2) = -32.74$ $r(3) = 208.46$ $r(4) = 211.46$ $d(1) = 4.63$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.98$ $f = 97.034$ $s'(4) = 89.809$	$r(1) = 27.29$ $r(2) = -40.93$ $r(3) = 91.70$ $r(4) = 92.27$ $d(1) = 4.64$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.59$ $f = 9.340$ $s'(4) = 84.190$	$r(1) = 23.39$ $r(2) = -54.57$ $r(3) = 58.78$ $r(4) = 59.01$ $d(1) = 4.67$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 3.20$ $f = 88.380$ $s'(4) = 77.354$	$r(1) = 20.46$ $r(2) = -81.86$ $r(3) = 43.25$ $r(4) = 43.38$ $d(1) = 4.72$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 3.81$ $f = 82.323$ $s'(4) = 69.586$
4	FK54-BK3-TIF6			
4.1	4.2	4.3	4.4	
$ca = .0750$ $c1 = .0375$ $r(1) = 26.66$ $r(2) = -26.66$ $r(3) = 145.51$ $r(4) = 125.65$ $d(1) = 5.40$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.50$ $f = 95.019$ $s'(4) = 86.486$	$ca = .0750$ $c1 = .0450$ $r(1) = 27.29$ $r(2) = -33.32$ $r(3) = 69.56$ $r(4) = 64.68$ $d(1) = 5.41$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.50$ $f = 90.589$ $s'(4) = 80.598$	$ca = .0750$ $c1 = 5.2521D-02$ $r(1) = 19.04$ $r(2) = -44.43$ $r(3) = 45.71$ $r(4) = 43.55$ $d(1) = 5.48$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.50$ $f = 85.389$ $s'(4) = 74.144$	$ca = .07503$ $c1 = 6.0024D-02$ $r(1) = 16.66$ $r(2) = -66.64$ $r(3) = 34.03$ $r(4) = 32.82$ $d(1) = 5.60$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.50$ $f = 79.632$ $s'(4) = 67.360$	
5	FK54-KZFS1-TIF6			
5.1	5.2	5.3	5.4	
$ca = 5.0851D-02$ $c1 = 2.5425D-02$ $r(1) = 39.33$ $r(2) = -39.33$ $r(3) = -2764.61$ $r(4) = -183.07$ $d(1) = 4.09$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.76$ $f = 100.099$ $s'(4) = 95.573$	$ca = 5.0851D-02$ $c1 = 0.0305$ $r(1) = 32.77$ $r(2) = -49.16$ $r(3) = 221.71$ $r(4) = -2651.3$ $d(1) = 4.10$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.75$ $f = 98.780$ $s'(4) = 93.061$	$ca = 5.0851D-02$ $c1 = 3.5596D-02$ $r(1) = 28.10$ $r(2) = -65.55$ $r(3) = 101.95$ $r(4) = 212.40$ $d(1) = 4.11$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.23$ $f = 96.745$ $s'(4) = 89.535$	$ca = 5.0851D-02$ $c1 = .0406$ $r(1) = 24.58$ $r(2) = -98.32$ $r(3) = 67.14$ $r(4) = 102.11$ $d(1) = 4.14$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.74$ $f = 93.834$ $s'(4) = 85.059$	
6	FK54-KZFS6-TIF6			
6.1	6.2	6.3	6.4	
$ca = 3.3581D-02$	$ca = 3.3581D-02$	$ca = 3.3581D-02$	$ca = 3.3581D-02$	

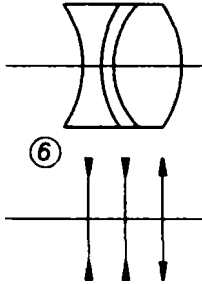
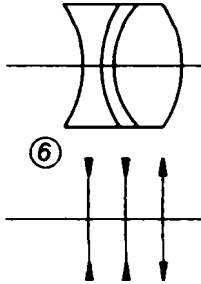
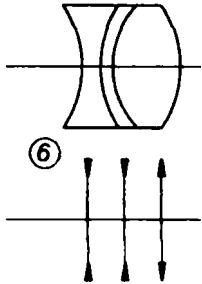
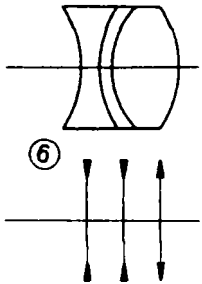
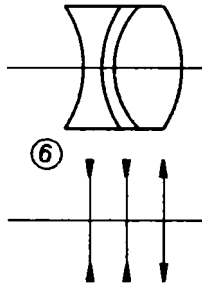
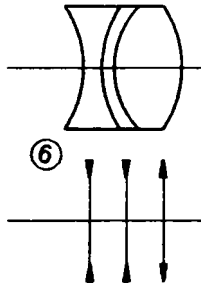
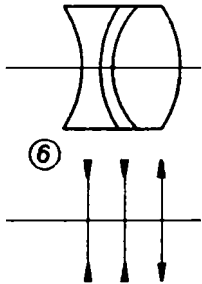
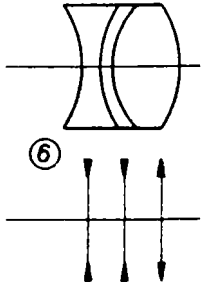
	$c1 = 1.6790D-02$ $r(1) = 59.56$ $r(2) = -59.56$ $r(3) = -58.78$ $r(4) = -108.56$ $d(1) = 3.19$ $d(2) = 1.51$ $d(3) = 1.50$ $f = 100.907$ $s'(4) = 98.399$	$c1 = 2.0148D-02$ $r(1) = 29.61$ $r(2) = -44.41$ $r(3) = 155.13$ $r(4) = 431.59$ $d(1) = 3.19$ $d(2) = 1.51$ $d(3) = 1.50$ $f = 100.907$ $s'(4) = 98.399$	$c1 = 2.3506D-02$ $r(1) = 42.54$ $r(2) = -99.26$ $r(3) = -97.13$ $r(4) = -400.71$ $d(1) = 3.20$ $d(2) = 1.51$ $d(3) = 1.50$ $f = 100.159$ $s'(4) = 96.248$	$c1 = 2.6865D-02$ $r(1) = 37.22$ $r(2) = -148.89$ $r(3) = -144.15$ $r(4) = 1159.28$ $d(1) = 3.20$ $d(2) = 1.51$ $d(3) = 1.50$ $f = 99.413$ $s'(4) = 94.821$
7	FK54-KZFSN2-SF57			
	7.1 $ca = 6.1405D-02$ $c1 = 3.0702D-02$ $r(1) = 32.57$ $r(2) = -32.57$ $r(3) = 1758.49$ $r(4) = -5836.84$ $d(1) = 4.65$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.54$ $f = 98.562$ $s'(4) = 92.528$	7.2 $ca = 6.1405D-02$ $c1 = 3.6843D-02$ $r(1) = 27.07$ $r(2) = -40.61$ $r(3) = 1758.49$ $r(4) = -5836.84$ $d(1) = 4.65$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.54$ $f = 98.562$ $s'(4) = 92.528$	7.3 $ca = 6.1405D-02$ $c1 = 4.2983D-02$ $r(1) = 23.26$ $r(2) = -54.28$ $r(3) = 77.82$ $r(4) = 82.58$ $d(1) = 4.69$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.75$ $f = 91.259$ $s'(4) = 81.460$	7.4 $ca = 6.1405D-02$ $c1 = 4.9124D-02$ $r(1) = 20.36$ $r(2) = -81.43$ $r(3) = 52.66$ $r(4) = 54.79$ $d(1) = 4.74$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 3.36$ $f = 85.289$ $s'(4) = 73.689$
8	FK54-KZFSN2-SF58			
	8.1 $ca = 6.1392D-02$ $c1 = 3.0696D-02$ $r(1) = 32.58$ $r(2) = -32.58$ $r(3) = 2523.31$ $r(4) = -5444.05$ $d(1) = 4.65$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.53$ $f = 98.565$ $s'(4) = 92.569$	8.2 $ca = 6.1392D-02$ $c1 = 3.6834D-02$ $r(1) = 27.15$ $r(2) = -40.72$ $r(3) = 153.01$ $r(4) = 167.91$ $d(1) = 4.66$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.12$ $f = 95.645$ $s'(4) = 87.790$	8.3 $ca = 6.1392D-02$ $c1 = 4.2974D-02$ $r(1) = 23.27$ $r(2) = -54.30$ $r(3) = 78.90$ $r(4) = 82.68$ $d(1) = 4.69$ $d(2) = 1.5$ $d(3) = 2.74$ $f = 91.057$ $s'(4) = 81.290$	8.4 $ca = 6.1392D-02$ $c1 = 4.9114D-02$ $r(1) = 20.36$ $r(2) = -81.44$ $r(3) = 53.15$ $r(4) = 54.84$ $d(1) = 4.74$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 3.35$ $f = 84.834$ $s'(4) = 73.279$
9	FK54-KZFSN2-SF59			

	<p>9.1 $ca = 6.1320D-02$ $c1 = 3.0660D-02$ $r(1) = 32.62$ $r(2) = -32.62$ $r(3) = 3565.43$ $r(4) = -4496.00$ $d(1) = 4.65$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.53$ $f = 98.579$ $s'(4) = 92.611$</p>	<p>9.2 $ca = 6.1320D-02$ $c1 = 3.6792D-02$ $r(1) = 27.18$ $r(2) = -40.77$ $r(3) = 155.95$ $r(4) = 169.22$ $d(1) = 4.65$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.11$ $f = 95.647$ $s'(4) = 87.823$</p>	<p>9.3 $ca = 6.1320D-02$ $c1 = 4.2924D-02$ $r(1) = 23.30$ $r(2) = -54.36$ $r(3) = 79.72$ $r(4) = 83.05$ $d(1) = 4.68$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.73$ $f = 91.001$ $s'(4) = 81.268$</p>	<p>9.4 $ca = 6.1320D-02$ $c1 = 4.9056D-02$ $r(1) = 20.38$ $r(2) = -81.54$ $r(3) = 53.54$ $r(4) = 55.02$ $d(1) = 4.74$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 3.34$ $f = 84.675$ $s'(4) = 73.160$</p>
10	FK54-KZFSN2-TIF6			
	<p>10.1 $ca = 6.0380D-02$ $c1 = 3.0190D-02$ $r(1) = 33.12$ $r(2) = -33.12$ $r(3) = 1508.17$ $r(4) = -1426.39$ $d(1) = 4.60$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.57$ $f = 98.738$ $s'(4) = 92.721$</p>	<p>10.2 $ca = 6.0380D-02$ $c1 = 3.6228D-02$ $r(1) = 27.60$ $r(2) = -41.40$ $r(3) = 149.23$ $r(4) = 187.37$ $d(1) = 4.60$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.10$ $f = 96.222$ $s'(4) = 88.451$</p>	<p>10.3 $ca = 6.0380D-02$ $c1 = 4.2266D-02$ $r(1) = 23.66$ $r(2) = -55.21$ $r(3) = 78.50$ $r(4) = 87.91$ $d(1) = 4.63$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.71$ $f = 92.510$ $s'(4) = 82.886$</p>	<p>10.4 $ca = 6.0380D-02$ $c1 = 4.8304D-02$ $r(1) = 20.70$ $r(2) = -82.81$ $r(3) = 53.26$ $r(4) = 57.43$ $d(1) = 4.68$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 3.31$ $f = 87.617$ $s'(4) = 76.189$</p>
11	FK54-KZFSN9-TIF6			
	<p>11.1 $ca = 5.4706D-02$ $c1 = .0273$ $r(1) = 36.56$ $r(2) = -36.56$ $r(3) = 1119.54$ $r(4) = -251.67$ $d(1) = 4.29$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.74$ $f = 99.674$ $s'(4) = 94.571$</p>	<p>11.2 $ca = 5.4706D-02$ $c1 = .0328$ $r(1) = 30.47$ $r(2) = -45.70$ $r(3) = 157.14$ $r(4) = 667.96$ $d(1) = 4.30$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.90$ $f = 97.957$ $s'(4) = 91.476$</p>	<p>11.3 $ca = 5.4706D-02$ $c1 = 3.8294D-02$ $r(1) = 26.11$ $r(2) = -60.93$ $r(3) = 84.50$ $r(4) = 143.52$ $d(1) = 4.32$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.44$ $f = 95.327$ $s'(4) = 87.180$</p>	<p>11.4 $ca = 5.4706D-02$ $c1 = 4.3765D-02$ $r(1) = 22.85$ $r(2) = -91.40$ $r(3) = 57.79$ $r(4) = 80.40$ $d(1) = 4.35$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 3.00$ $f = 91.680$ $s'(4) = 81.845$</p>
12	FK54-LAK16A-TIF6			

	12.1 ca= 6.1312D-02 c1= 3.0656D-02 r(1)= 32.62 r(2)=-32.62 r(3)=-211.66 r(4)=-119.94 d(1)= 4.64 d(2)= 1.50 d(3)= 1.68 f= 99.031 s'(4)= 93.805	12.2 ca= 6.1312D-02 c1= 3.6787D-02 r(1)= 27.18 r(2)=-40.78 r(3)= 710.90 r(4)=-453.26 d(1)= 4.65 d(2)= 1.50 d(3)= 1.68 f= 97.119 s'(4)= 90.378	12.3 ca= 6.1312D-02 c1= 4.2918D-02 r(1)= 23.30 r(2)=-54.37 r(3)= 132.67 r(4)= 254.78 d(1)= 4.69 d(2)= 1.50 d(3)= 2.07 f= 94.178 s'(4)= 85.755	12.4 ca= 6.1312D-02 c1= 4.9050D-02 r(1)= 20.39 r(2)=-81.55 r(3)= 73.16 r(4)= 99.44 d(1)= 4.74 d(2)= 1.50 d(3)= 2.69 f= 90.024 s'(4)= 79.762
	FK54-LAK28-TIF6			
13				
	13.1 ca= 6.0420D-02 c1= 3.0210D-02 r(1)= 33.10 r(2)=-33.10 r(3)=-210.19 r(4)=-112.64 d(1)= 4.60 d(2)= 1.50 d(3)= 1.71 f= 99.145 s'(4)= 94.083	13.2 ca= 6.0420D-02 c1= 3.6252D-02 r(1)= 27.58 r(2)=-41.37 r(3)= 778.56 r(4)= -352.60 d(1)= 4.60 d(2)= 1.50 d(3)= 1.71 f= 97.360 s'(4)= 90.791	13.3 ca= 6.0420D-02 c1= 4.2294D-02 r(1)= 23.64 r(2)=-55.17 r(3)= 136.50 r(4)= 311.92 d(1)= 4.63 d(2)= 1.50 d(3)= 2.03 f= 94.577 s'(4)= 86.390	13.4 ca= 6.0420D-02 c1= .04833 r(1)= 20.69 r(2)=-82.75 r(3)= 74.80 r(4)= 108.13 d(1)= 4.68 d(2)= 1.50 d(3)= 2.63 f= 90.62 s'(4)= 80.620
	FK54-LAK31-TIF6			
14				
	14.1 ca= 6.5879D-02 c1= .0329 r(1)= 30.36 r(2)=-30.36 r(3)=-225.46 r(4)=-162.02 d(1)= 4.89 d(2)= 1.50 d(3)= 1.59 f= 98.330	14.2 ca= 6.5879D-02 c1= 3.9527D-02 r(1)= 25.30 r(2)=-37.95 r(3)= 464.55 r(4)= 2403.90 d(1)= 4.90 d(2)= 1.50 d(3)= 1.63 f= 95.795	14.3 ca= 6.5879D-02 c1= 4.6115D-02 r(1)= 21.68 r(2)=-50.60 r(3)= 114.41 r(4)= 142.78 d(1)= 4.94 d(2)= 1.50 d(3)= 2.29 f= 92.016	14.4 ca= 6.5879D-02 c1= 5.27033D-02 r(1)= 18.97 r(2)=-75.90 r(3)= 65.24 r(4)= 73.57 d(1)= 5.01 d(2)= 1.50 d(3)= 2.95 f= 86.865

	$s'(4)=92.332$	$s'(4)=88.198$	$s'(4)=82.460$	$s'(4)=75.373$
15	FK54-LAK33-TIF6			
15.1	15.2	15.3	15.4	
ca= 6.2219D-02 c1= 3.1109D-02 r(1)= 32.14 r(2)=-32.14 r(3)=-182.08 r(4)=-111.87 d(1)= 4.70 d(2)= 1.50 d(3)= 1.67 f= 98.899 s'(4)= 93.657	ca= 6.2219D-02 c1= 3.7331D-02 r(1)= 26.79 r(2)=-40.18 r(3)= 1370.10 r(4)=-368.00 d(1)= 4.70 d(2)= 1.50 d(3)= 1.67 f= 96.968 s'(4)= 90.177	ca= 6.2219D-02 c1= 4.3553D-02 r(1)= 22.96 r(2)=-53.57 r(3)= 143.85 r(4)= 285.34 d(1)= 4.73 d(2)= 1.50 d(3)= 2.02 f= 93.977 s'(4)= 85.511	ca= 6.2219D-02 c1= 4.9775D-02 r(1)= 20.09 r(2)=-80.36 r(3)= 75.91 r(4)= 102.81 d(1)= 4.79 d(2)= 1.50 d(3)= 2.65 f= 89.752 s'(4)= 79.427	
16	FK54-LAK8-TIF6			
16.1	16.2	16.3	16.4	
ca= 6.3175D-02 c1= 3.1587D-02 r(1)= 31.66 r(2)=-31.66 r(3)=-218.65 r(4)=-137.82 d(1)= 4.74 d(2)= 1.50 d(3)= 1.63 f= 98.765 s'(4)= 93.202	ca= 6.3175D-02 c1= 3.7905D-02 r(1)= 26.38 r(2)=-39.57 r(3)= 573.37 r(4)=-1056.90 d(1)= 4.75 d(2)= 1.50 d(3)= 1.63 f= 96.587 s'(4)= 89.488	ca= 6.3175D-02 c1= 4.4222D-02 r(1)= 22.61 r(2)=-52.76 r(3)= 124.04 r(4)= 185.90 d(1)= 4.79 d(2)= 1.50 d(3)= 2.17 f= 93.299 s'(4)= 84.385	ca= 6.3175D-02 c1= 5.0540D-02 r(1)= 19.79 r(2)=-79.14 r(3)= 69.55 r(4)= 85.49 d(1)= 4.85 d(2)= 1.50 d(3)= 2.81 f= 88.723 s'(4)= 77.926	
17	FK54-LAK9-TIF6			
17.1	17.2	17.3	17.4	
ca= 6.4853D-02 c1= 3.2426D-02 r(1)= 30.84 r(2)=-30.84 r(3)=-283.07 r(4)=-162.12 d(1)= 4.83 d(2)= 1.50	ca= 6.4853D-02 c1= 3.8911D-02 r(1)= 25.70 r(2)=-38.55 r(3)= 338.68 r(4)= 3153.60 d(1)= 4.85 d(2)= 1.50	ca= 6.4853D-02 c1= 4.5397D-02 r(1)= 22.03 r(2)=-51.40 r(3)= 105.95 r(4)= 147.01 d(1)= 4.88 d(2)= 1.50	ca= 6.4853D-02 c1= .05188 r(1)= 19.27 r(2)=-77.10 r(3)= 62.80 r(4)= 75.26 d(1)= 4.95 d(2)= 1.50	

	$d(3) = 1.63$ $f = 98.495$ $s'(4) = 92.592$	$d(3) = 1.66$ $f = 96.052$ $s'(4) = 88.573$	$d(3) = 2.31$ $f = 92.400$ $s'(4) = 82.985$	$d(3) = 2.96$ $f = 87.418$ $s'(4) = 76.071$
18	FK54-LAKL21-TIF6			
	18.1 $ca = 6.9448D-02$ $c1 = 3.4724D-02$ $r(1) = 28.80$ $r(2) = -28.80$ $r(3) = -423.77$ $r(4) = -336.06$ $d(1) = 5.08$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.53$ $f = 97.552$ $s'(4) = 90.764$	18.2 $ca = 6.9448D-02$ $c1 = 4.1168D-02$ $r(1) = 24.00$ $r(2) = -36.00$ $r(3) = 218.10$ $r(4) = 251.94$ $d(1) = 5.10$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.93$ $f = 94.317$ $s'(4) = 85.675$	18.3 $ca = 6.9448D-02$ $c1 = 4.8614D-02$ $r(1) = 20.57$ $r(2) = -48.00$ $r(3) = 86.73$ $r(4) = 91.62$ $d(1) = 5.15$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.62$ $f = 89.599$ $s'(4) = 78.865$	18.4 $ca = 6.9448D-02$ $c1 = 5.5558D-02$ $r(1) = 18.00$ $r(2) = -72.00$ $r(3) = 54.13$ $r(4) = 56.00$ $d(1) = 5.23$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 3.32$ $f = 83.444$ $s'(4) = 70.745$
19	FK54-LAKN14-TIF6			
	19.1 $ca = 6.4867D-02$ $c1 = 3.2433D-02$ $r(1) = 30.83$ $r(2) = -30.83$ $r(3) = -236.26$ $r(4) = -157.56$ $d(1) = 4.83$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.61$ $f = 98.494$ $s'(4) = 92.628$	19.2 $ca = 6.4867D-02$ $c1 = 3.8920D-02$ $r(1) = 25.70$ $r(2) = -38.54$ $r(3) = 443.64$ $r(4) = 7151.60$ $d(1) = 4.85$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 1.62$ $f = 96.073$ $s'(4) = 88.643$	19.3 $ca = 6.4867D-02$ $c1 = 4.5407D-02$ $r(1) = 22.02$ $r(2) = -51.39$ $r(3) = 114.41$ $r(4) = 150.91$ $d(1) = 4.89$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.27$ $f = 92.452$ $s'(4) = 83.092$	19.4 $ca = 6.4867D-02$ $c1 = 5.1893D-02$ $r(1) = 19.27$ $r(2) = -77.08$ $r(3) = 65.67$ $r(4) = 76.26$ $d(1) = 4.95$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 2.92$ $f = 87.488$ $s'(4) = 76.211$
20	KZFS7A-SFL57-TIF6			
	20.1 $ca = -6.2872D-03$ $c1 = -3.1436D-03$ $r(1) = -318.10$ $r(2) = 318.10$ $r(3) = 22.79$ $r(4) = -28.39$	20.2 $ca = -6.2872D-03$ $c1 = -3.7723D-03$ $r(1) = -265.09$ $r(2) = 397.62$ $r(3) = 23.12$ $r(4) = -27.89$	20.3 $ca = -6.2872D-03$ $c1 = -4.4010D-03$ $r(1) = -227.22$ $r(2) = 530.17$ $r(3) = 23.46$ $r(4) = -27.41$	20.4 $ca = -6.2872D-03$ $c1 = -5.0298D-03$ $r(1) = -198.81$ $r(2) = 795.26$ $r(3) = 23.81$ $r(4) = -26.94$

	$d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.63$ $f = 91.373$ $s'(4) = 95.449$	$d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.63$ $f = 90.889$ $s'(4) = 95.140$	$d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.63$ $f = 90.395$ $s'(4) = 94.823$	$d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.63$ $f = 89.890$ $s'(4) = 94.490$
	KZFSN5-SF58-TIF6			
21				
21.1	$ca = -1.4893D-02$ $c1 = 7.4468D-03$ $r(1) = -134.28$ $r(2) = 134.28$ $r(3) = 26.68$ $r(4) = -25.48$ $d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.49$ $f = 88.590$ $s'(4) = 93.516$	21.2 $ca = -1.4893D-02$ $c1 = -8.9358D-03$ $r(1) = -111.90$ $r(2) = 167.86$ $r(3) = 27.78$ $r(4) = -24.55$ $d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.50$ $f = 87.325$ $s'(4) = 92.633$	21.3 $ca = -1.4893D-02$ $c1 = -1.0425D-02$ $r(1) = -95.92$ $r(2) = 223.81$ $r(3) = 28.98$ $r(4) = -23.68$ $d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.50$ $f = 86.014$ $s'(4) = 91.689$	21.4 $ca = -1.4893D-02$ $c1 = -1.1914D-02$ $r(1) = -83.93$ $r(2) = 335.71$ $r(3) = 30.29$ $r(4) = -22.87$ $d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.50$ $f = 84.661$ $s'(4) = 90.688$
	KZFSN5-SF59-TIF6			
22				
22.1	$ca = -2.1229D-02$ $c1 = -1.0614D-02$ $r(1) = -94.21$ $r(2) = 94.21$ $r(3) = 27.12$ $r(4) = -23.56$ $d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.64$ $f = 85.796$ $s'(4) = 91.493$	22.2 $ca = -2.1229D-02$ $c1 = -1.2737D-02$ $r(1) = -78.51$ $r(2) = 117.76$ $r(3) = 28.78$ $r(4) = -22.44$ $d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.65$ $f = 83.856$ $s'(4) = 90.060$	22.3 $ca = -2.1229D-02$ $c1 = -1.4860D-02$ $r(1) = -67.29$ $r(2) = 157.01$ $r(3) = 30.65$ $r(4) = -21.42$ $d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.65$ $f = 81.842$ $s'(4) = 88.521$	22.4 $ca = -2.1229D-02$ $c1 = -1.6983D-02$ $r(1) = -58.88$ $r(2) = 235.52$ $r(3) = 32.78$ $r(4) = -20.49$ $d(1) = 1.50$ $d(2) = 1.50$ $d(3) = 5.67$ $f = 79.767$ $s'(4) = 86.890$

CUPRINS

INTRODUCERE	3
CAP.1. METODE DE SINTEZĂ A SUBANSAMBLURILOR OPTICE CORECTATE LA ABERAȚII CROMATICE ȘI SPECTRU SECUNDAR	7
1.1. Considerații generale	7
1.2. Sinteza dubletelor	9
1.2.1. Dubletul acromat nelipit	9
1.2.2. Dubletul acromat lipit	13
1.2.3. Dubletul acromat nelipit cu distanță mare între lentile	19
1.3. Sinteza tripletelor	20
1.4. Concluzii	24
CAP.2. INDICATORI DE EVALUARE A CALITĂȚII IMAGINII	28
2.1. Generalități	28
2.2. Aberații optice	29
2.2.1. Generalități	29
2.2.2. Aberația de undă	30
2.2.3. Efectul de difracție al diafragmelor	32
2.2.4. Aberații geometrice	35
2.2.5. Aberații cromatice	44
2.2.6. Interpretarea aberațiilor ca parametri de calitate a imaginii	49
2.2.7. Criterii de evaluare a calității imaginii bazate pe OPD	55
2.2.8. Diagrama spot	56
2.3. Metode de analiză a calității imaginii	56
2.3.1. Generalități	56
2.3.2. Trasarea razelor în domeniul paraxial	57
2.3.3. Trasarea razelor în domeniul extraaxial	61
2.3.4. Metode de analiză bazate pe optica ondulatorie și Fourier	66
2.4. Concluzii	72
CAP.3. CRITERII DE COMPATIBILITATE A SORTURILOR DE STICLE OPTICE PENTRU ACROMAZIE ȘI APOCROMAZIE	75
3.1. Materiale optice	75
3.2. Criterii de selecție a sorturilor de sticlă pentru subansamblurile corectate la aberații cromatice	82
3.2.1. Considerații generale	82
3.2.2. Alegerea sorturilor de sticlă pentru dubletul acromat	83
3.2.3. Alegerea sorturilor de sticlă pentru tripletul apocromat	87

3.3. Concluzii	89
CAP.4. LIMITELE CALITĂȚII IMAGINII TRIPLETULUI APOCROMAT REZULTAT PRIN SINTEZĂ TRADIȚIONALĂ	91
4.1. Studiu critic asupra calității apocromatului tradițional	91
4.2. Concluzii și contribuții originale	116
CAP.5. METODELE ORIGINALE DE SINTEZĂ A TRIPLETULUI APOCROMAT	119
5.1. Metodă de sinteză a tripletului apocromat din condiția de minim al aberației sferice primare	119
5.2. Metodă de creștere a aperturii prin asferizarea ultimului dioptru.....	126
5.3. Concluzii	132
CAP.6. ANALIZĂ CRITICĂ A ABERAȚIILOR CROMATICE ȘI A SPECTRULUI SECUNDAR AL SUBANSABLURILOR LENTICULARE.....	134
6.1. Analiza elementelor de control al cromatismului subansamblurilor lenticulare.....	134
6.1.1. Aberațiile cromatice și spectrul secundar al lentilei singulare.....	135
6.1.2. Aberațiile cromatice și spectrul secundar al dubletului acromat lipit.....	144
6.1.3. Aberațiile cromatice și spectrul secundar al tripletului apocromat lipit.....	150
6.2. Concluzii	160
CAP.7. CONCLUZII ȘI CONTRIBUȚII PERSONALE	162
BIBLIOGRAFIE	166
ÂNEXA	171