

## INGINERIA OPTICĂ

### Concepte. Definiții. Convenții

*Optica* este acea ramură a fizicii, care studiază proprietățile radiației electromagnetice, modul de producere și propagare, precum și efectul interacțiunii acesteia cu structurile materiale.

Radiația luminoasă sau *lumina* reprezintă acea parte din spectrul de radiații electromagnetice care produce senzație vizuală asupra ochiului uman. *Domeniul vizibil* este un segment foarte îngust al spectrului electromagnetic, cuprinzând intervalul de lungimi de undă (380...780)nm.

Prin definiție, orice mediu care interacționează cu radiația electromagnetică, se numește *mediu optic*. Principala caracteristică a mediilor optice este densitatea optică, măsurată prin mărimea adimensională numită *indice de refracție*.

Indicele de refracție real, cu care se operează în aplicațiile de optică tehnică este de forma:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (1)$$

unde  $c$  este viteza radiației electromagnetice în vid ( $c \approx 3 \cdot 10^8$  m/s), iar  $v$  este viteza de propagare de fază într-un mediu optic dat.

Suprafața de separație a două medii transparente cu densități optice diferite constituie un *dioptru*. În mod convențional, la stânga dioptrului se află *mediul obiect*, iar la dreapta acestuia, *mediul imagine*.

Doi dioptri delimitează un *sistem optic elementar* sau *piesă optică* (de ex. o lentilă). Succesiunea mai multor dioptri centrați formează un *sistem optic*.

Elementele principale ale sistemului standardizat de notații sunt ilustrate în figura 1.

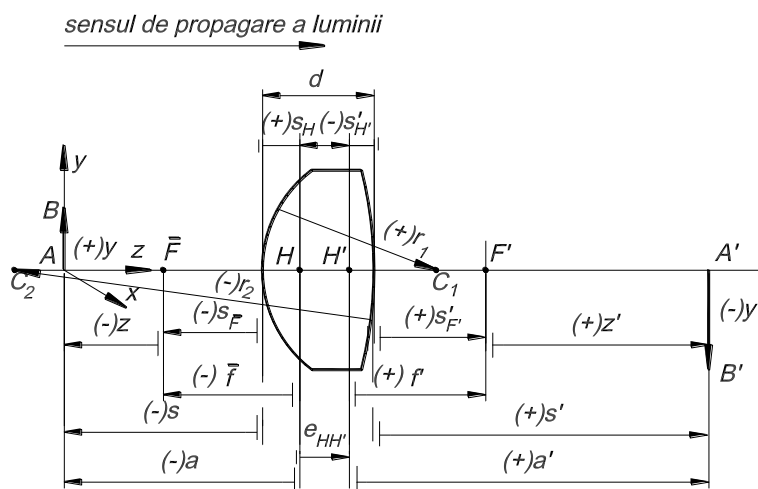


Fig. 1 Notații și convenții de semne (punctele – majuscule latine, distanțele – minuscule latine, originile de măsurare – vârful dioptrului, planele principale sau focarele, sensul – pozitiv la dreapta originii)

*Unghiurile de incidență și emergență*,  $\epsilon$  și  $\epsilon'$ , se definesc ca fiind unghiurile dintre normala la suprafață în punctul de incidență și raza incidentă, respectiv emergentă. Unghiurile dintre axa optică și raza incidentă, respectiv emergentă, se notează cu  $\sigma$  și  $\sigma'$ .

### Legile refracției și reflexiei

*Prima lege a refracției*: raza incidentă și raza refractată se situează într-un plan care conține și

punctul de incidență și care este perpendicular pe planul de separație a celor două medii optice diferite. A doua lege a refracției este o expresie matematică a legăturii dintre unghiul de incidență și cel de emergență:

$$n \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'. \quad (\text{Legea Snellius – Descartes}) \quad (2)$$

*Prima lege a reflexiei:* raza incidentă, raza reflectată și punctul de incidență se situează într-un plan perpendicular pe suprafața reflectantă. *A doua lege a reflexiei* exprimă legătura matematică dintre unghiul de incidență  $\varepsilon$  și unghiul de reflexie  $\varepsilon'$ :

$$\varepsilon = \varepsilon'.$$

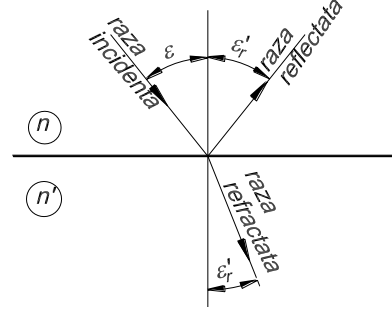


Fig. 2 Refracția și reflexia razei luminoase

(3)

**Trasarea extraaxială a razelor** (tab. 1 și fig. 3)

Tabelul 1 Pași algoritmului de trasare extraaxială a razelor

Pas	$\tilde{s} \neq -\infty, r \neq \infty$	$r = \infty$	$\tilde{s} = -\infty$
1	$\sin \tilde{\varepsilon} = -\frac{(\tilde{s} - r) \sin \tilde{\sigma}}{r}$	$\tilde{\varepsilon} = \tilde{\sigma}$	$\sin \tilde{\varepsilon} = -\frac{h}{r}$
2	$\sin \tilde{\varepsilon}' = \frac{n}{n'} \sin \tilde{\varepsilon}$	$\sin \tilde{\varepsilon}' = \frac{n}{n'} \sin \tilde{\varepsilon}$	$\sin \tilde{\varepsilon}' = \frac{n}{n'} \sin \tilde{\varepsilon}$
3	$\tilde{\sigma}' = \tilde{\sigma} - \tilde{\varepsilon} + \tilde{\varepsilon}' = \tilde{\sigma}_+$	$\tilde{\sigma}' = \tilde{\varepsilon}' = \tilde{\sigma}_+$	$\tilde{\sigma}' = \tilde{\sigma} - \tilde{\varepsilon} + \tilde{\varepsilon}' = \tilde{\sigma}_+$
4	$\tilde{s}' = r \left( 1 - \frac{\sin \tilde{\varepsilon}'}{\sin \tilde{\sigma}'} \right)$	$\tilde{s}' = \tilde{s} \frac{\tan \tilde{\sigma}}{\tan \tilde{\sigma}'}$	$\tilde{s}' = r \left( 1 - \frac{\sin \tilde{\varepsilon}'}{\sin \tilde{\sigma}'} \right)$
5	$\tilde{s}_+ = \tilde{s}' - d$	$\tilde{s}_+ = \tilde{s}' - d$	$\tilde{s}_+ = \tilde{s}' - d$

S-au notat cu indice “+” mărimile referitoare la dioptrul următor.

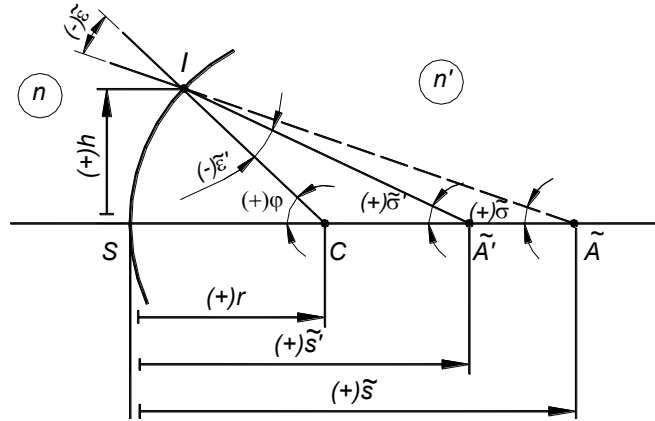


Fig. 3 Elemente caracteristice refracției pe un dioptru sferic

**Domeniul paraxial** conține punctele și razele din vecinătatea axei optice și, din punct de vedere al formalismului matematic, este descris de un set de relații bazate pe invarianți.

*Invariantul paraxial obiectiv* (Abbe):  $\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' - n}{r}, \quad (4)$

unde  $s, s'$  sunt distanța obiect, respectiv imagine,  $r$  – raza dioptrului,  $n, n'$  – indicii de refracție ai mediilor separate de dioptru sferic.

Invariantul Helmholtz-Lagrange:  $ny\sigma = n'y'\sigma' = H$ , (5)

unde  $y, y'$  reprezintă mărimea obiectului, respectiv a imaginii, măsurate de-a lungul axei  $y$ .

*Distanțele focale ale dioptrului*

*Focarul imagine* -  $F'$  - al unui dioptru este punctul de pe axa optică, din spațiul imagine, al cărui punct obiect conjugat se află în spațiul obiect, la infinit.

*Focarul obiect* -  $\bar{F}$  - al unui dioptru este punctul de pe axa optică, din spațiul obiect, al cărui punct imagine conjugat se află în spațiul imagine, la infinit.

*Distanțele focale* se măsoară de la vârful dioptrului la focare.

*Distanța focală imagine:*  $f' = \frac{n'r}{n'-n}$ . *Distanța focală obiect:*  $\bar{f} = -\frac{nr}{n'-n}$ . (6)

**Sisteme optice centrate** (fig. 4)

*Ecuațiile de formare a imaginii*  
(rezultă din invariantul paraxial Abbe):

$$s'_j = \frac{n'_j}{\frac{n_j}{s_j} + \frac{n'_j - n_j}{r_j}}, \quad (7)$$

$$s_{j+1} = s'_j - d_{j,j+1}. \quad (8)$$

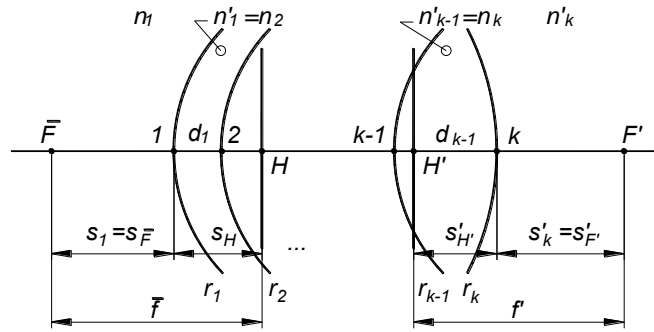


Fig. 4 Caracteristicile de referință ale sistemelor optice centrate

*Mărirea liniară:*

$$\beta = \frac{s'_1 s'_2 \dots s'_k}{s_1 s_2 \dots s_k} \frac{n_1}{n_k} = \frac{n_1}{n_k} \prod_{j=1}^k \frac{s'_j}{s_j}. \quad (9)$$

*Distanțele focale:*

$$f' = s_1 \frac{s'_2 s'_3 \dots s'_k}{s_2 s_3 \dots s_k} = s_1 \prod_{j=2}^k \frac{s'_j}{s_j} \quad \wedge \quad s_1 = \infty, \quad \bar{f} = s_k \prod_{j=1}^{k-1} \frac{s_j}{s'_j} \quad \wedge \quad s'_k = \infty. \quad (10)$$

**Lentile sferice. Caracteristici de referință** (fig. 5)

*Clasificare funcție de efectul optic:*

- lentile (sisteme) convergente (pozitive) $f' > 0, \Phi > 0$	- biconvexe - plan-convexe - menisc convergent
- lentile (sisteme) divergente (negative) $f' < 0, \Phi < 0$	- biconcave - plan-concave - menisc divergent.
- lentile neutre $f' = \infty, \Phi = 0$	- menisc neutru

*Ecuația de formare a imaginii prin lentila sferică:*

$$\frac{1}{a'} - \frac{1}{a} = \frac{1}{f'}, \quad (11)$$

unde  $a, a'$  sunt abscisele obiect, respectiv imagine, măsurate de la planele principale,  $f'$  – distanța focală a lentilei.

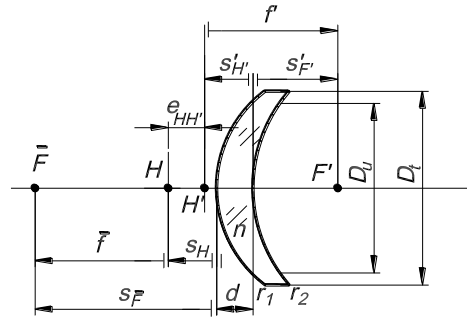


Fig. 5 Caracteristicile de referință ale lentilei sferice

Puterea unui sistem compus din două lentile:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{e}{f'_1 f'_2} = -\frac{\Delta}{f'_1 f'_2}, \text{ sau } \Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - e\Phi_1\Phi_2 = -\Delta\Phi_1\Phi_2, \quad (12)$$

unde  $e$  este distanța  $H'_1H_2$ , iar  $\Delta$  reprezintă *intervalul optic*,  $F'_1\bar{F}_2$ .

**Construcția grafică a imaginii prin lentile sferice** (fig. 6 și fig. 7)

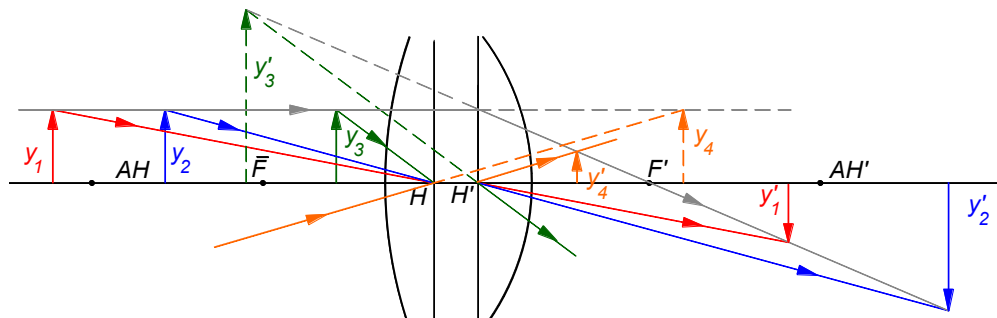


Fig. 6 Construcția grafică a imaginii prin lentila convergentă

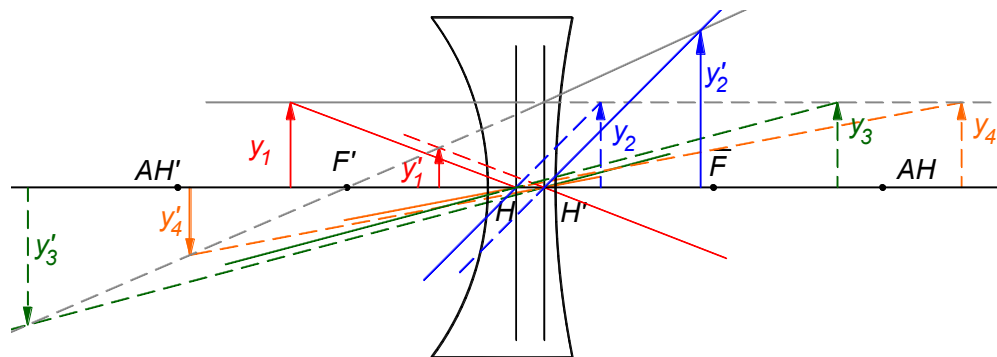


Fig. 7 Formarea grafică a imaginii prin lentila divergentă

**Evaluarea calității sistemelor optice** (tab. 2 și 3)

Tabelul 2. Denumirea, simbolul și metoda de calcul a principalilor parametri geometrici, ondulatorii și Fourier de evaluare a calității sistemelor optice

Nr.	Parametru de calitate a imaginii	Simbol	Metode de calcul
1	Aberația sferică transversală și axială	$dy', ds'$	Trasare paraxială și extraaxială a razelor obiective
2	Coma tangențială și sagitală	$k_T, k_S$	Trasare paraxială și extraaxială a razelor obiectivă și pupilară principală
3	Curburile astigmatice de câmp tangențială și sagitală	$z_T, z_S$	Trasare paraxială și extraaxială a razelor obiectivă și pupilară principală; Trasarea oblică a razelor
4	Distorsiunea	$d\tilde{y}'\%$	Trasare paraxială și extraaxială a razelor obiectivă și pupilară principală
5	Aberația de undă	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

Tabelul 3. Clasificarea sistemelor optice pe clase de calitate

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

### Instrumente optice

Lupa (fig. 8)

$$\text{Grosismetul: } \Gamma = \frac{y'_L}{y'_o} = \frac{\text{tg} \sigma'_p}{\text{tg} \sigma'_o} = \frac{y'}{w'} \cdot \frac{250}{y} \quad (13)$$

Grosismetul comercial:

$$\Gamma_c = \frac{250}{f'} \quad (14)$$

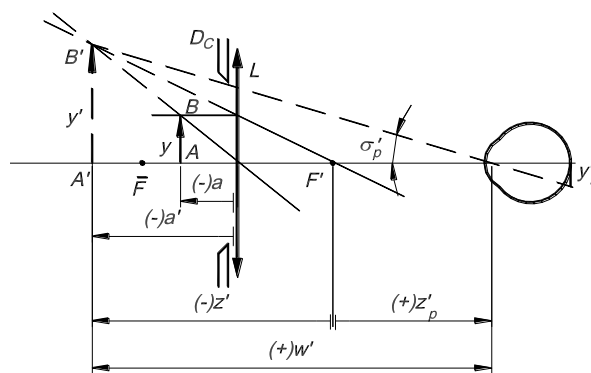


Fig. 8 Schema optică a lupei

Luneta (fig. 9)

Grosismetul lunetei:

$$\Gamma = \frac{f'_1}{f'_2} = -\frac{f'_1}{f'_2}, \quad (13)$$

unde  $f'_1$  – focala obiectivului, iar  $f'_2$  – focala ocularului.

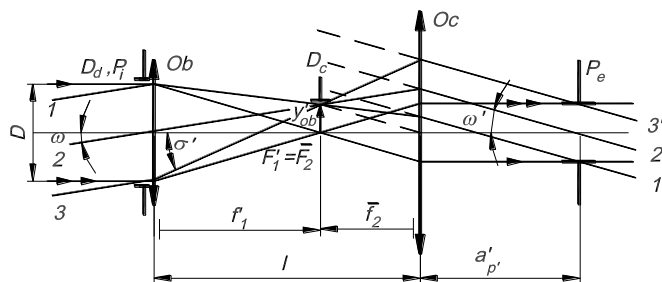


Fig. 9 Schema optică a lunetei Kepler

Microscopul (fig. 10)

Grosismetul microscopului optic:

$$\Gamma = -\frac{\Delta}{f'_{ob}} \cdot \frac{250}{f'_{oc}}, \quad (14)$$

unde  $\Delta$  este intervalul optic.

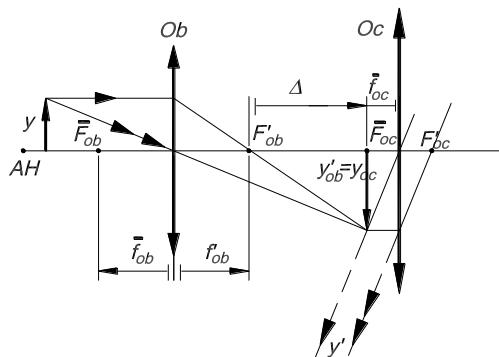


Fig. 10 Schema optică a microscopului cu tub finit