

Optika

Sadržaj

Optika	249	Talasna optika	
Elektromagnetno polje i elektromagneti talasi	251	Talasna svojstva svetlosti. Interferencija svetlosti.	271
Elektromagneti talasi i elektromagneti spektar	252	Difrakcija svetlosti	277
Geometrijska optika		Difrakcija svetlosti na optičkoj rešetki	280
Zakoni odbijanja i prelamanja svetlosti	253	Polarizacija svetlosti	282
Ogledala	254		
Sferna ogledala	255		
Zakoni prelamanja svetlosti	259		
Totalna refleksija	263		
Primena zakona prelamanja	264		
Sočiva	265		

248

OPTIKA

- **Korpuskularna** (Njutnova – XVII vek) teorija svetlosti - uspela da objasni pravolinjsko prostiranje svetlosti, refleksiju i prelamanje.
- **Talasna** (Hajgensova – XVII vek) teorija svetlosti - longitudinalni talas koji se prostire kroz *etar* (hipotetička supstanca koja prožima ceo prazan prostor).
- **Hajgensov princip** – svaka tačka prostora pogodena talasom postaje i sama izvor sekundarnih talasa koji se prostiru u svim pravcima – pogodan način da se objasne neka talasna svojstva svetlosti.
- Jang i Frenel (XIX vek) – dokaz talasne prirode svetlosti i razrada principa interferencije i difrakcije svetlosti na bazi teorije o **talasnoj prirodi** svetlosti.
- Pojava polarizacije potvrđuje talasnu prirodu.
- **Elektromagnetni karakter svetlosti** – Maksvel i Herc (druga polovina XIX veka).

249

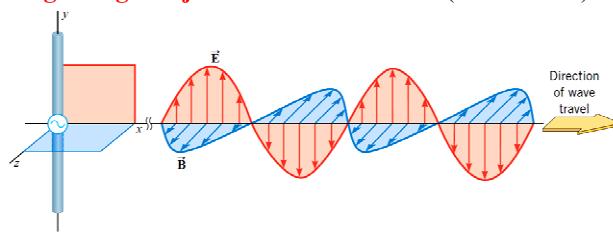
OPTIKA

- Problem fotoelektričnog efekta i raspodele energije zračenja crnog tela rešen uvođenjem hipoteze o **kvantnoj prirodi** energije svetlosnog zračenja (Plank - 1900.).
- Svaki izvor svetlosti emituje energiju u određenim energetskim iznosima - **kvantima (fotonima)**.
- Otkriće **Komptonovog rasejanja fotona** na elektronima (pri kome fotoni menjaju talasnu dužinu), kao i **fotoefekat** potvrđuju **čestičnu prirodu** svetlosti.
- De Broj (1924.) - **dualističko** shvatanje prirode svetlosti **proširuje na elementarne čestice** (protone i elektrone) - kako talasi imaju i čestična svojstva, tako i čestice imaju i talasna svojstva (difrakcija elektrona).

250

Elektromagnetsko polje i elektromagnetski talasi

- Elektromagnetski talasi su oscilacije električnog i magnetnog polja koje se brzo premeštaju u prostoru. Elektromagnetski talasi se formiraju u svim slučajevima kada postoji **ubrzano** (ili usporeno) **kretanje nosilaca naielktrisanja**, odnosno **promena energetskog stanja elektrona** u atomima (molekulima).



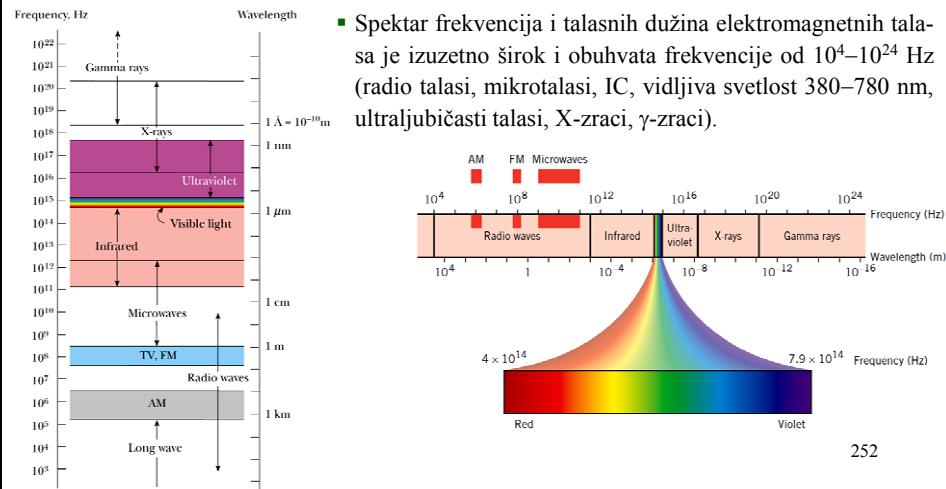
- Osnovne fizičke veličine koje opisuju elektromagnetske talase su brzina prostiranja c (ili v), frekvencija ν i talasna dužina λ :
$$c = \nu \lambda$$
- Elektromagnetski talasi se mogu prostirati i kroz vakuum i kroz materijalne sredine. Brzina prostiranja elektromagnetskih talasa u vakuumu iznosi:

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

251

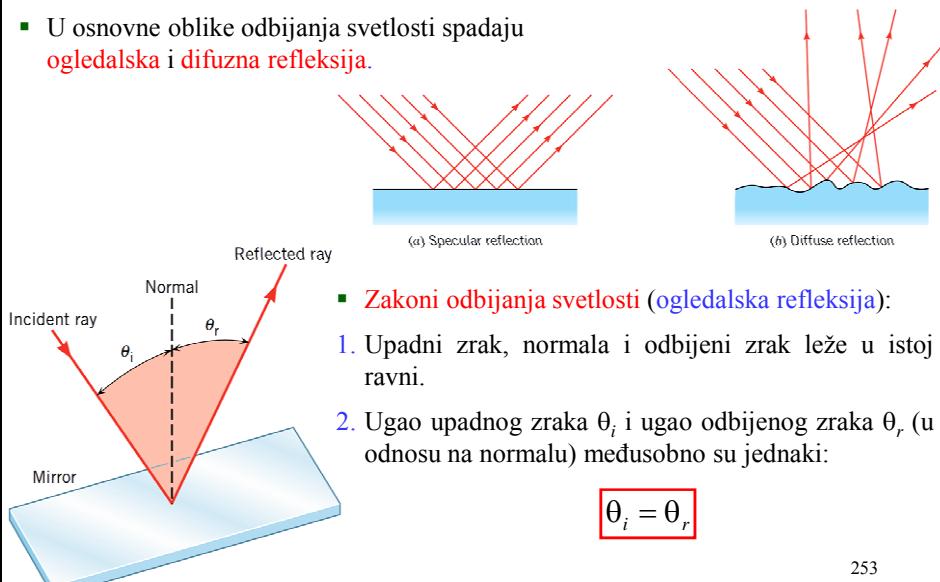
Elektromagneti talasi i elektromagneti spektar

- Ovom brzinom se prostiru, osim talasa, i sva ostala električna i magnetna dejstva u prostoru.
- Brzina prostiranja elektromagneti talasa u materijalnim sredinama se smanjuje u odnosu na brzinu u vakuumu, a istovremeno se smanjuje i talasna dužina.



Geometrijska optika. Zakoni odbijanja i prelamanja svetlosti

- U osnovne oblike odbijanja svetlosti spadaju ogledalska i difuzna refleksija.

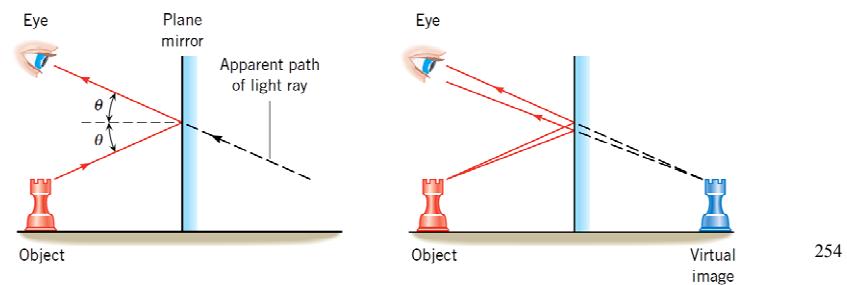
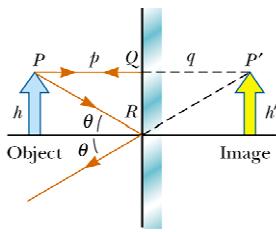


Ogledala

- Ogledala su optička tela uglačanih površina sa ciljem da se na njima vrši refleksija svetlosti.

Ravna ogledala

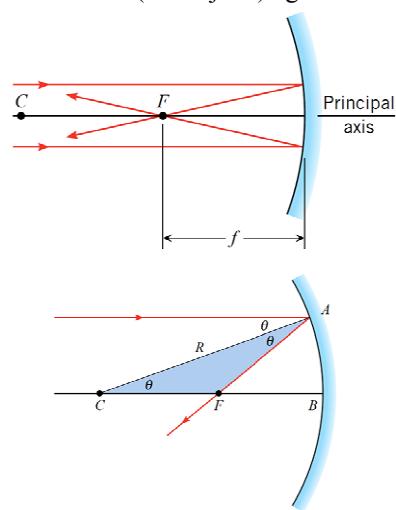
- Likovi koji nastaju u preseku imaginarnih zraka (tj. produžetaka reflektovanih) su **imaginarni**.
- Predmet i njegov lik stoje simetrično u odnosu na ravan ogledala (**na istom su rastojanju** od ogledala) i **iste su visine**.



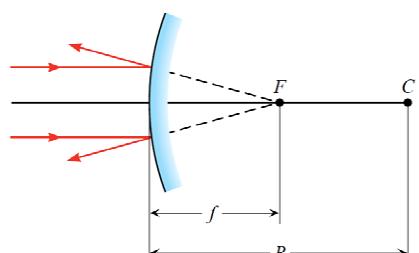
Sferna ogledala

Sferna ogledala

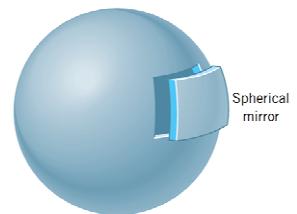
- Sferna ogledala su uglačani delovi sfernih površina.
- **Konkavno** (izdubljeno) ogledalo ↓



- **Konveksno** (ispupčeno) ogledalo ↓



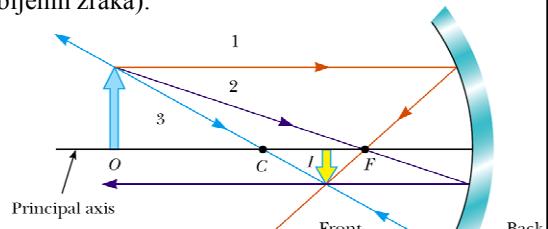
$$f = \frac{R}{2}$$



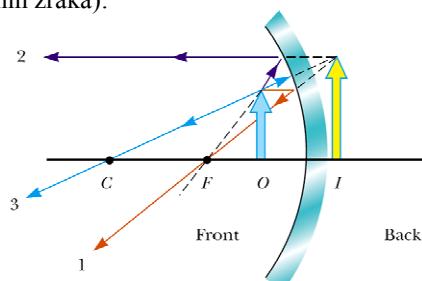
255

Sferna ogledala

- Konstrukcija likova kod **izdubljenih** sfernih ogledala (žiža je realna) – likovi su **realni** (formiraju se u preseku odbijenih zraka):



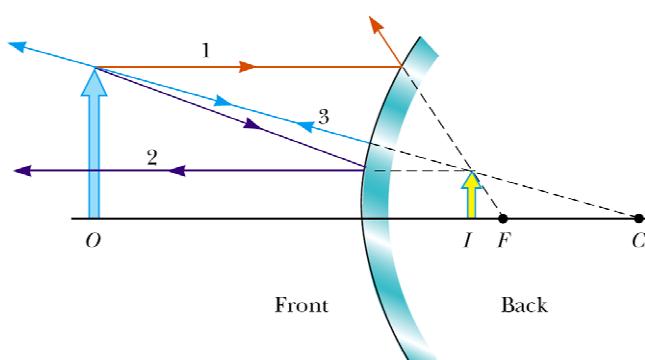
ili **imaginarni** (formiraju se u preseku produžetaka odbijenih zraka):



256

Sferna ogledala

- Konstrukcija likova kod **ispupčenih** sfernih ogledala - likovi su **imaginarni**:



257

Sferna ogledala

- **Jednačina ogledala** - povezuje žižnu daljinu f i rastojanja predmeta p i lika ℓ od temena ogledala.

- Jednačina **konkavnog** (izdubljenog) ogledala:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{\ell}$$

- Jednačina **konveksnog** (ispupčenog) ogledala:
(znaci “-” ukazuju na imaginarnost žiže i lika). *

$$-\frac{1}{f} = \frac{1}{p} - \frac{1}{\ell}$$

- **Uvećanje** je odnos veličina lika i predmeta:

$$u = \frac{L}{P} = \frac{\ell}{p}$$

* Može se uzeti za jednačinu konveksnog ogledala izraz identičan jednačini konkavnog ogledala (svi predznaci pozitivni), ali su onda brojne vrednosti za f i ℓ negativni broevi.

258

Zakoni prelamanja svetlosti

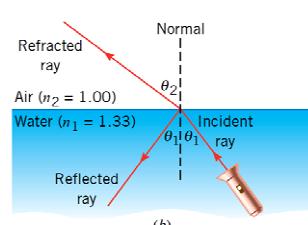
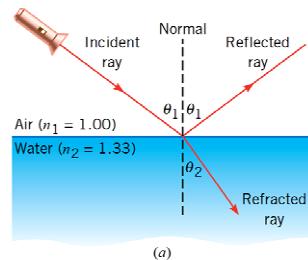
- Pri prelasku svetlosti iz jedne u drugu materijalnu sredinu dolazi do promene pravca prostiranja, tj. do **prelamanja** (refrakcije).

Zakoni prelamanja (refrakcije) svetlosti:

1. Upadni zrak, normala i prelomljeni zrak leže u istoj ravni.
2. Odnos sinusa ugla upadnog zraka θ_1 i sinusa ugla prelomljenog θ_2 zraka je konstantna veličina – **relativni indeks prelamanja** druge sredine u odnosu na prvu (karakteriše sredine na čijoj granici se svetlost prelama).

$$n_{2,1} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$

θ_1, θ_2 su upadni i prelomni ugao u odnosu na **normalu** na graničnu površinu.

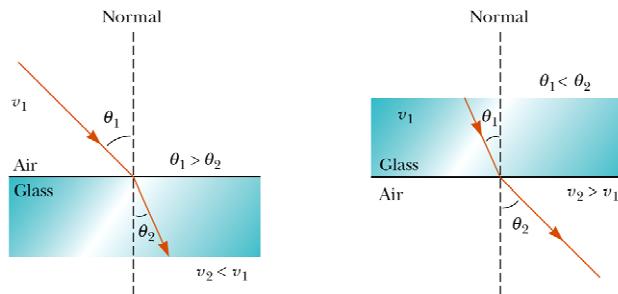


259

Zakoni prelamanja svetlosti

- Relativni indeks prelamanja je odnos brzina svetlosti u I u odnosu na II sredinu:

$$n_{2,1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2}$$



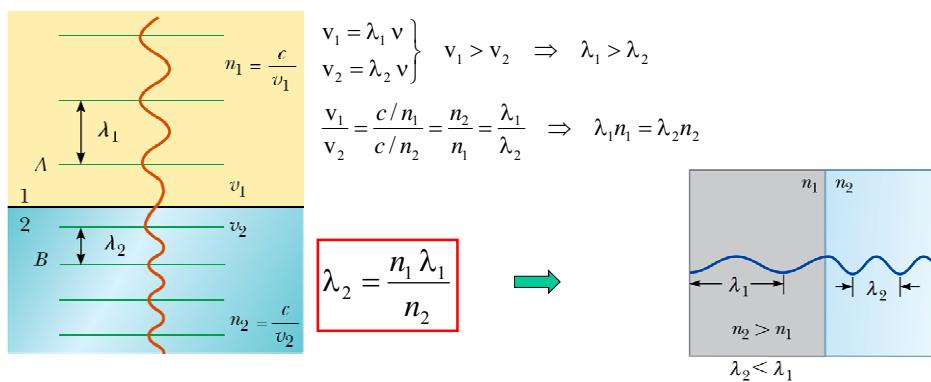
- Apsolutni indeks prelamanja je odnos brzina svetlosti u vakuumu c i u datoj sredini v :

$$n = \frac{c}{v}$$

260

Zakoni prelamanja svetlosti

- Talasna dužina svetlosti pri prostiranju kroz providnu sredinu indeksa prelamanja n se **smanjuje** u poređenju sa λ u vakuumu, a frekvencija talasa (broj oscilacija električnog i magnetnog polja u sekundi) ostaje ista.



- Primer: Ako je prva sredina **vakuum** (vazduh) sa $n_1=1$ (i $v_1=c$) i u kojoj je talasna dužina svetlosti λ_1 , a druga sredina ima absolutni indeks $n_2=n$, tada je talasna dužina svetlosti λ_2 u drugoj sredini n -puta manja:

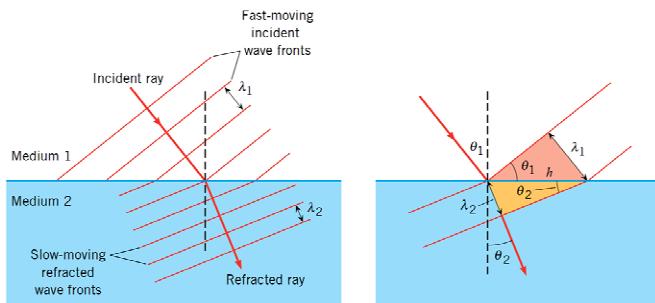
$$\lambda_2 = \frac{\lambda_1}{n}$$

261

Zakoni prelamanja svetlosti

- Snelov zakon prelamanja:

$$\left. \begin{aligned} \sin \theta_1 &= \frac{\lambda_1}{h} = \frac{v_1 \Delta t}{h} = \frac{c \Delta t}{h n_1} \\ \sin \theta_2 &= \frac{\lambda_2}{h} = \frac{v_2 \Delta t}{h} = \frac{c \Delta t}{h n_2} \end{aligned} \right\} \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} \equiv n_{2,1}$$



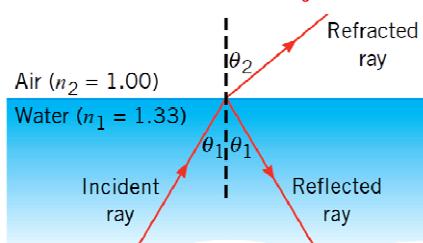
$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$$

- Optički gušća sredina ima veći indeks prelamanja (svetlost se sporije prostire kroz nju).

262

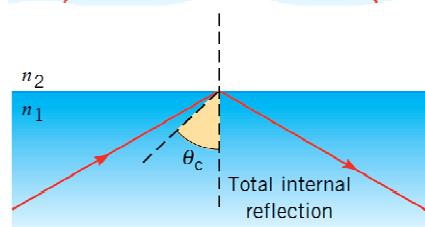
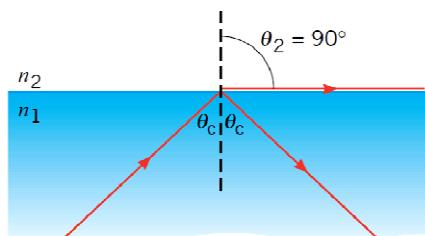
Totalna refleksija

- Pri prelasku iz optički gušće u optički ređu sredinu, za upadne uglove svetlosti veće od nekog graničnog θ_c , dolazi do potpunog odbijanja svetlosti na granici dve sredine – totalna refleksija.



$$n_1 \sin \theta_c = n_2 \sin 90^\circ \quad (n_1 > n_2)$$

$$\boxed{\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (n_1 > n_2)}$$

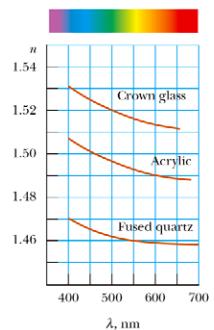


Granični ugao totalne refleksije θ_c zavisi od prirode dve sredine na čijoj granici se ona dešava.

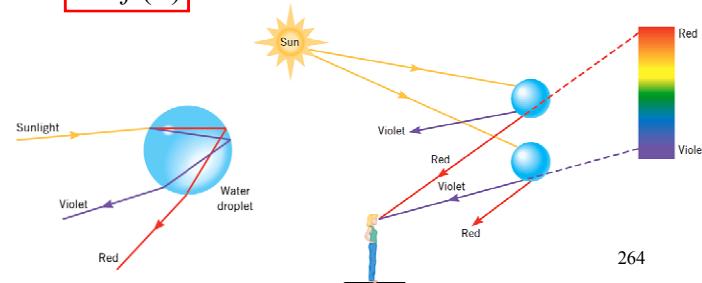
263

Primena zakona prelamanja

- Totalna refleksija se koristi u optici za promenu pravca svetlosnih zraka
- **Disperzija** – pojava zavisnosti optičkih karakteristika (indeksa prelamanja, skretanja zraka, ...) od talasne dužine svetlosti. Posledica je razlaganje svetlosti na komponente.



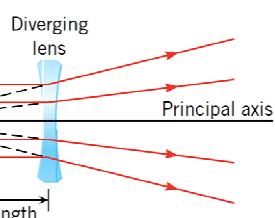
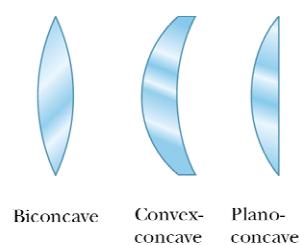
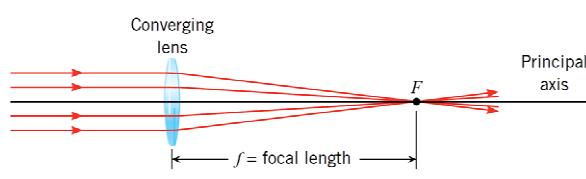
$$n = f(\lambda)$$



264

Sočiva

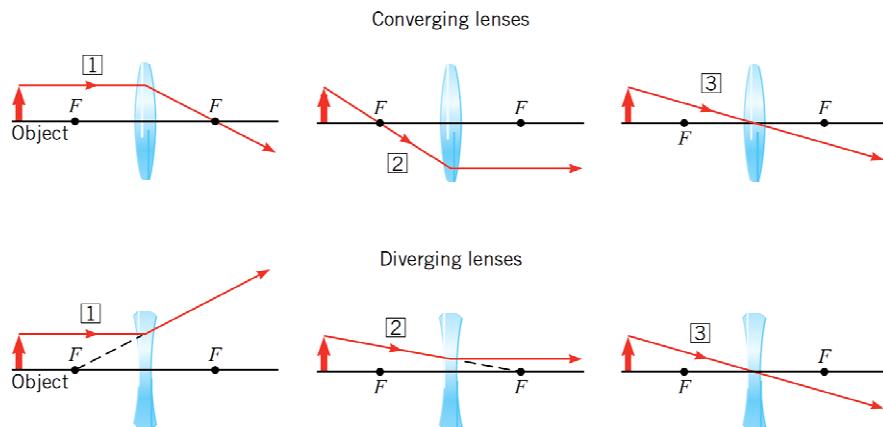
- **Sočiva** su providna optička tela ograničena dvema sfernim površinama ili jednom sfernom i jednom ravnom površinom.
- Prema **načinu prelamanja** podeljena su na **sabirna** (konvergentna) i **rasipna** (divergentna) sočiva.



265

Sočiva

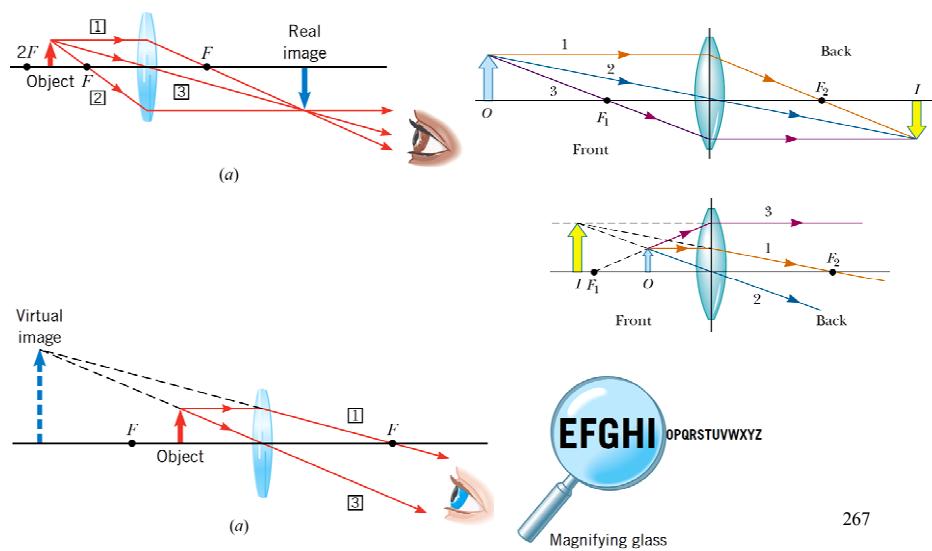
- Konstrukcija likova kod sočiva – karakteristični zraci (3)



266

Sočiva

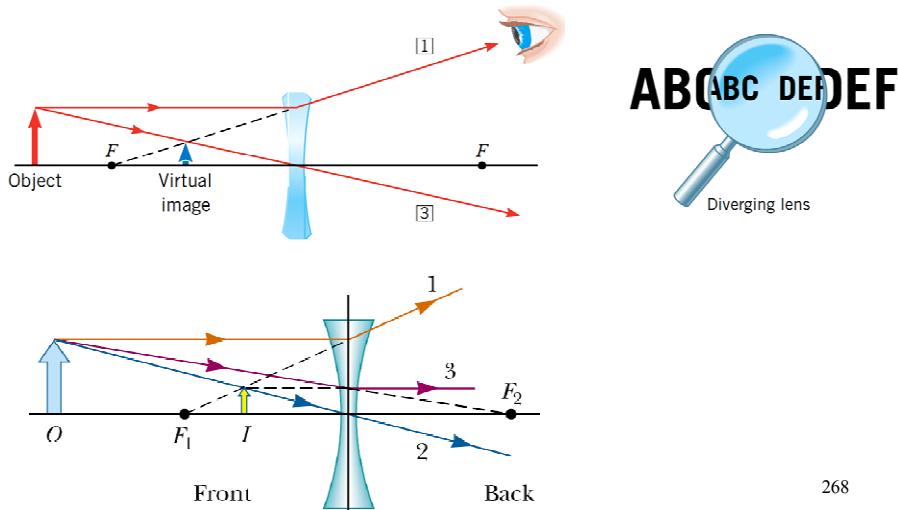
- Konstrukcija likova kod **sabirnih** sočiva – likovi su **realni** ili **imaginarni**



267

Sočiva

- Konstrukcija likova kod **rasipnih** sočiva – likovi su **imaginarni** (dobijaju se u preseku prodiženih zraka).



268

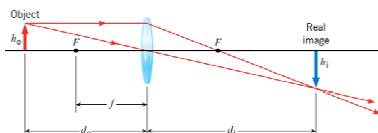
Sočiva

- Jačina sočiva:
- Za složena sočiva, jačine sočiva se sabiraju.
- Jednačina sočiva** – povezuje žižnu daljinu f i rastojanja predmeta p i lika ℓ od centra sočiva.

$$\omega = \frac{1}{f} \quad [D]$$

- Jednačina **sabirnog** sočiva:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{\ell}$$



- Jednačina **rasipnog** sočiva:

(znak “–” je oznaka za imaginarni lik i žižu) *

$$-\frac{1}{f} = \frac{1}{p} - \frac{1}{\ell}$$

- Uvećanje** je odnos veličina lika i predmeta:

$$u = \frac{L}{P} = \frac{\ell}{p}$$

* Može se uzeti za jednačinu rasipnog sočiva izraz identičan jednačini sabirnog sočiva (svi predznaci pozitivni), ali su onda brojne vrednosti za f i ℓ negativni brojevi.

269

Sočiva

- **Optička jednačina sočiva** – pokazuje od čega zavisi žična daljina (n – indeks prelamanja materijala sočiva, r_1 i r_2 – poluprečnici krivina zakriviljenih površina sočiva).

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

- Za slučaj da je sočivo indeksa prelamanja n_2 u nekoj providnoj sredini indeksa prelamanja n_1 , optička jednačina sočiva ima oblik:

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_2 - 1}{n_1} \right) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

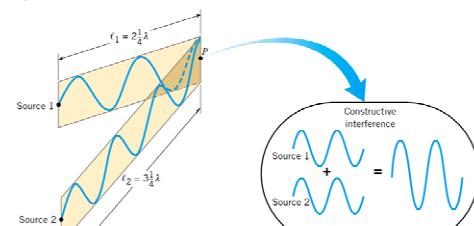
- **Složena sočiva** su kombinacije sočiva različitih oblika i indeksa prelamanja koje su namenjene **otklanjanju nedostataka sočiva**.

$$\frac{1}{f} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{f_i}$$

270

Talasna optika. Talasna svojstva svetlosti. Interferencija svetlosti.

- Analogno mehaničkim talasima, i kod elektromagnetskih talasa dolazi do slaganja, **interferencije** što ima za posledicu **pojačanje** ili **slabljene** njihovog intenziteta.

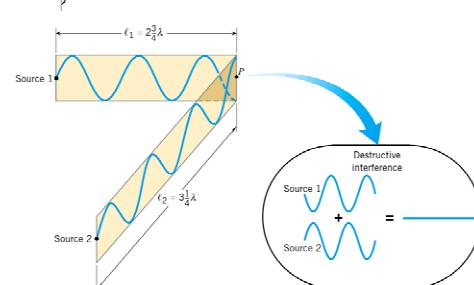


- Za ostvarivanje interferencije talasa koji dolaze iz dva izvora, neophodno je da su talasi:

– **koherentni** – kod njih je **razlika u fazi oscilovanja konstantna**, tj. ne menja se tokom vremena;

– monohromatski (iste talasne dužine).

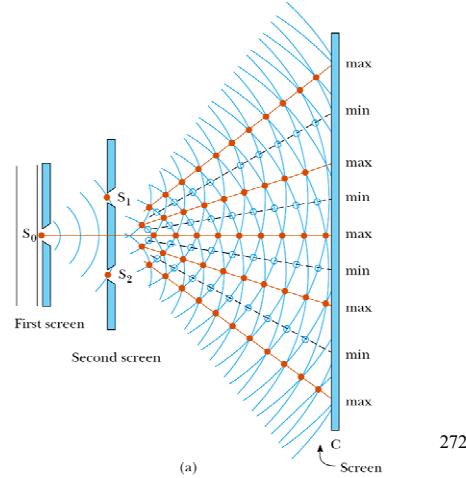
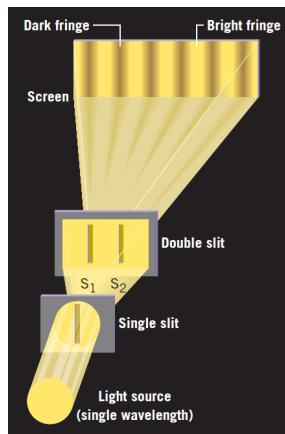
- Laseri su izvori koherentne svetlosti, a fluorescentne ili sijalice sa usijanim vlaknom nekoherentne svetlosti.



271

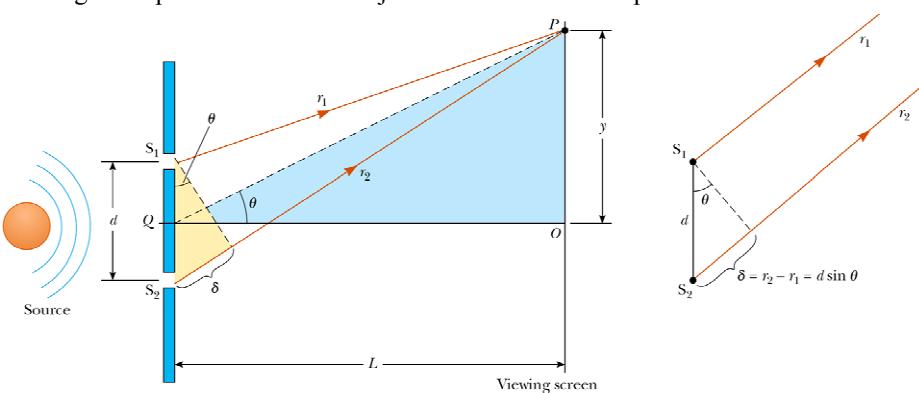
Interferencija svetlosti.

- **Tomas Jang** (1801.) je izveo eksperiment sa interferencijom monohromatske svetlosti koja prolazi kroz dva bliska proreza – dokaz talasne prirode svetlosti.
- Prorezi, sa jedne strane obasjani svetlošću iz jednog izvora, predstavljaju **dva izvora** koherentne svetlosti. Na zaklonu se formira slika od naizmeničnih svetlih i tamnih pruga.



Interferencija svetlosti.

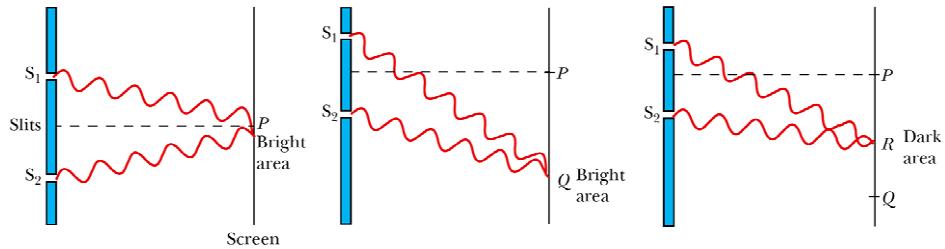
- Jangov eksperiment interferencije svetlosti na dva uska proresa.



- δ je razlika u pređenim putevima zraka koji prema tački P na zaklonu polaze sa različitih pukotina.

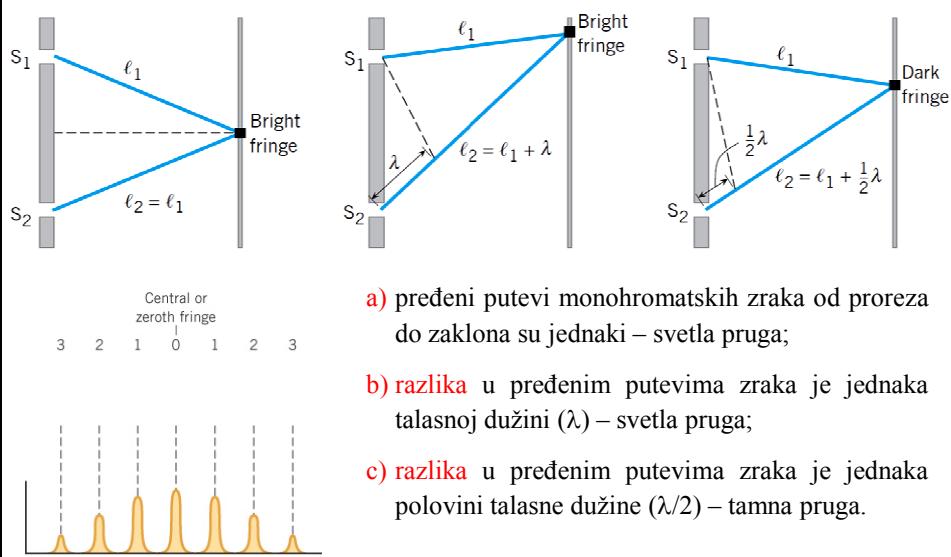
Interferencija svetlosti.

- Rezultati interferencije



274

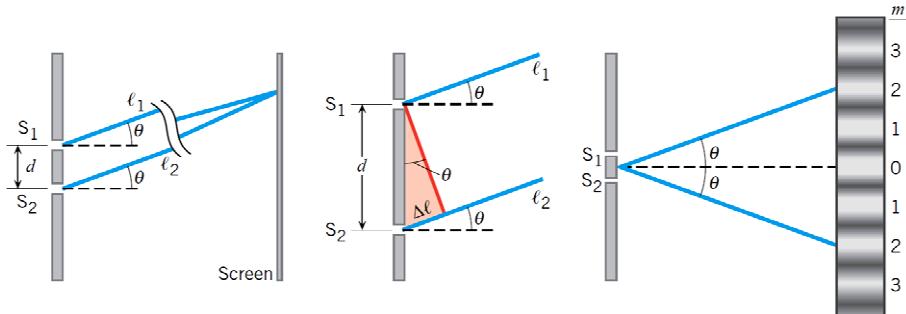
Interferencija svetlosti



275

Interferencija svetlosti

- Pod pretpostavkom da je zaklon dovoljno daleko u poređenju sa međusobnim rastojanjem proreza, mogu se definisati **uslovi** za pojavu svetlih i tamnih pruga na određenom mestu na zaklonu.



$$\delta \equiv \Delta\ell = d \sin \theta = \begin{cases} k\lambda & k = 0, 1, 2, \dots \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2, \dots \end{cases}$$

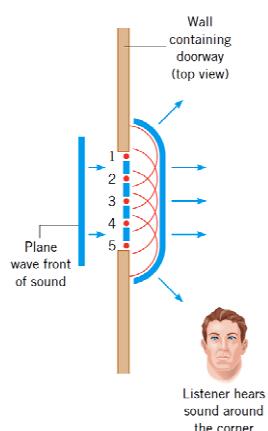
svetla pruga
(konstruktivna interferencija)

tamna pruga
(destruktivna interferencija)

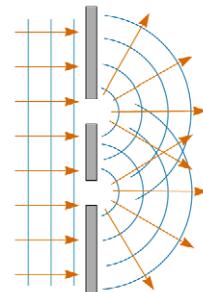
276

Difrakcija svetlosti

- Difrakcija** svetlosti je pojava "savijanja", skretanja svetlosti sa pravolinjskog puta na **malim otvorima** (pukotinama) – reda talasne dužine – ili **oštrim ivicama**, **bez promene materijalne sredine** kroz koju prolazi.



- Svetle i tamne pruge na zaklonu (mogu biti i obojene, ako je svetlost polihromatska) posledica su **interferencije** koja se dešava **nakon** prolaska svetlosti kroz pukotinu.
- Ako su na putu od izvora do zeklona svetlosni zraci **parallelni**, reč je o difrakciji **Fraunhoferovog** tipa.
- Ako su zraci konvergentni ili divergentni (dolaze pod nekim uglom), reč je o difrakciji **Frenelovog** tipa.

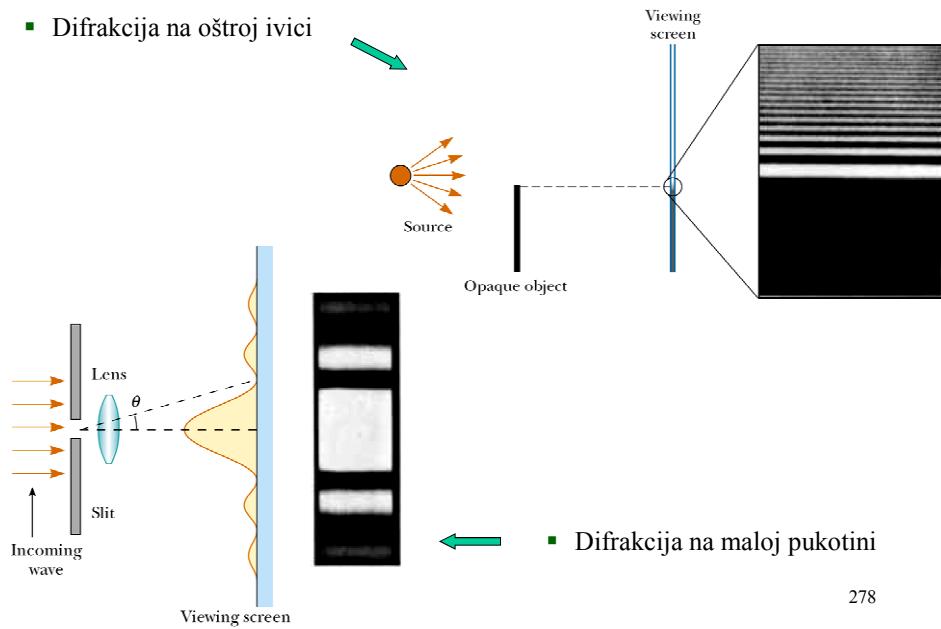


difrakcija zvučnih (mehaničkih) talasa

277

Difrakcija svetlosti

- Difrakcija na oštroj ivici



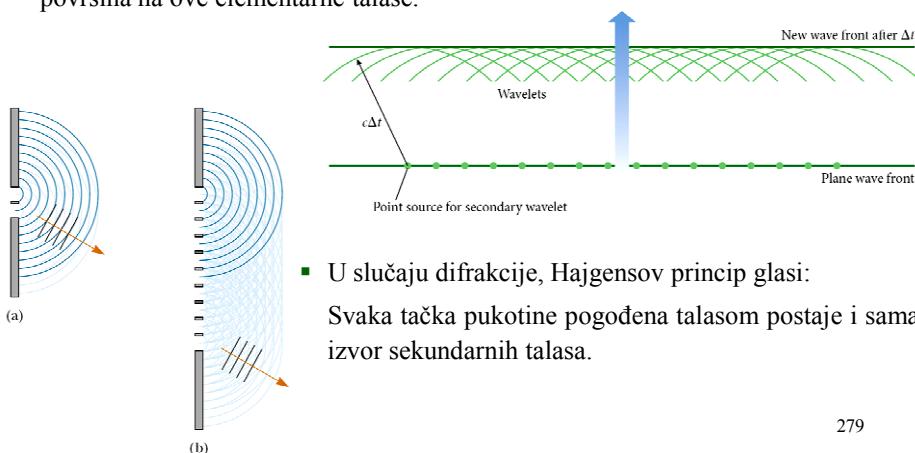
278

- Difrakcija na maloj pukotini

Difrakcija svetlosti

- Pojava difrakcije se može objasniti pomoću **Hajgensovog principa**:

Sve tačke talasnog fronta su novi (tačkasti) izvori elementarnih sekundarnih (sfenih) talasa, koji se dalje prostiru kroz materijalnu sredinu brzinom karakterističnom za nju. Posle izvesnog intervala vremena, novi talasni front je tangentna površina na ove elementarne talase.



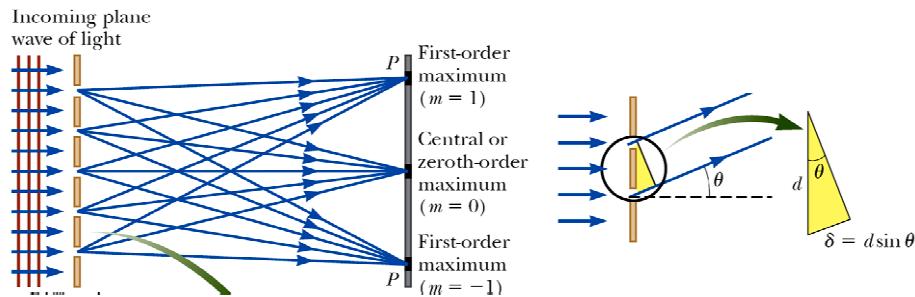
279

- U slučaju difrakcije, Hajgenov princip glasi:

Svaka tačka pukotine pogodjena talasom postaje i sama izvor sekundarnih talasa.

Difrakcija svetlosti na optičkoj rešetki

- Niz paralelnih pukotina na malom i jednakom međusobnom rastojanju predstavlja difrakcionu (optičku) rešetku.



- Svaka pukotina (prorez, mesto propuštanja svetlosti) difrakcione rešetke ponaša se kao novi izvor koherentne svetlosti, koja se u prostoru iza rešetke prostire u svim pravcima i **interferira** – stvara karakterističnu sliku na zaklonu, sastavljenu od niza osvetljenih i zatamnjениh mesta (difrakcioni maksimumi i minimumi).

280

Difrakcija svetlosti na optičkoj rešetki

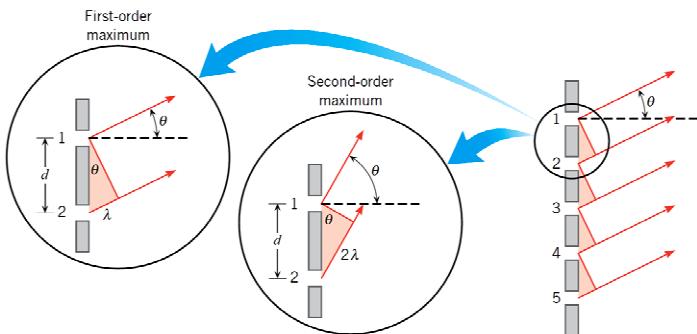
- Uslovi za dobijanje difrakcionih maksimuma i minimuma na zaklonu:

$$d \sin \theta = k\lambda \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$d \sin \theta = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

d – konstanta difrakcione rešetke

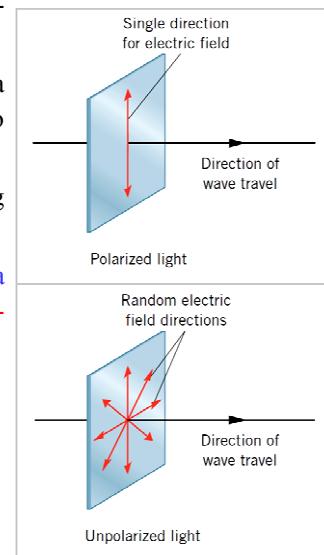
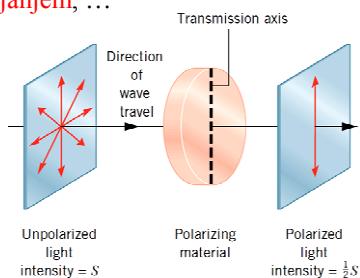
Primer za difrakcioni maksimum:



281

Polarizacija svetlosti

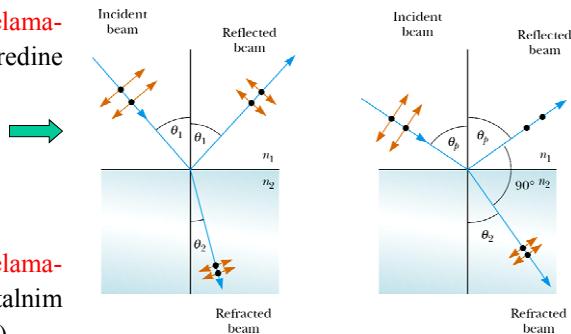
- Polarizacija je dokaz **transverzalne** prirode elektromagnetičnih talasa.
- Polarizovana svetlost** je okarakterisana oscilacijama vektora električnog polja (**svetlosni vektor**) u samo jednoj ravni.
- Ravan normalna na ravan oscilovanja svetlosnog vektora je **ravan polarizacije**.
- Polarizacija svetlosti se dobija u procesima: **odbijanja** (prelamanja), **dvojnog prelamanja**, **selektivne apsorpcije rasejanjem**, ...



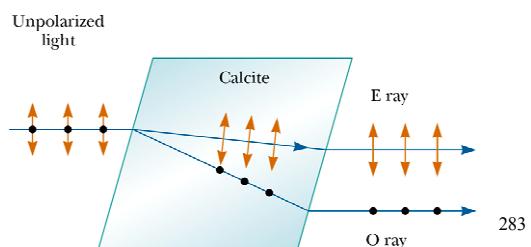
282

Polarizacija svetlosti

- Polarizacija pri **odbijanju (prelamanju)** svetlosti na granici dve sredine različitih indeksa prelamanja.



- Polarizacija pri **dvojnom prelamanju** svetlosti na nekim kristalnim supstancama (kalcit, kvarc, ...)

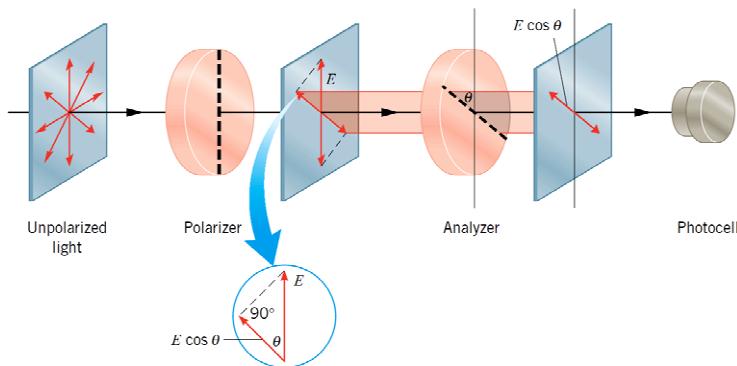


- Svetlost se razdvaja na **redovan** i **neredovan zrak** različitih brzina prostiranja (indeksa prelamanja) i oba su potpuno polarizovana.

Polarizacija svetlosti

- Optički sistem koji polarizuje svetlost je polarizator, a koji analizira svetlost analizator.
- Malusov zakon:** Intenzitet propuštene polarizovane svetlosti kroz analizator zavisi od ugla između osa polarizatora i analizatora:

$$I = I_0 \cos^2 \theta$$



284