

6. Ogib svjetlosti na pukotini i interferencija svjetlosti – 09.03.

1. Ključni pojmovi

Ogib svjetlosti, ogibni minimumi i maksimumi, interferencija svjetlosti, optička razlika putova, Fresnelova zrcala, Fresnelova biprizma

2. Teorijski uvod

Ogib na pukotini: Kada svjetlost valne dužine λ pada na pukotinu (vidi sliku 1) svaka točka u pukotini djeluje kao izvor novog sfernog vala. Na zastoru iza pukotine nastaje ogibna slika koja je rezultat interferencije svih novih valova. Raspodjela intenziteta svjetlosti na zastoru dan je izrazom

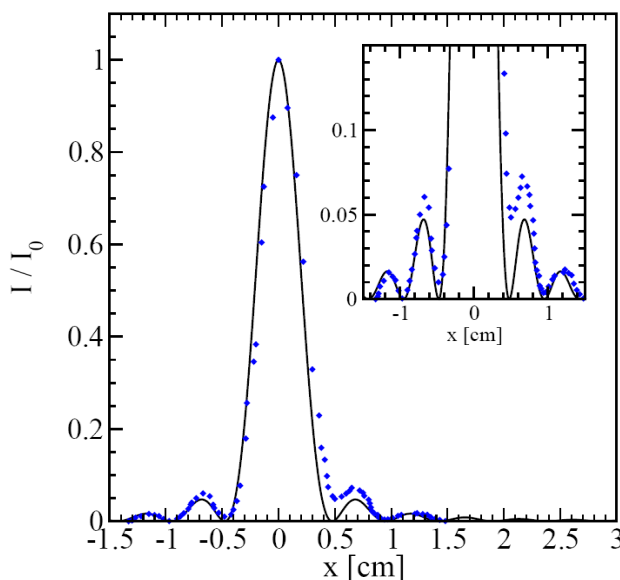
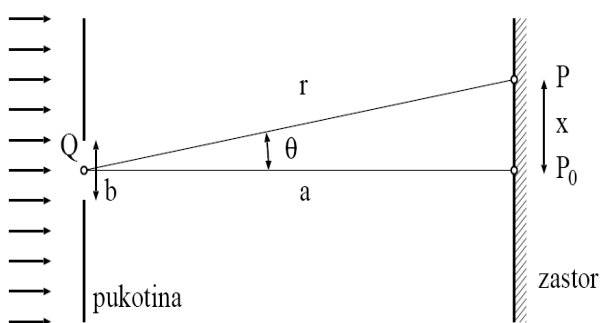
$$I(x) = I_0 \left(\frac{\sin(\alpha \sin \theta)}{\alpha \sin \theta} \right)^2, \quad (1)$$

gdje je $\alpha = \pi b / \lambda$. b je širina pukotine, a θ je kut upada na zastor. Kut upada određen je sa $\sin \theta = x / \sqrt{x^2 + a^2}$, gdje su $x = \overline{PP_0}$ i $a = \overline{QP_0}$ udaljenosti označene na slici. Ogibni minimumi nalaze se u točkama P_n^{\min} na zastoru danim uvjetom

$$\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta_n^{\min} = n\pi, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2)$$

Kada je udaljenosti između izvora i zastora velika u usporedbi sa skalom x , $a \gg x$, taj uvjet vodi na $x_n^{\min} \approx na\lambda/b$, što omogućava određivanje širine pukotine mjerenjem položaja dva uzastopna ogibna minimuma, za $n > 0$ ili za $n < 0$,

$$b = \frac{a\lambda}{x_{n+1}^{\min} - x_n^{\min}}. \quad (3)$$



Slika 1. Ogib na pukotini

Slika 2. Raspodjela intenziteta svjetlosti duž ogibne slike na pukotini

Ogibni maksimumi određeni su relacijom

$$\tan \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta_n^{\max} = \frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta_n^{\max}. \quad (4)$$

Centralni maksimum odgovara kutu upada $\theta_0^{\max} = 0$, a maksimumi višeg reda su približno na pozicijama danim sa $\theta_n^{\max} \approx (2n+1)\pi/2, n \neq 0$, tj.

$$\frac{\pi b}{\lambda} \sin \theta_n^{\max} \approx \frac{2n+1}{2} \pi, \quad n = \pm 1, \pm 2, \dots \quad (5)$$

Širinu pukotine možemo odrediti mjereći položaj n -tog ogibnog maksimuma relativno prema centralnom maksimumu

$$b = \frac{(2n+1)\lambda}{2 \sin \theta_n^{\max}}. \quad (6)$$

Konačno, najprecizniji način određivanja širine pukotine je iz relacije $\alpha = \pi b/\lambda$, gdje je parametar α u funkciji (1) određen nelinearnom regresijom (vidi zadatke 1 i 2).

Interferencija svjetlosti: Kada se koherentna svjetlost valne dužine λ širi iz dva izvora kroz prostor dolazi do interferencije. Ukupni intenzitet svjetlosti u točki P koju promatramo dan je izrazom

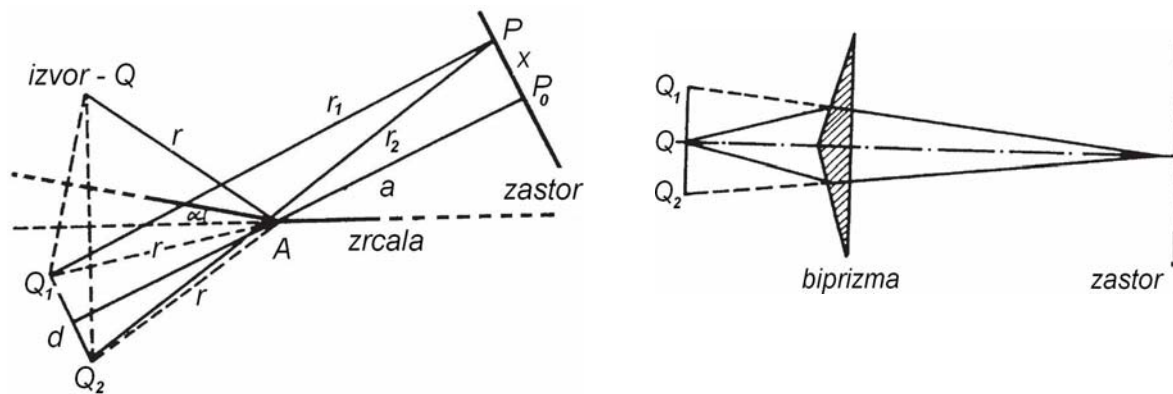
$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \delta, \quad (7)$$

gdje su I_1 i I_2 pojedinačni intenziteti dvaju izvora u toj točki, a $\delta = \delta_1 - \delta_2$ je razlika u fazi pripadnih elektromagnetskih valova. Ukupni intenzitet (7) ima maksimume u slučaju kada razlika u fazi δ odgovara konstruktivnoj interferenciji dva vala, te minimume za destruktivnu interferenciju.

Pomoću lasera i Fresnelovih zrcala, ili Fresnelove biprizme, realiziraju se dva koherentna izvora svjetlosti (virtualni izvori Q_1 i Q_2 prikazani na slikama 3 i 4). Za standardni eksperimentalni postav ($a \gg x$; a je udaljenost virtualnih izvora od zastora, a x je udaljenost točke P na zastoru u kojoj promatramo interferenciju od centralnog maksimuma (točka P_0)), razlika optičkih putova dviju zraka Δ dana je relacijom

$$\frac{\Delta}{d} = \frac{x}{\sqrt{x^2 + a^2}} \approx \frac{x}{a} \quad (8)$$

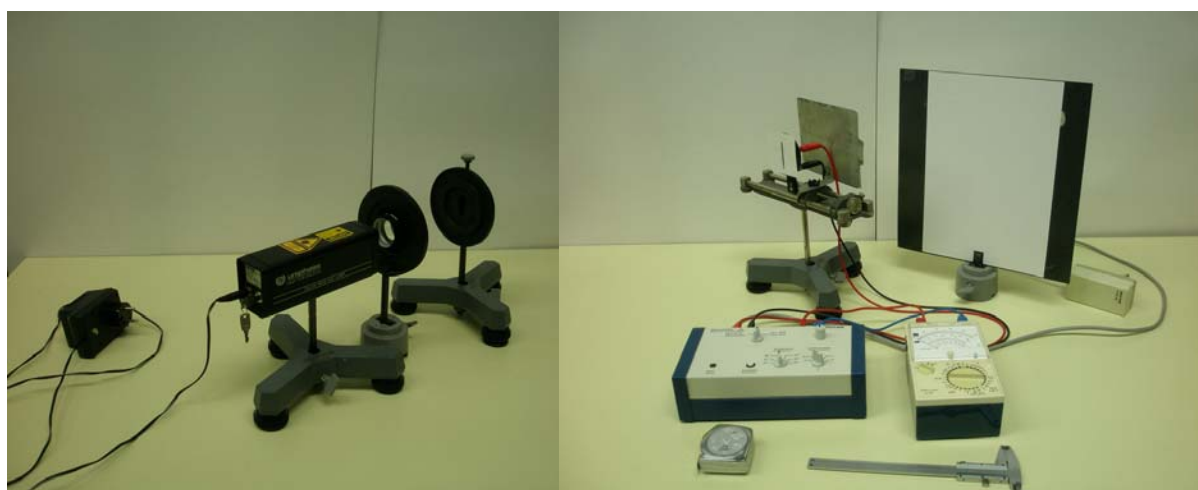
pri čemu je pripadna razlika u fazi $\delta = 2\pi \Delta/\lambda$. Prema tome, interferencijski maksimumi na zastoru nastaju za $\Delta_n^{\max} = n\lambda$, tj. na pozicijama $x_n^{\max} = n\lambda a/d, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, a minimumi za $\Delta_n^{\min} = (n+1/2)\lambda$, odnosno u točkama $x_n^{\min} = (n+1/2)\lambda a/d, n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, gdje je d udaljenost između virtualnih izvora Q_1 i Q_2 .



Slike 3 i 4. Interferencija svjetlosti pomoću Fresnelovih zrcala i Fresnelove biprizme - geometrija postava

3. Mjerni uređaj i mjerenje

UPOZORENJE: Ne gledati izravno u laserski snop svjetlosti!



Slike 5 i 6. Ogib svjetlosti na pukotini (gore) i interferencija svjetlosti (dolje)

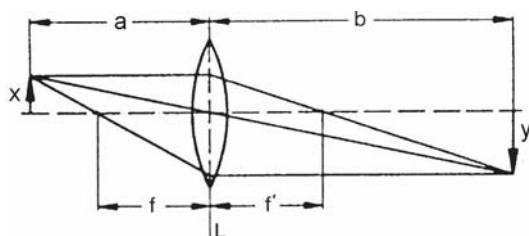
Ogib svjetlosti: Divergentna leća žarišne daljine $f = -5\text{ cm}$ postavi se ispred lasera. Razmak između leće i pukotine neka je 7.5 cm . Raspodjela intenziteta uzduž ogibne slike u smjeru okomitom na pukotinu mjeri se pomoću fotočelija, koja se može pomicati pomoću vijka po optičkoj klupici s milimetarskom skalom. Fotočelija je udaljena od pukotine 2 do 3 m, a prekrivena je zaslonom s vrlo uskom pukotinom. Ostvari se ogibna slika na jednoj polovici zaslona. Fotočelija se pomiče uzduž milimetarske skale i mjeri se fotoelektrični napon. Potrebno je također odrediti i „tamnu“ vrijednost napona, tj. napon kada nema laserskog snopa. Tamna vrijednost se odbije od izmjenjenog napona. Napon se mjeri pomoću vrlo osjetljivog voltmetra koji ima „10 mV“ skalu, a može se koristiti i pojačalo s pojačanjem ne većim od 10^2 (primijetite da se pomoću dugmeta „0“ na pojačalu „tamna“ vrijednost napona može reducirati na nulu). Širina pukotine se podesi tako da je moguće izmjeriti varijacije napona u području centralnog maksimuma i dva sporedna maksimuma s lijeve i dva s desne strane od centralnog maksimuma. U području centralnog maksimuma mjerite za pomake od 1 mm (barem 15 točaka), a u području preostalih maksimuma za manje pomake (barem 2 puta po 10 točaka). Pri mjerenju u području sporednih maksimuma, pomoću vijka pronađite što je moguće preciznije položaje minimuma i maksimuma, a položaje očitajte pomoću pomične mjerke s preciznošću od 0.1 mm.

Interferencija svjetlosti: Na optičku klupu postave se laser, leća ($f = +2\text{ cm}$) i Fresnelova zrcala, razmaknuti za približno 20 cm. Milimetarski papir na zidu udaljenom od zrcala 2 do 3 m služi kao zastor. Laserskim snopom podjednako se osvijetle oba zrcala. Ako zrcala međusobno zatvaraju neki (mali) kut, na zastoru se vide dva odraza razdvojena tamnim područjem. Pomoću vijaka zakretati pokretno zrcalo, tako da se dva odraza prekriju, tj. snopovi svjetlosti iz dva izvora dođu u interferenciju. Pojavljuju se interferentne pruge. Eksperimentalni postav za Fresnelovu biprizmu je sličan - umjesto Fresnelovih zrcala postavi se stalak s Fresnelovom biprizmom. Laserski snop se usmjeri na srednji rub prizme. U oba slučaja zabilježe se pruge interferencije na mm papiru te se izmjere udaljenosti x_n^{\max} ili x_n^{\min} te udaljenost zrcala/biprizme od zastora

Za određivanje udaljenosti d , u oba slučaja, koristimo drugu leću, žarišne daljine $f = +30\text{ cm}$, pomaknutu od zrcala/biprizme za približno 20 cm uzduž optičke osi. Žarišna daljina leće f , udaljenost predmeta od leće a , udaljenost slike od leće b te veličine predmeta i slike, x i y , (slika 7) povezani su relacijama

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{b}, \quad \frac{a}{b} = \frac{x}{y}. \quad (9)$$

Virtualni izvori Q_1 i Q_2 definiraju predmet za tu leću. Visina predmeta je $x = d$. Na zastoru se postigne realna slika. Izmjere se udaljenosti b i y . Koristeći poznatu vrijednost žarišne daljine i relacije (9) izračuna se d te udaljenost virtualnih izvora od zrcala/biprizme.



Slika 7. Određivanje veličine predmeta pomoću konvergentne leće

4. Zadaci

1. Grupa A: Nađite raspodjelu intenziteta svjetlosti uzduž ogibne slike nastale na pukotini (slika 2). Koristeći programski paket *Mathematica* odredite parametar α u izrazu (1); (a) grubom procjenom parametra, i (b) koristeći programski paket za nelinearnu regresiju. Valna dužina svjetlosti je $\lambda = 632.8$ nm. Izračunajte širinu pukotine b .

Grupa B: Odrediti valnu dužinu svjetlosti lasera pomoću interferencije s Fresnelovim zrcalima.

2. Grupa A: Odrediti valnu dužinu svjetlosti lasera pomoću interferencije s Fresnelovom biprizmom.

Grupa B: Nađite raspodjelu intenziteta svjetlosti uzduž ogibne slike nastale na pukotini (slika 2). Koristeći programski paket *Mathematica* odredite parametar α u izrazu (1); (a) grubom procjenom parametra, i (b) koristeći programski paket za nelinearnu regresiju. Valna dužina svjetlosti je $\lambda = 632.8$ nm. Izračunajte širinu pukotine b .

Obrada podataka u programskom paketu *Mathematica* uključuje (vidi pomoćni obrazac *Ogib_naredbe+komentari*):

(a1) Normirajte izmjereni spektar na jedinicu.

(a2) Variranjem parametra α odredite njegovu vrijednost za koju se funkcija $I(x)$ dobro slaže s izmjerenim podacima.

(b1) Odredite parametar α nelinearnom regresijom koristeći funkciju $I(x)$.

(b2) Odredite parametre α i β nelinearnom regresijom koristeći funkciju $I(x) \left[1 + \beta^2 (x - x_0)^2 \right]$, gdje je x_0 položaj centra centralnog maksimuma.