

Fotorefraktivni oscilatori sa jednim upadnim svjetlosnim zrakom

Zoran Ljuboje,
 Univerzitet u Istočnom Sarajevu
 Elektrotehnički fakultet
 Istočno Sarajevo, Republika Srpska
 zoran.ljuboje@etf.unssa.rs.ba

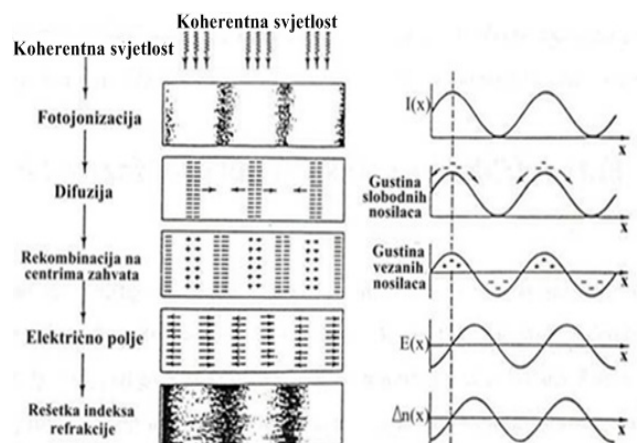
Sadržaj — Rad fotorefraktivnih oscilatora se zasniva na fotorefraktivnom efektu. Fotorefraktivni efekat predstavlja periodičnu promjenu indeksa prelamanja neke optičke sredine pod dejstvom koherentne svjetlosti. Kod ovih oscilatora pojavljuje se fazno konjugovani zrak svetlosti. Metoda difrakcionog dejstva objašnjava: osnovne karakteristike fotorefraktivnih konjugatora, postojanje praga oscilovanja, pronalaženje stabilne tačke rada, itd. Ovo je analizirano kod prstenastog oscilatora, linearnog i semilinearnog ogledala.

Ključne riječi - fotorefraktivni oscilatori, metoda difrakcionog dejstva, prstenasti oscilator, linearno ogledalo, semilinearno ogledalo.

I UVOD

Fotorefraktivni efekat se zasniva na četverotalasnom miješanju laserskih zraka svjetlosti (4TM) u nekim kristalima [1]. Fotorefraktivni efekat je efekat periodične promjene indeksa prelamanja neke optičke sredine pod dejstvom svjetlosti. Pri osvjetljavanju nekih kristala koherentnom svjetlošću, stvaraju se nosioci slobodnog naelektrisanja prelaskom elektrona donorskih atoma na provodnu zonu. Broj prelazaka elektrona je proporcionalan broju donorskih atoma i intenzitetu svjetlosti. Nosioci difunduju do mjesta sa nižim intenzitetom svjetlosti a na njihovim mjestima ostaju naelektrisana suprotnog predznaka, tzv. šupljine. Kao posljedica ove preraspodjele naelektrisanja dolazi do pojave unutrašnjeg električnog polja, tj. dolazi do pojave promjene lokalnog indeksa prelamanja, odnosno u kristalu se formira difrakciona rešetka na kojoj se mogu rasijavati dodatni upadni zraci (slika 1).

Na slici je $I(x)$ raspodjela intenziteta svjetlosti u kristalu, $E(x)$ je lokalno električno polje a Δn je prostorna raspodjela indeksa prelamanja. Interesantan efekat koji izaziva svjetlost u fotorefraktivnoj sredini je optička fazna konjugacija (FK). U ovoj situaciji se omogućuje istovremeno obrtanje faze i smjera prostiranja svjetlosnog talasa. Za razliku od refleksije kod običnog ogledala reflektovani FK zrak vraća se istim putem kojim upada na kristal. FK talas je interesantan zbog velike mogućnosti praktične primjene.



Slika 1. Pojava fotorefraktivnog efekta pod uticajem periodične promjene intenziteta upadne svjetlosti u pravcu prostorne coordinate.

Osnovne jednačine koje opisuju proces su [2]:

$$\frac{dA_1}{dx} = QA_4 - \alpha A_1, \quad \frac{dA_4^*}{dx} = -QA_1^* - \alpha A_4^*, \quad (1)$$

$$\frac{dA_2^*}{dx} = -QA_3^* + \alpha A_2^*, \quad \frac{dA_3}{dx} = QA_2 + \alpha A_3. \quad (2)$$

U navedenim jednačinama, sa A su označene amplitude talasa, α je koeficijent apsorpcije, Q predstavlja tzv. amplitudu transmitivne difrakcione rešetke, a znak "zvjezdica" označava konjugovano kompleksne veličine.

Amplitudu transmitivne difrakcione rešetke zadovoljava sljedeću jednačinu:

$$\tau \frac{dQ}{dt} + \varepsilon Q = \frac{\gamma}{I} (A_1 A_4^* + A_2^* A_3), \quad (3)$$

gdje je τ vrijeme relaksacije, I je ukupni intenzitet talasa $I = \sum |A_i|^2$, dok su ε i γ parametri koji zavise od električnih polja koja se formiraju u kristalu [3]. Rješavanje

ovih jednačina se izvodi numerički i može dovesti do numeričkih nestabilnosti čime se ovdje nećemo baviti [4][5].

I FOTOREFRAKTIVNI OSCILATORI

Najznačajniji uređaji u fotorefraktivnoj optici su fotorefraktivni oscilatori. Fotorefraktivni oscilatori se formiraju kada se fotorefraktivni kristali osvijetljavaju sa jednim ili dva laserska zraka. Pri tome se u kristalu formira difrakciona rešetka na kojoj dolazi do difrakcije laserskih snopova. Najinteresantnije su konfiguracije oscilatora koje stvaraju FK zrake upadnih signala.

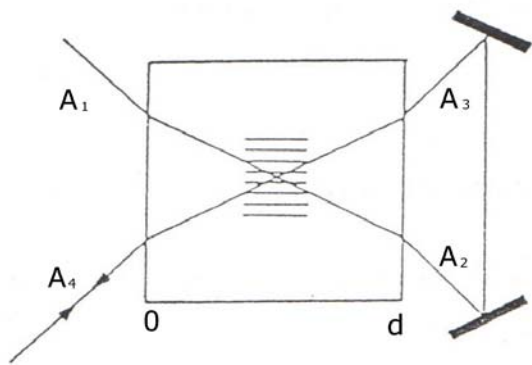
Ako postoji samo jedan upadni zrak, takva konfiguracija predstavlja samopobuđeno ogledalo, a ako postoje dva zraka radi se o uzajamno pobuđenom ogledalu. Eksperimentalno je relativno jednostavno realizovati samopobuđeni oscilator.

Fotorefraktivni oscilatori sa jednim ulaznim zrakom su: linearni, semilinearni, prstenasti i "cat" oscilator. Cat oscilator ima dva unutrašnja interferencionna regiona, a ostali po jedan. Kod ostalih se koriste vanjska ogledala, a kod cat oscilatora unutrašnja totalna refleksija.

U ovom radu analiziraćemo prstenasti, linearni i semilinearni, fotorefraktivni oscilator

II PRSTENASTI OSCILATOR

Prstenasti oscilator ima mogućnost samostartovanja na pragu oscilovanja. Ovaj oscilator ima dva obična ogledala izvan kristala i jedan interakcioni region u kristalu (slika 2.).



Slika 2. Fotorefraktivno ogledalo-prsten.

Za prstenasti oscilator prag je relativno nizak [6] i dat je formulom:

$$\gamma_{th}d = \frac{M+1}{M-1} \ln\left(\frac{M+1}{2M}\right), \quad (4)$$

gdje je γ_{th} konstanta spreznja, d debljina kristala a M proizvod reflektivnosti običnih ogledala od kojih se sastoji oscilator.

Analiza rada ovog oscilatora može se efikasnije objasniti metodom difrakcionog dejstva [7]. Na osnovu ove metode veza laseskih zraka na ulazu kristala (0) i na izlazu (d) date su izrazima:

$$\begin{bmatrix} A_{1d} \\ A_{4d} \end{bmatrix} = \tau(u) \begin{bmatrix} A_{10} \\ A_{40} \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} A_{30} \\ A_{20} \end{bmatrix} = \tau(u) \begin{bmatrix} A_{3d} \\ A_{2d} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

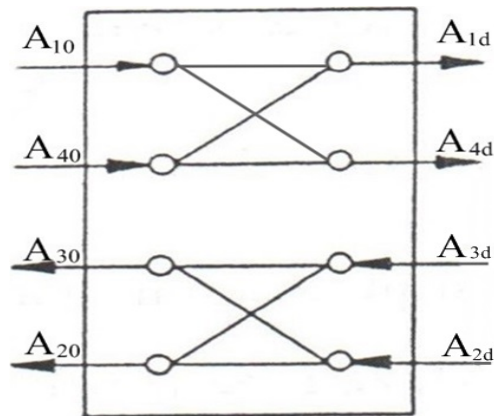
gdje je matrica $\tau(u)$:

$$\tau(u) = \begin{bmatrix} \cos u & -\sin u \\ \sin u & \cos u \end{bmatrix} \quad (6)$$

pri čemu je u difrakciona akcija i računa se iz izraza:

$$\tan u = \frac{A_{10}A_{40}^* + A_{2d}^*A_{3d}}{aI \coth(\gamma d / 2) + I_{40} - I_{3d} + I_{2d} - I_{10}}, \quad (7)$$

gdje je a konstanta koja se računa iz graničnih uslova, γ je jačina spreznja u kristalu, d je debljina kristala, a sa I su označeni intenziteti zraka svjetlosti. Na osnovu ove metode, može se konstruisati odgovarajuće fotorefraktivno kolo koje u opštem slučaju odgovara procesu 4TM (slika 3).



Slika 3. Fotorefraktivno kolo koje odgovara 4TM procesu.

Primjenjujući izraze (5) i (6) za prstenasti oscilator je $A_{10} = 0$ pa slijedi da probni signal $P = A_{40}$ između ostalog generiše izlazni signal:

$$A_{30} = -\sqrt{M} A_{40} \sin 2u, \quad (8)$$

gdje je M proizvod reflektivnosti vanjskih ogledala.

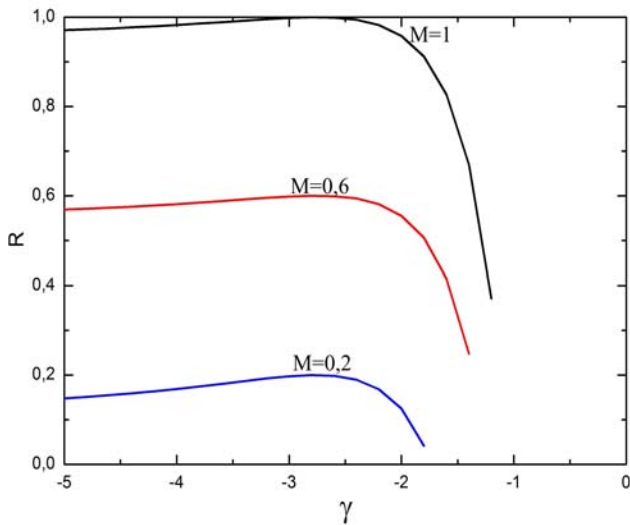
Reflektivnost zraka kod ovog oscilatora je data izrazom:

$$R = \frac{I_{30}}{I_{40}} = 4M(1 - \cos^2 u) \cos^2 u, \quad (9)$$

dok se akcija akcija se iz (7) i data je izrazom:

$$\cos^2 u = \frac{M - 1 - (1 + M)a \coth(\gamma d / 2)}{4M} \quad (10)$$

Na slici 4 su predstavljena rješenja koja slijede iz (9) i (10) koja definišu zavisnost refleksije oscilatora u funkciji parametra sprezanja, pri čemu je M parameter i $d = 1$.



Slika 4. Refleksija oscilatora u funkciji od konstante sprezanja

Na oscilatornom pragu je $a = \frac{1 - M}{1 + M}$

Prag se računa iz (10) (za $u \rightarrow 0$) pa slijedi:

$$\tanh(a\gamma_{th}d / 2) = \frac{M - 1}{3M + 1} \quad (11)$$

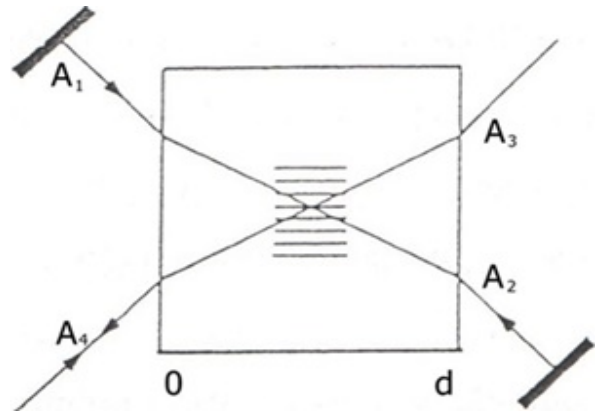
što je ekvivalentno izrazu (4).

Npr. prag sprezanja ima minimalnu vrijednost $\gamma_{th}d \rightarrow -1$, kada $M \rightarrow 1$. Izraz (11) potvrđuje i rješenja za prag oscilovanja koja su predstavljena na slici 4 za različito M .

III LINEARNO OGLEDALO

Linearno ogledalo je takođe, ogledalo sa jednim upadnim zrakom, jednim ineteracionim regionom i ima mogućnost

samostartovanja na pragu. Ovo ogledalo ima i dva vanjska ogledala (slika 5).



Slika 5. Fotorefraktivno linearno ogledalo.

Ponovićemo procedure kao za prethodni slučaj [8]. Upadni signal $P = A_{40}$ i zrak A_{10} generišu zrake na izlazu. Zrak A_{1d} preko vanjskog ogledala koeficijenta refleksije M_2 predstavlja ulaz $A_{2d} = \sqrt{M_2} A_{1d}$, dok je $A_{3d} = 0$. Iz (5) i (6) između ostalog, slijedi:

$$A_{30} = -\sqrt{M_2} A_{1d} \sin u, \quad A_{20} = \sqrt{M_2} A_{1d} \cos u \quad (12)$$

Zrak A_{20} se preko vanjskog ogledala refleksije M_1 vraća, tj. $A_{10} = \sqrt{M_1} A_{20}$ i tako se proces ponavlja.

Iz proračuna slijedi da je minimalna vrijednost praga sprezanja:

$$\gamma_{th}d = \ln \sqrt{M_1 M_2} \quad (13)$$

Ovaj rezultat je identičan rezultatu u radu [6] gdje je dobijen na potuno različit način.

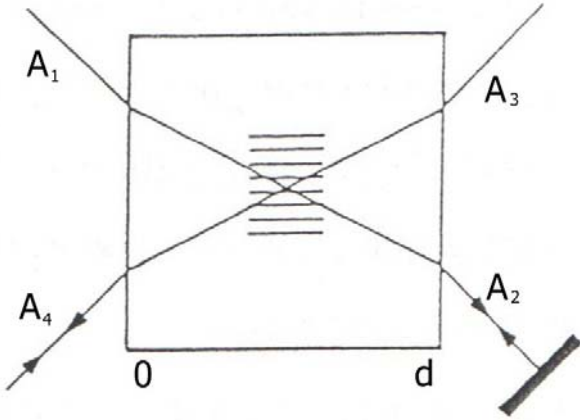
Očigledno je da prag teži nuli $\gamma_{th}d \rightarrow 0$, kada $M_1 M_2 \rightarrow 1$.

IV SEMILINEARNO OGLEDALO

Semilinearno ogledalo je takođe, konjugator sa jednim upadnim zrakom i jednom interakcionim regionom. Ima jedno vanjsko ogledalo i nema mogućnost samostartovanja (slika 6). Upadni signal $P = A_{40}$ generiše zrake i na osnovu (5) i (6) dobijamo zrake na izlazu

$$A_{1d} = -A_{40} \sin u, \quad A_{4d} = A_{40} \cos u, \quad (14)$$

pri čemu je $A_{10} = 0$.



Slika 6. Fotorefraktivno semilinearno ogledalo.

Zrak A_{1d} preko vanjskog ogledala koeficijenta refleksije M predstavlja ulaz $A_{2d} = \sqrt{M} A_{1d}$, dok je $A_{3d} = 0$.

Primjenjujući opet relacije (5) i (6) slijedi:

$$A_{30} = -\sqrt{M} A_{1d} \sin u, \quad A_{20} = -\sqrt{M} A_{1d} \cos u, \quad (15)$$

Sredjivanjem iz izraza (7) za ovaj slučaj slijedi:

$$\tanh(\gamma d/2) + a = 0 \quad (16)$$

$$\text{ili } \gamma d = \frac{1}{a} \ln \frac{1-a}{1+a}. \quad (17)$$

Za refleksiju ovog ogledala $R = I_{30} / I_{40}$ se dobija:

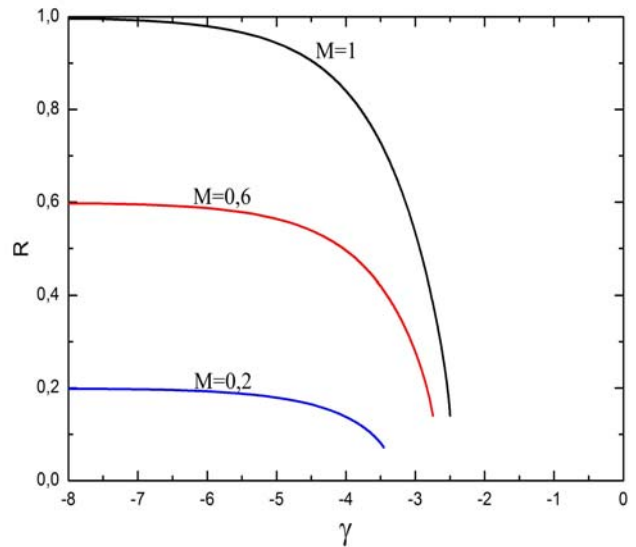
$$R = \left(\frac{\sqrt{M}(1+a^2) + 2[a^2(M+1)-1]^{1/2}}{M(1-a^2) + 4} \right)^2. \quad (18)$$

Na osnovu (17) i (18) na slici 7 je predstavljeno $R = f(\gamma)$. Minimalni prag refleksivnosti slijedi iz prethodne jednačine za

$$a^2 = \frac{1}{M+1}, \quad (19)$$

odnosno:

$$R_{th} = \frac{M}{(M+2)^2}. \quad (20)$$



Slika 7. Refleksija oscilatora u funkciji od konstante sprezanja

Prag jačine sprezanja slijedi iz (17) i (19):

$$\gamma_{th} d = \sqrt{1+M} \ln \left(\frac{\sqrt{1+M}-1}{\sqrt{1+M}+1} \right) \quad (21)$$

Ovaj rezultat je identičan rezultatu u radu [6] gdje je dobijen na potuno različit način. Takođe, za slučaj maksimalne refleksivnosti $M \rightarrow 1$, $\gamma_{th} \rightarrow -2.49$. I u ovom slučaju rezultati iz izraza (21) potvrđuju se rješenjima predstavljenim na slici 7.

IV ZAKLJUČAK

U radu su analizirani fotorefraktivni oscilatori sa jednim upadnim zrakom. Funkcionisanje ovih oscilatora se zasniva na fotorefraktivnom efektu i kod njih se pojavljuje faznokonjugovani zrak svjetlosti pa se zovu i fazkokonjugovana ogledala. Primjenjena je tzv. metoda difrakcionog dejstva pomoću koje se objašnjava postojanje praga oscilovanja, pronalaženje stabilne tačke rada, i refleksivnost. Ovo je analizirano kod prstenastog oscilatora, linearnog i semilinearnog ogledala. Vršen je analitički proračun praga oscilovanja, a takođe grafički je predstavljena refleksivnost navedenih oscilatora,

LITERATURA

- [1] P. Gunter and J.P. Huignard (eds), *Photorefractive Materials and Their Applications*, I and II (Springer, Berlin, 1988, 1989)
- [2] W. Krolikowski, K. D. Shaw, M.Cronin-Golomb and A. Bledowski, *J. Opt.Soc.Am.B* 6 (1989); W. Krolikowski, M.R. Belić, M.Cronin-Golomb and A. Bledowski, *J. Opt.Soc.Am.B* 7 (1990).
- [3] N. V. Kukhtarev, V. Markov and S. Odulov, "Transient energy transfer during hologram formation in LiNbO₃ in external electric field", *Opt. Commun.* 23 338 (1977).
- [4] M. Belić and Z. Ljuboje, "Chaos in phase conjugation: physical vs numerical instabilities", *Opt. Quant. Electron.* 24 745 (1992)
- [5] Z. Ljuboje "Numerički haos pri rješavanju nekih problema kod fotorefraktivnog efekta", INFOTEH-2014.
- [6] M. C. Golomb, B. Fischer, J.O. White and A. Yariv, "Theori and aplication of four-wave mixing in photorefractive media" *IEEE J. Qant. Electron.* QE-20, 12 (1984).
- [7] M. S. Petrović, M. R. Belić, and F. Kaiser, "Photorefractive circuitry and optical transistors ", *Opt. Commun.* 121 (1995).
- [8] Z. Ljuboje, " *Numerički haos u fotorefraktivnoj optici*". neobjavljeno.

ABSTRACT

The operation of photorefractive oscillators is based on the photorefractive effect. The photorefractive effect presents a periodical change of the refractive index of an optical environment under the influence of a coherent light. A phase-conjugated light beam occurs in these oscillators. The diffraction effect method explains: the basic characteristics of photorefractive conjugators, existance of the oscillation threshold, finding of a stable point of operation etc. All this is analysed on a ring oscillator, linear and semilinear mirror.

Photorefractive Oscillators with One Incident Light Beam

Zoran Ljuboje,
University uof East Sarajevo
Faculty of Electrical Engineering
East Sarajevo, Republika Srpska
zoran.ljuboje@etf.unssa.rs.ba,