

# FOTONIKA

Delovna verzija

Martin ČOPIČ  
Andrej PETELIN  
Mojca VILFAN

Recenzenti: \*\*\*

Lektor: \*\*\*

Risbe in diagrami: Andrej Petelin in Mojca Vilfan

Naslovne fotografije poglavij: Mojca Vilfan

©Kopiranje in razmnoževanje besedila ali njegovih delov ter slik je dovoljeno samo z odobritvijo avtorjev knjige.

LJUBLJANA, \*\*\* 2016

# Kazalo

<b>1</b>	<b>Elektromagnetno valovanje</b>	<b>9</b>
1.1	Maxwellove enačbe	9
1.2	Valovna enačba in Poyntingov vektor	10
1.3	Monokromatski elektromagnetični val	11
1.4	Ravni val	12
1.5	Polarizacija EM valovanja	13
1.6	Lom in odboj EM valovanja	15
1.7	Uklon svetlobe	17
1.8	EM valovanje v anizotropnih snoveh	21
<b>2</b>	<b>Koherenca</b>	<b>25</b>
2.1	Youngov poskus	25
2.2	Koherenca navadnih svetil	26
2.3	Časovna koherenca	27
2.4	Zveza med avtokorelacijsko funkcijo in spektrom	29
2.5	Prostorska koherenca	32
<b>3</b>	<b>Koherentni snopi svetlobe</b>	<b>37</b>
3.1	Omejen snop svetlobe	37
3.2	Obosna valovna enačba	38
3.3	Osnovni Gaussov snop	39
3.4	Snopi višjega reda	43
3.5	Besselov snop	45
3.6	Transformacije snopov z lečami	46
3.7	Matrične (ABCD) preslikave v geometrijski optiki	49
3.8	Linearne racionalne transformacije kompleksnega krivinskega radija	51
<b>4</b>	<b>Optični resonatorji</b>	<b>53</b>
4.1	Odprti resonatorji	53
4.2	Gaussovi snopi v resonatorjih	56
4.3	Stabilnostni kriterij z ABCD formalizmom	59

4.4	Resonančne frekvence	60
4.5	Izgube v resonatorjih	62
4.6	*Obravnava z uklonskim integralom	64
<b>5</b>	<b>Interakcija svetlobe s snovjo .....</b>	<b>67</b>
5.1	Kvantizacija elektromagnetskega polja	67
5.2	Sevanje črnega telesa	69
5.3	Absorpcija, spontano in stimulirano sevanje	70
5.4	Absorpcijski koeficient	73
5.5	Nasičenje absorpcije	74
5.6	Optično ojačevanje	76
5.7	Optično črpanje trinivojskega sistema	77
5.8	Homogena in nehomogena razširitev spektralne črte	79
5.9	*Nasičenje nehomogeno razširjene absorpcijske črte	80
5.10	Izpeljava verjetnosti za prehod	82
<b>6</b>	<b>Laser .....</b>	<b>85</b>
6.1	Zasedbene enačbe	85
6.2	Spektralna širina enega laserskega nihanja	85
6.3	Primerjava laserjev in običajnih svetil	85
6.4	Mnogofrekvenčni laser	85
6.5	Relaksacijske oscilacije	85
6.6	Delovanje v sunkih s preklopom dobrote	85
6.7	Uklepanje faz	85
6.8	Stabilizacija frekvence laserja na nasičeno absorpcijo	85
6.9	Absolutna meritev frekvence laserja in definicija metra	85
<b>7</b>	<b>Primeri laserjev .....</b>	<b>86</b>
7.1	Nd:YAG laser	86
7.2	He-Ne laser	86
7.3	Argonski ionski laser	86
7.4	Laser na ogljikov dioksid	86
7.5	Ekscimerski laser	86
7.6	Laserji na organska barvila	86
7.7	Titan-safirni laser	86
7.8	Polvodniški laser	86

<b>8</b>	<b>Nelinearna optika .....</b>	<b>87</b>
8.1	Nelinearna susceptibilnost	87
8.2	Nelinearni optični pojavi drugega reda	89
8.3	Optično podvajanje frekvenc	91
8.4	Frekvenčno podvajanje Gaussovih snopov	96
8.5	*Račun podvajanja Gaussovih snopov	97
8.6	Optično parametrično ojačevanje	99
8.7	Optično usmerjanje in teraherčno valovanje	103
8.8	Nelinearni pojavi tretjega reda	104
8.9	Optični Kerrov pojav	104
8.10	Samozbiranje	106
8.11	*Izpeljava krajevnih solitonov	108
8.12	Optični solitoni	111
8.13	*Izpeljava optičnih solitonov	112
8.14	Optična fazna konjugacija	114
8.15	*Izpeljava optične fazne konjugacije	116
<b>9</b>	<b>Modulacija svetlobe .....</b>	<b>119</b>
9.1	Elektro-optični pojav	119
9.2	Longitudinalna modulacija	122
9.3	Transverzalna modulacija	124
9.4	Amplitudna modulacija	126
9.5	Fazna in frekvenčna modulacija	127
9.6	Elasto-optični in akusto-optični pojav	129
9.7	Uklon svetlobe na zvočnem valovanju	131
9.8	*Račun akusto-optičnega pojava	134
9.9	Modulacija s tekočimi kristali	138
9.10	Dodatek	141
<b>10</b>	<b>Optična vlakna .....</b>	<b>143</b>
10.1	Planparalelni vodnik	144
10.2	Cilindrično vlakno	146
10.3	Cilindrično vlakno s paraboličnim profilom lomnega količnika	146
10.4	Sprememba lomnega količnika vlakna	147
10.5	Izgube v optičnih vlaknih	148
10.6	Disperzija	149
10.7	Potovanje sunka po enorodovnem vlaknu	151

<b>10.8</b>	<b>Sklopitev v optična vlakna</b>	<b>154</b>
<b>11</b>	<b>Detektorji svetlobe . . . . .</b>	<b>155</b>
11.1	Kalorimetrični detektorji	155
11.2	Fotoprevodni detektorji	155
11.3	PN in PiN fotodiode	155
11.4	Plazovne fotodiode	155
11.5	Šum pri optični detekciji	155



# Predgovor

Fotonika je veda o svetlobi. Obsega izredno široka področja nastanka svetlobe in svetlobnih virov, uporabe svetlobe v različne namene, širjenja optičnih signalov in zaznavanja svetlobe. V zadnjih desetletih je zato fotonika doživela izreden razcvet v raziskavah in tehnološki uporabi.

V pričajoči knjigi bomo obravnavali osnove fotonike. Po kratki ponovitvi splošne optike bomo spoznali delovanje laserjev in lastnosti laserske svetlobe, nadaljevali z nelinearnimi optičnimi pojavi in modulacijo svetlobe ter zaključili s prenosom in detekcijo laserskih signalov. Učbenik je zato primeren predvsem za študente II. stopnje fizike, ki že imajo znanje optike in zahtevanih matematičnih prijemov, ga pa priporočamo vsakemu, ki ga področje fotonike zanima. Bralcu v razmislek smo dodali nekaj preprostih nalog, zahtevnejša podpoglavlja pa so označena z zvezdico.

Prvotno gradivo za učbenik je nastalo po zapiskih za predavanja pri predmetu Elektrooptika. Gradivo smo dopolnili, posodobili in prilagodili obravnavani snovi pri predmetih Fotonika in Fizika laserjev. Za pomoč pri pripravi se najlepše zahvaljujemo prof. dr. Ireni Drevenšek Olenik  
\*\*\*

Avtorji

## Priporočena dodatna literatura

- B. E. A. Saleh in M. C. Teich, Fundamentals of Photonics, 2nd Edition, Wiley, New Jersey, 2007.
- A. Yariv in P. Yeh, Photonics, Sixth Edition, Oxford University Press, 2007.
- W. T. Silfvast, Laser Fundamentals, Second Edition, Cambridge University Press, 2008.
- C. C. Davis, Lasers and Electro-Optics, Cambridge University Press, 2006.
- J. W. Goodman, Statistical Optics, Second Edition, Wiley, New Jersey, 2015.
- W. Demtröder, Laser Spectroscopy, Fifth Edition, Springer, Berlin, 2014.
- R. W. Boyd, Nonlinear Optics, Third Edition, Academic Press, 2008.

# 1. Elektromagnetno valovanje

Za začetek osvežimo osnove teorije elektromagnetnega polja in elektromagnetnega valovanja. Obnovili bomo zapis Maxwellovih enačb, opisali osnovne pojave valovanja (lom, odboj in uklon) in si ogledali razširjanje svetlobe v anizotropnih snoveh.

## 1.1 Maxwellove enačbe

Elektromagnetno polje v praznem prostoru opišemo z dvema vektorskima poljem, električnim in magnetnim, ki sta v splošnem funkciji prostora in časa. Vsaki točki v prostoru lahko priredimo jakost električnega polja  $\mathbf{E}(\mathbf{r}, t)$  in jakost magnetnega polja  $\mathbf{H}(\mathbf{r}, t)$ . Za opis elektromagnetnega polja v snovi vpeljemo dva dodatna vektorja polja. To sta gostota električnega polja  $\mathbf{D}(\mathbf{r}, t)$  in gostota magnetnega polja  $\mathbf{B}(\mathbf{r}, t)$ . Vsa ta polja povezujejo Maxwellove enačbe<sup>1</sup>

$$\nabla \times \mathbf{H} = \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} + \mathbf{j}_e \quad (1.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e \quad (1.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0. \quad (1.4)$$

Pri zapisu enačb smo upoštevali tudi izvore polj, to je gostoto električnega toka  $\mathbf{j}_e(\mathbf{r}, t)$  in gostoto naboja  $\rho_e(\mathbf{r}, t)$ .

Poleg Maxwellovih enačb veljata za vektorski polji zvezi

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} \quad \text{in} \quad (1.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H} + \mathbf{M}, \quad (1.6)$$

kjer  $\mathbf{P}$  označuje električno polarizacijo, to je gostoto električnih dipolov,  $\mathbf{M}$  pa magnetizacijo, to je gostoto magnetnega momenta. Polarizacija in magnetizacija sta odvisni od zunanjih polj  $\mathbf{E}$  in  $\mathbf{H}$ . V splošnem sta njuni odvisnosti zelo zapleteni, v izotropnih in linearnih snoveh pa se zvezi poenostavita v

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E} = \epsilon_0 (\epsilon - 1) \mathbf{E} \quad \text{in} \quad \mathbf{M} = \chi_m \mathbf{H} = (\mu - 1) \mathbf{H}. \quad (1.7)$$

Vpeljali smo električno ( $\chi_e$ ) in magnetno ( $\chi_m$ ) susceptibilnost ter dielektričnost  $\epsilon$  in magnetno permeabilnost  $\mu$ . Ko združimo gornje enačbe, lahko zapišemo dve konstitutivni relaciji

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E} \quad \text{in} \quad (1.8)$$

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu \mathbf{H}. \quad (1.9)$$

V linearnih anizotropnih snoveh moramo namesto skalarnih vrednosti  $\epsilon$  in  $\mu$  zapisati tenzorje.

<sup>1</sup> Škotski fizik James Clerk Maxwell, 1831–1879.

### Robni pogoji

Navedene Maxwellove enačbe zadoščajo za opis elektromagnetnega polja v neomejeni snovi, kjer so vse komponente polj zvezne funkcije. Za obravnavo v omejeni snovi moramo vedeti tudi, kaj se z elektromagnetnim poljem zgodi na meji dveh sredstev. Pri prehodu iz enega dielektrika v drugega se ohranjata normalni komponenti gostote električnega in magnetnega polja ter tangentni komponenti jakosti električnega in magnetnega polja (slika 1.1)

$$D_{1n} = D_{2n} \quad (1.10)$$

$$B_{1n} = B_{2n} \quad (1.11)$$

$$E_{1t} = E_{2t} \quad (1.12)$$

$$H_{1t} = H_{2t}. \quad (1.13)$$

Pri tem smo privzeli, da na meji med dielektrikoma ni površinskih tokov ali nabojev, sicer bi morali robna pogoja za  $D_n$  in  $H_t$  ustrezeno popraviti. Na meji dielektrika z idealnim prevodnikom (kovino, zrcalom) so robni pogoji drugačni. Za magnetno polje jih ne moremo preprosto zapisati, za električno polje pa velja, da mora biti tangentna komponenta jakosti električnega polja enaka nič. Posledica tega robnega pogoja je, da se pri pravokotnem vpodu valovanja na zrcalo faza valovanja spremeni za  $\pi$ .



Slika 1.1: Na meji med dvema dielektrikoma brez površinskih tokov in nabojev so tangentna komponenta jakosti električnega in magnetnega polja ter normalna komponenta gostote magnetnega in električnega polja zvezne količine.

## 1.2 Valovna enačba in Poyntingov vektor

Večinoma bomo obravnavali elektromagnetna valovanja v izotropnih, homogenih in linearnih snoveh brez zunanjih izvorov in nosilcev naboja ( $\mathbf{j}_e = 0$  in  $\rho_e = 0$ ). Iz Maxwellovih enačb (enačbe 1.1–1.4) izpeljemo valovno enačbo za jakost električnega ali magnetnega polja

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad \text{in} \quad \nabla^2 \mathbf{H} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} = 0. \quad (1.14)$$

Pri tem je hitrost valovanja v snovi enaka

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \epsilon_0 \mu \mu_0}} = \frac{c_0}{n}. \quad (1.15)$$

Magnetne in dielektrične lastnosti snovi smo pospravili v lomni količnik

$$n = \frac{c_0}{c} = \sqrt{\epsilon \mu}. \quad (1.16)$$

Za izotropno in nemagnetno snov ( $\mu = 1$ ) je lomni količnik  $n = \sqrt{\epsilon}$ .

Vpeljimo še vektor gostote energijskega toka, to je Poyntingov vektor<sup>2</sup>  $\mathbf{S}$

$$\mathbf{S} = \mathbf{E} \times \mathbf{H}. \quad (1.17)$$

Kot vidimo, je smer energijskega toka vedno pravokotna na smeri  $\mathbf{E}$  in  $\mathbf{H}$ . Gostoto energijskega toka  $j$ , to je količino energije, ki v danem časovnem intervalu preteče skozi dano ploskev z normalo  $\hat{\mathbf{n}}$ , izračunamo kot časovno povprečje projekcije Poyntingovega vektorja

$$j = \langle \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{n}} \rangle. \quad (1.18)$$

Gostoti energijskega toka, predvsem gostoti svetlobnega toka, pravimo tudi intenziteta.

**Naloga 1.2.1 — Poyntingov teorem.** Iz Maxwellovih enačb izpelji kontinuitetno enačbo

$$-\nabla \cdot \mathbf{S} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{1}{2} \epsilon_0 \mathbf{E}^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \mathbf{H}^2 \right) + \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + \mu_0 \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{M}}{\partial t}. \quad (1.19)$$

Pomagaj si z zvezo  $\nabla \cdot (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) = (\nabla \times \mathbf{E}) \cdot \mathbf{H} - (\nabla \times \mathbf{H}) \cdot \mathbf{E}$ .

Opazimo, da predstavlja Poyntingov teorem izrek o ohranitvi energije. Prvi in drugi člen na desni strani gornje enačbe opišeta gostoto energije, shranjene v električnem in magnetnem polju, medtem ko tretji in četrти člen opišeta energijo, ki je shranjena v snovi (električnih in magnetnih dipolih). Za valovanje v homogeni izotropni snovi tako velja

$$\nabla \cdot \mathbf{S} = -\frac{\partial w}{\partial t}, \quad (1.20)$$

kjer je  $w$  celotna gostota energije elektromagnetnega polja. Zapišemo jo kot

$$w = \frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon \mathbf{E}^2 + \frac{1}{2} \mu_0 \mu \mathbf{H}^2. \quad (1.21)$$

Valovno enačbo in ohranitvene zakone lahko zapišemo tudi za anizotropne, nehomogene ali nelinearne snovi. Nekaj teh primerov bomo srečali v nadaljevanju in jih bomo obravnavali sproti.

### 1.3 Monokromatski elektromagnetični val

Reševanje valovne enačbe si navadno poenostavimo z vpeljavo kompleksnega zapisa jakosti električnega in magnetnega polja. Račun si oglejmo na primeru monokromatskega elektromagnetičnega vala. Nastavek za monokromatski val s krožno frekvenco  $\omega$  naj bo

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \Re(\mathbf{E}(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}) \quad \text{in} \quad \mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \Re(\mathbf{H}(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}), \quad (1.22)$$

kjer sta  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  in  $\mathbf{H}(\mathbf{r})$  časovno neodvisna vektorja jakosti električnega in magnetnega polja s kompleksno amplitudo. Podobno lahko vpeljemo tudi kompleksne vektorje  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{D}$  in  $\mathbf{B}$ , ki opisujejo realne količine (polarizacijo, magnetizacijo, gostoto električnega in gostoto magnetnega polja). V nadaljevanju bomo večinoma pisali polja v kompleksni obliki, pri čemer se bomo držali gornje definicije. Zavedati pa se moramo, da je uporaba kompleksnega zapisa zgolj računski pripomoček, na koncu je treba rezultate vedno izraziti z realnimi količinami.

<sup>2</sup>Angleški fizik John Henry Poynting, 1852–1914.

Če vstavimo gornji nastavek za monokromatski val v valovno enačbo (enačba 1.14), dobimo Helmholtzevi enačbi<sup>3</sup> za kompleksna vektorja jakosti električnega in magnetnega polja. V homogenem in izotropnem sredstvu ju zapišemo kot

$$\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) + k^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) = 0 \quad (1.23)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) + k^2 \mathbf{H}(\mathbf{r}) = 0, \quad (1.24)$$

kjer je  $k = nk_0 = n\omega/c_0$  velikost valovnega vektorja oziroma valovno število.

Vpeljimo še kompleksni Poyntingov vektor

$$\mathbf{S}(\mathbf{r}) = \frac{1}{2} \mathbf{E} \times \mathbf{H}^*. \quad (1.25)$$

**Naloga 1.3.1** Upoštevajoč izraz za Poyntingov vektor  $\mathbf{S}$  (enačba 1.17) pokaži, da lahko intenzi-  
teto valovanja  $j$  (oziora povprečje projekcije Poyntingovega vektorja) izrazimo s kompleksnim  
Poyntingovim vektorjem  $\mathbf{S}(\mathbf{r})$ :

$$j = \langle \mathbf{S} \cdot \hat{\mathbf{n}} \rangle = \frac{1}{4} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}^* + \mathbf{E}^* \times \mathbf{H}) = \Re(\mathbf{S}(\mathbf{r})). \quad (1.26)$$

## 1.4 Ravni val

Osnovna rešitev valovne enačbe je ravni val. Nastavek, ki predstavlja ravni val in hkrati reši Helmholtzevo enačbo (enačba 1.23), je oblike

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}(\mathbf{r}) e^{-i\omega t} = \mathbf{E}_0 e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - i\omega t} \quad (1.27)$$

in podobno za magnetno polje

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{H}(\mathbf{r}) e^{-i\omega t} = \mathbf{H}_0 e^{i\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - i\omega t}, \quad (1.28)$$

pri čemer sta vektorja  $\mathbf{E}_0$  ter  $\mathbf{H}_0$  od kraja in časa neodvisna. Velikost valovnega vektorja  $\mathbf{k}$  je  $k = nk_0$ , pri čemer je  $n$  lomni količnik izotropne in homogene snovi.

Vektorja jakosti električnega in magnetnega polja zadostujeta Maxwellovim enačbam (enačbe 1.1–1.4), iz česar sledi, da sta polji vedno medsebojno pravokotni, hkrati pa pravokotni na valovni vektor  $\mathbf{k}$ . Elektromagnetno valovanje je torej transverzalno valovanje.

**Naloga 1.4.1** Pokaži, da za ravni val vedno velja  $\mathbf{D} \perp \mathbf{k}$  in  $\mathbf{B} \perp \mathbf{k}$ . Izpelji še pravokotnost polj in valovnega vektorja v izotropni snovi

$$\mathbf{k} \times \mathbf{H}_0 = -\omega \epsilon \epsilon_0 \mathbf{E}_0 \quad \text{in} \quad (1.29)$$

$$\mathbf{k} \times \mathbf{E}_0 = \omega \mu \mu_0 \mathbf{H}_0. \quad (1.30)$$

Zaradi enolične zveze med električnim in magnetnim poljem zadošča za opis ravnega vala le eno polje, navadno se odločimo za električno.

<sup>3</sup>Nemški zdravnik in fizik Hermann Ludwig Ferdinand von Helmholtz, 1821–1894.

Energijski tok je pri ravnem valu v izotropni snovi vedno v smeri valovnega vektorja, pravokotno na valovne fronte. Iz definicije za gostoto svetlobnega toka (enačbi 1.26) ter Maxwellovih enačb (enačbe 1.1–1.4) sledi

$$j = \Re \left( \frac{1}{4} E_0 H_0^* + \frac{1}{4} E_0^* H_0 \right) = \frac{1}{2} c \epsilon \epsilon_0 |E_0|^2 = \frac{1}{2} c_0 n \epsilon_0 |E_0|^2. \quad (1.31)$$

Gostota svetlobnega toka (intenziteta svetlobe) je torej sorazmerna s kvadratom amplitude jakosti električnega polja. Poglejmo nekaj primerov. Gostoti toka  $j = 1 \text{ kW/m}^2$  (približna gostota svetlobnega toka s Sonca) tako v praznem prostoru ustreza jakost električnega polja  $E_0 = 868 \text{ V/m}$ , gostoti  $j = 1 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  (intenziteta močno fokusiranega laserskega žarka) pa  $E_0 = 27 \text{ MV/m}$ .

Zapišimo še povprečno gostoto energije valovanja. K energiji prispevata tako magnetno kot električno polje. Oba prispevka sta enaka, zato velja

$$\langle w \rangle = \frac{1}{4} \epsilon \epsilon_0 |E_0|^2 + \frac{1}{4} \mu \mu_0 |H_0|^2 = \frac{1}{2} \epsilon \epsilon_0 |E_0|^2. \quad (1.32)$$

Povprečna gostota energije  $w$ , pomnožena s hitrostjo svetlobe v snovi, da gostoto energijskega toka  $j$  oziroma intenziteto svetlobe

$$j = cw. \quad (1.33)$$

Gornji izraz nazorno kaže, da je intenziteta svetlobe pravzaprav pretok energije. To si lahko predstavljamo, če vzamemo valj s prečnim presekom  $S$  in dolžino  $c\Delta t$ . V volumnu  $Sc\Delta t$  je potem shranjene  $wSc\Delta t$  energije. Energija, ki preteče skozi presek  $S$  v času  $\Delta t$ , je ravno  $cw$ .

Intenziteta ravnega vala je neodvisna od kraja in časa, iz česar sledi, da je povsod po prostoru enaka. Če bi hoteli izračunati energijo, ki jo nosi ravni val, bi opazili, da je ta energija neskončna. To seveda ni mogoče, zato se je vedno treba zavedati, da je ravni val le idealiziran, a nazoren in praktičen približek elektromagnetnega vala.

## 1.5 Polarizacija EM valovanja

Jakost električnega polja elektromagnetevalovanja je v izotropnem sredstvu pravokotna na smer valovnega vektorja<sup>4</sup>. Vektor  $\mathbf{E}$  torej leži v ravnini, pravokotni na smer valovnega vektorja, njegovo smer pa opiše polarizacija.

V splošnem je ravni val eliptično polariziran. Takrat vektor  $\mathbf{E}$  v ravnini, pravokotni na valovni vektor, oriše elipso. Obe komponenti vektorja  $\mathbf{E}(\mathbf{r})$  nihata sinusno z enako frekvenco, lahko pa se razlikujeta v amplitudi in fazi. Kadar je elipsa izrojena v daljico, govorimo o linearno polariziranem valovanju, kadar pa je krog, govorimo o cirkularno polariziranem valu. Poljubno polarizacijo lahko vedno zapišemo kot vsoto dveh linearne ali dveh cirkularne polariziranih valovanj.

Polarizacijo valovanja lahko zapišemo s kompleksnim Jonesovim vektorjem<sup>5</sup>  $\mathbf{J}$ . Za monokromatski ravni val, ki se širi v smeri  $z$ , je

$$\mathbf{J} = \frac{1}{|E_0|} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix}. \quad (1.34)$$

<sup>4</sup>V splošnem je jakost električnega polja pravokotna na smer Poyntingovega vektorja ( $\mathbf{E} \perp \mathbf{S}$ ) in gostota električnega polja pravokotna na smer valovnega vektorja ( $\mathbf{D} \perp \mathbf{k}$ ). V anizotropnih sredstvih velja  $\mathbf{k} \parallel \mathbf{S}$ .

<sup>5</sup>Ameriški fizik Robert Clark Jones, 1916–2004.

Dodali smo normalizacijski faktor  $|E_0| = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2}$ , da je Jonesov vektor normaliziran in  $\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}^* = 1$ . Ravni val, linearно polariziran v smeri  $x$ , tako zapišemo kot  $\mathbf{J} = (1, 0)$ , val, ki je linearно polariziran pod kotom  $45^\circ$  glede na osi  $x$  in  $y$ , pa je  $\mathbf{J} = (1, 1)/\sqrt{2}$ . Za zapis cirkularno polariziranega valovanja ni enotnega dogovora, tukaj zapišimo desno cirkularno polarizirano valovanje kot  $\mathbf{J} = (1, -i)/\sqrt{2}$ , levo cirkularno polarizirano pa z  $\mathbf{J} = (1, i)/\sqrt{2}$ . V našem zapisu je desno polariziran val tisti val, pri katerem se električna poljska jakost na danem mestu vrti v desno, če gledamo v smeri širjenja valovanja. Hkrati pa velja, da električna poljska jakost ob danem času vzdolž smeri širjenja valovanja opiše levosučno vijačnico.

Zapis z Jonesovim vektorjem je prikladen, saj omogoča preprost izračun prehoda ravnega vala skozi optične elemente, ki spreminjajo polarizacijo, a ohranjajo obliko ravnega vala. V splošnem se pri prehodu skozi sredstvo spremeni kompleksna amplituda  $\mathbf{E}_1 = (E_{1x}, E_{1y})$

$$E_{2x} = T_{11}E_{1x} + T_{12}E_{1y} \quad (1.35)$$

$$E_{2y} = T_{21}E_{1x} + T_{22}E_{1y}, \quad (1.36)$$

pri čemer so komponente  $T_{ij}$  odvisne od lastnosti sredstva. Enačbi zapišemo v matrični obliki

$$\mathbf{E}_2 = T \cdot \mathbf{E}_1, \quad (1.37)$$

kjer sta  $\mathbf{E}_1$  in  $\mathbf{E}_2$  vstopni in izstopni val,  $T$  pa je Jonesova matrika. Jonesova matrika za prehod skozi linearни polarizator, ki polarizira v smeri  $x$ , je

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (1.38)$$

Oglejmo si še dva zanimiva primera optičnih komponent. Jonesova matrika za  $\lambda/2$  ploščico, ki spremeni desno cirkularno polariziran val v levo polariziran in obratno, je

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (1.39)$$

Jonesova matrika za  $\lambda/4$  ploščico pa je

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & i \end{bmatrix}. \quad (1.40)$$

Ta optični element linearno polarizirano valovanje oblike  $\frac{E_0}{\sqrt{2}}(1, 1)$  spremeni v levo cirkularno polarizirano valovanje, cirkularno polarizirano valovanje pa nazaj v linearno.

**Naloga 1.5.1** Pokaži, da je Jonesova matrika za polarizator, ki prepušča polarizacijo pod kotom  $\vartheta$  glede na os  $x$ , podana s spodnjo matriko. Namig: matriko  $T'$ , ki predstavlja polarizator v smeri  $x$ , zapiši v zavrnjenem koordinatnem sistemu  $T = R(\vartheta) \cdot T' \cdot R(\vartheta)^T$ , kjer je  $R(\vartheta)$  rotacijska matrika.

$$T = \begin{bmatrix} \cos^2 \vartheta & \sin \vartheta \cos \vartheta \\ \sin \vartheta \cos \vartheta & \sin^2 \vartheta \end{bmatrix}. \quad (1.41)$$

## 1.6 Lom in odboj EM valovanja

Na ravni meji med dvema izotropnima dielektrikoma se del svetlobe odbije po odbojnem zakonu, del pa lomi po lomnem zakonu

$$n_1 \sin \vartheta_1 = n_2 \sin \vartheta_2. \quad (1.42)$$

S kotoma  $\vartheta_1$  in  $\vartheta_2$  smo označili vpadni in lomni kot,  $n_1$  in  $n_2$  pa sta lomna količnika prve in druge snovi. Poglejmo, kaj se pri lomu in odboju zgodi s polarizacijo valovanja. Os  $x$  naj bo pravokotna na vpadno ravnino (slika 1.2). Valovanje, polarizirano v tej smeri, je transverzalno električno (TE) valovanje. Takrat je električna poljska jakost vzporedna mejni ravnini. Kadar leži v mejni ravnini jakost magnetnega polja, govorimo o transverzalnem magnetnem valovanju (TM).



Slika 1.2: Lom elektromagnetskog valovanja. Levo: transverzalno električno (TE) valovanje. Desno: transverzalno magnetno (TM) valovanje. Os  $x$  je pravokotna na vpadno ravnino in kaže iz lista.

Jonesovi matriki za prepustnost  $t$  in odbojnost  $r$  na plasti med dvema dielektrikoma zapišemo kot

$$t = \begin{bmatrix} t_x & 0 \\ 0 & t_y \end{bmatrix} \quad \text{in} \quad r = \begin{bmatrix} r_x & 0 \\ 0 & r_y \end{bmatrix}. \quad (1.43)$$

Potem je

$$E_{2x} = t_x E_{1x} \quad E_{3x} = r_x E_{1x} \quad (1.44)$$

$$E_{2y} = t_y E_{1y} \quad E_{3y} = r_y E_{1y}, \quad (1.45)$$

pri čemer smo z  $\mathbf{E}_2$  označili prepuščeni val, z  $\mathbf{E}_3$  pa odbitega. Iz robnih pogojev (enačbe 1.10–1.13) izračunamo koeficiente matrik  $r$  in  $t$  s Fresnelovimi enačbami<sup>6</sup>:

$$r_x = \frac{n_1 \cos \vartheta_1 - n_2 \cos \vartheta_2}{n_1 \cos \vartheta_1 + n_2 \cos \vartheta_2}, \quad t_x = 1 + r_x = \frac{2n_1 \cos \vartheta_1}{n_1 \cos \vartheta_1 + n_2 \cos \vartheta_2} \quad (1.46)$$

in

$$r_y = \frac{n_2 \cos \vartheta_1 - n_1 \cos \vartheta_2}{n_1 \cos \vartheta_2 + n_2 \cos \vartheta_1}, \quad t_y = (1 + r_y) \frac{\cos \vartheta_1}{\cos \vartheta_2} = \frac{2n_1 \cos \vartheta_1}{n_1 \cos \vartheta_2 + n_2 \cos \vartheta_1}. \quad (1.47)$$

<sup>6</sup>Francoski fizik Augustin-Jean Fresnel, 1788–1827.

V splošnem sta odbojnost  $r$  in prepustnost  $t$  kompleksni količini, saj iz lomnega zakona sledi, da je  $\cos \vartheta_2 = \sqrt{1 - (n_1/n_2)^2 \sin^2 \vartheta_1}$  lahko kompleksen. Velikost števila  $|r|$  tako predstavlja odbojnost, argument  $\arg\{r\}$  pa spremembo faze pri odboju.

Prepustnost  $r$  in odbojnost  $t$  povesta, kako se spremeni kompleksna amplituda jakosti električnega polja. Razmerje med intenziteto odbite in vpadne svetlobe  $\mathcal{R}$  ozziroma razmerje med intenziteto prepuščene in vpadne svetlobe  $\mathcal{T}$  izračunamo kot

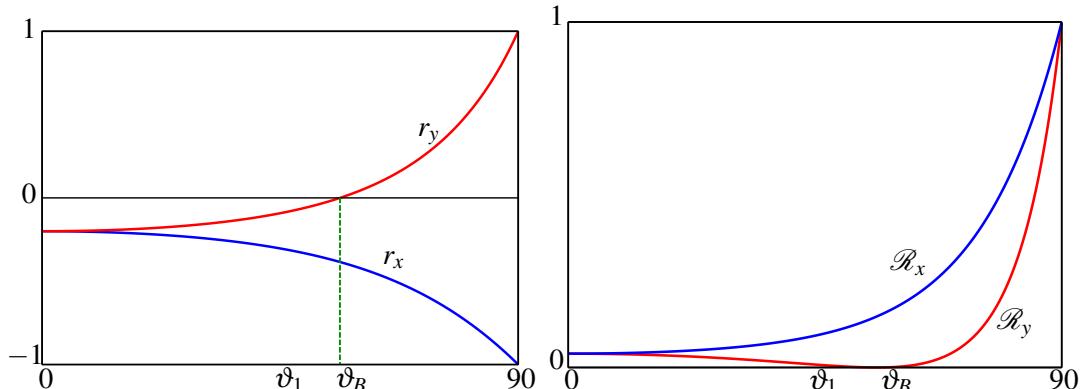
$$\mathcal{R} = |r|^2 \quad (1.48)$$

in

$$\mathcal{T} = 1 - \mathcal{R}. \quad (1.49)$$

Slednja enačba sledi iz ohranitve energije. V splošnem  $\mathcal{T}$  ni enak  $|t|^2$ , saj energijski tok potuje po različnih snoveh in v različnih smereh. Velja zveza

$$\mathcal{T} = \frac{n_2 \cos \vartheta_2}{n_1 \cos \vartheta_1} |t|^2. \quad (1.50)$$



Slika 1.3: Odbojnost  $r$  za obe vpadni polarizaciji (levo) in razmerje med intenziteto odbite in vpadne svetlobe  $\mathcal{R}$  (desno) v odvisnosti od vpadnega kota. Pri Brewsterjevem vpadnem kotu je odbojnost enaka nič.

Zanimiva je odvisnost odbojnosti od vpadnega kota. Izkaže se, da pri nekem kotu, imenujemo ga Brewsterjev kot<sup>7</sup>, odbojnost za TM polarizacijo enaka nič in vsa vpadla svetloba je prepuščena. Brewsterjeva okna (steklene ploščice, postavljene pod Brewsterjevim kotom) uporabljam v resonatorjih laserjev za povečanje izgub TE in zmanjšanje izgub TM polariziranega valovanja.

---

**Naloga 1.6.1 — Brewsterjev kot.** Pokaži, da za TM val obstaja vpadni kot

$$\vartheta_B = \arctan \left( \frac{n_2}{n_1} \right), \quad (1.51)$$

pri katerem je odbojnost enaka nič in prepustnost enaka  $\mathcal{T} = 1$ .

---

<sup>7</sup>Škotski fizik in znanstvenik Sir David Brewster, 1781–1868.



Pri prehodu skozi optične elemente se – razen TM polariziranega valovanja pri Brewsterjevem kotu – vedno nekaj svetlobe odbije. Da zmanjšamo te izgube, optične elemente navadno prekrijemo z antirefleksno plastjo, to je nanosom ene ali več primerno izbranih debelin plasti dielektrikov z ustreznimi lomnimi količniki. Zaradi destruktivne interference se količina odbite svetlobe z izbrano valovno dolžino občutno zmanjša. Ker imamo v fiziki laserjev opraviti s koherentnimi izvori s točno določeno valovno dolžino, za zmanjšanje izgub, na primer v resonatorju laserja, vedno uporabljamo optične elemente (leče, kristale, akusto-optične modulatorje ...) z ustrezno antirefleksno plastjo.

## 1.7 Uklon svetlobe

Ko svetloba vpade na oviro, za oviro nastane senca. Nastala senca ni ostra, ampak ima zaradi uklona zabrisane robeve. Obravnave uklona svetlobe na odprtih (zaslonah) se lotimo z uporabo skalarnega približka teorije elektromagnetnega polja. To pomeni, da vpliv polarizacije zanemarimo. Vpliv polarizacije je pomemben zgolj pri zelo majhnih odprtih, torej kadar je  $\lambda \sim a$ , kjer je  $a$  velikost odprtine. Treba pa je povedati, da so tudi v tem primeru uklonske slike za različne polarizacije podobne, razlikujejo pa se po intenziteti prepuščene svetlobe.



### Žični polarizatorji

Primer, kjer skalarni približek ne da pravih rezultatov, je uklon na mrežici, narejeni iz zelo tankih prevodnik žic s periodo mrežice  $d \ll \lambda$ . Takšna mrežica deluje kot polarizator za valovanje s polarizacijo, ki je pravokotno na žice (TE polarizacija). Elektromagnetni val s TM polarizacijo pri prečkanju inducira tok v žicah, medtem ko je za TE polarizacijo inducirani tok bistveno manjši, saj je smer toka omejena vzdolž žice. Posledično je prepustnost za TE val velika, medtem ko se TM val delno absorbira in odbije. Takšni polarizatorji se večinoma uporabljajo v mikrovalovni tehniki, vendar se v zadnjih letih z razvojem in izboljšavo litografskih postopkov vse pogosteje uporabljajo tudi v bližnjem infrardečem področju svetlobe.

Pri velikostih odprtin  $a \gg \lambda$  torej uporabimo skalarno valovno enačbo (enačba 1.14)

$$\nabla^2 E - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = 0. \quad (1.52)$$

Zapisana valovna enačba velja za vse komponente električne  $E$  in tudi magnetne poljske jakosti  $H$ . Časovna odvisnost polja  $E$  je harmonična funkcija in je sorazmerna z  $e^{-i\omega t}$ . Z uporabo Greenovega teorema lahko jakost polja  $E_P$  v točki  $P$  izrazimo s poljem na poljubni ploskvi, ki obkroža točko  $P$  (slika 1.4). Zvezno opisuje Kirchhoffov integral<sup>8</sup>

$$E_P = -\frac{1}{4\pi} \oint \left( E \mathbf{n} \cdot \nabla \frac{e^{ikr}}{r} - \frac{e^{ikr}}{r} \mathbf{n} \cdot \nabla E \right) dS, \quad (1.53)$$

kjer je  $\mathbf{n}$  normala na ploskev, po kateri teče integral,  $r$  pa je oddaljenost od točke  $P$  do ploskve  $dS$ . Kirchhoffov integral velja splošno za katerokoli harmonično funkcijo, ki reši valovno enačbo (enačba 1.52), ne samo  $E$ , in torej ni vezan na obravnavo uklona svetlobe.

Kot prvi primer vzemimo točkast izvor v točki  $S$ . Svetloba iz njega vpada na zaslon, v katerem je odptina poljubne oblike. Izračunajmo skalarno polje v točki  $P$  na drugi strani zaslona. Vpadno svetlobo zapišemo kot

$$E = A \frac{e^{ikr'}}{r'}, \quad (1.54)$$

kjer je  $r'$  razdalja od izvora do točke na zaslonu,  $A$  pa zaradi ohranitve energije konstanta.

<sup>8</sup>Nemški fizik Gustav Kirchhoff, 1824–1887.



Slika 1.4: Integracijska ploskev v Kirchhoffovem integralu zajema odprtino in objema točko  $P$ .

Integracijska ploskev je lahko poljubna sklenjena ploskev, ki objema točko  $P$ . Izberemo tako, ki zajema odprtino na zaslonu, poleg tega pa naredimo še dva približka:

1. Jakost polja  $E$  in njen gradient doprineseta k integralu le na odprtini, na preostanku ploskve pa sta njuna prispevka zanemarljivo majhna.
2. Vrednost  $E$  in njen gradient sta na odprtini takšna, kot da zaslona ne bi bilo.

Gornja približka sta precej groba, vendar se izkaže, da se kljub temu dobro ujemata z eksperimentalno določeno uklonsko sliko, s čimer upravičimo njuno uporabo pri izračunu uklonske slike.

Kirchhoffov integral za primer točkastega izvora svetlobe se potem zapiše kot integral, pri čemer integriramo po odprtini

$$E_P = -\frac{ikAe^{-i\omega t}}{4\pi} \int \frac{e^{ik(r+r')}}{rr'} [\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}) - \cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}')] dS. \quad (1.55)$$

V literaturi ga pogosto imenujejo Fresnel-Kirchhoffov uklonski integral.

---

**Naloga 1.7.1** Uporabi Kirchhoffov integral (enačba 1.53) in pokaži, da za primer krožnega vpadnega vala (enačba 1.54) polje v točki  $P$  zapišemo s Fresnel-Kirchhoffovim integralom (enačba 1.55). Pri tem privzami, da je oddaljenost točke  $P$  od odprtine  $r \gg \lambda$ .

---

Oglejmo si poseben primer, ko leži točkast izvor svetlobe na osi okrogle odprtine. Razdalja  $r'$  je potem konstantna in polje v točki  $P$  izračunamo kot

$$E_P = -\frac{ik}{4\pi} \int E_S \frac{e^{ikr-i\omega t}}{r} [\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}) + 1] dS, \quad (1.56)$$

pri čemer  $E_S$  predstavlja kompleksno amplitudo vpadnega polja v odprtini

$$E_S = A \frac{e^{ikr'}}{r'}. \quad (1.57)$$

Zgornja oblika Fresnel-Kirchhoffovega integrala ni pravzaprav nič drugega kot matematičen zapis Huygensovega načela<sup>9</sup>. Spomnimo se, da Huygensovo načelo pravi, da lahko vsako točko valovne fronte obravnavamo kot izvor novega krogelnega vala. Točno to je zapisano tudi v gornjem integralu. Vpadni val  $E_S$  v vsakem od elementov  $dS$  odprtine vzbudi krogelno valovanje s kompleksno amplitudo

$$E = A_0 \frac{e^{ikr}}{r}, \quad (1.58)$$

polje v izbrani točki  $P$  pa je vsota prispevkov posameznih krogelnih valovanj.

Za razliko od osnovnega Huygensovega načela, v Fresnel-Kirchhoffovem integralu (enačba 1.55) nastopa še faktor  $[\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}) + 1]$ , ki poskrbi, da ni valovanja v smeri nazaj proti izvoru. Tudi faktor  $-i$  manjka v osnovnem Huygensovem načelu, pomeni pa, da je uklonjeno valovanje fazno zakasnjeno za  $\pi/2$  glede na osnovno valovanje  $E_S$ .

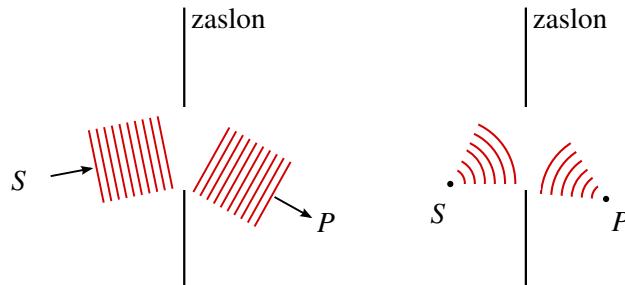
Uporabna razširitev Fresnel-Kirchhoffovega uklona je z uporabo prepustnostne funkcije odprtine  $T$ . Z njo v splošnem popišemo amplitudne in fazne spremembe, do katerih lahko pride na raznih odprtinah, lečah, uklonskih mrežicah ... Razširjen uklonski integral zapišemo kot

$$E_P = -\frac{ik}{4\pi} \int T(r) E_S(r) \frac{e^{ikr-i\omega t}}{r} [\cos(\mathbf{n}, \mathbf{r}) + 1] dS, \quad (1.59)$$

pri čemer smo upoštevali tudi splošno obliko vpadnega vala  $E_S(r)$ .

### Fraunhoferjev in Fresnelov približek

Izračun Fresnel-Kirchhoffovega integrala je v splošnem zelo zapleten, zato se pogosto poslužujemo dveh približkov: Fraunhoferjevega<sup>10</sup> in Fresnelovega. Fraunhoferjeva uklonska slika velja za daljno polje, kadar lahko vpadni in uklonjeni val zapišemo kot ravna valova. Bolj zapleteno Fresnelovo uklonsko sliko pa moramo uporabiti, kadar obravnavamo primer bližnjega polja.



Slika 1.5: V Fraunhoferjevem približku valovanji obravnavamo kot ravna valova (levo). Fresnelov približek moramo uporabiti za obravnavno uklona v primeru bližnjega polja (desno).

Mejo med daljnim in bližnjim poljem kvalitativno določa Fresnelovo število

$$F = \frac{a^2}{L\lambda}. \quad (1.60)$$

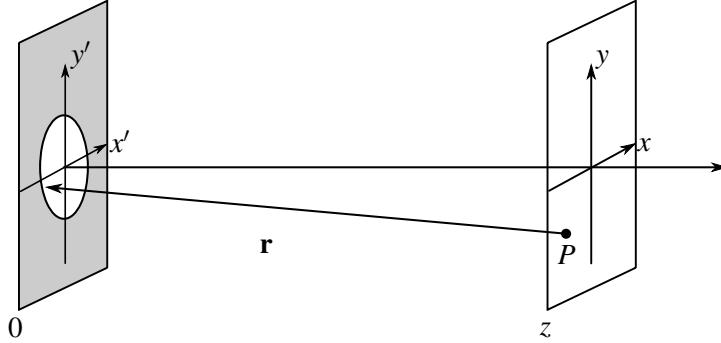
Pri tem je  $a$  karakteristična dimenzija odprtine,  $L$  tipična oddaljenost od odprtine ter  $\lambda$  valovna dolžina.

<sup>9</sup>Nizozemski znanstvenik Christiaan Huygens, 1629–1695.

<sup>10</sup>Nemški fizik Joseph von Fraunhofer, 1787–1826.

V grobem velja, da za oddaljenosti  $L$  od odprtine, za katere velja  $F < 1$ , polje obravnavamo kot daljno polje, medtem ko  $F > 1$  pove, da moramo uklon obravnavati v Fresnelovem približku ali celo v polni obliki.

Zapišimo uklonske integrale za oba približka. Izhajajmo iz Fresnel-Kirchhoffovega integrala za točkast izvor (enačba 1.55) in zapišimo razdaljo  $r$  s koordinatama na zaslonu  $x', y'$  ter lego točke  $P$  s koordinatami  $x, y, z$  (slika 1.6).



Slika 1.6: K izračunu Fraunhoferjevega in Fresnelovega uklona. Zaslon, kjer opazujemo uklonsko sliko, je od odprtine oddaljen za  $z$ .

Zapišemo

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + z^2} \quad (1.61)$$

in privzamemo, da je  $z$  razmeroma velik v primerjavi s prečnima razlikama. Potem lahko  $r$  razvijemo

$$r \approx z + \frac{(x - x')^2}{2z} + \frac{(y - y')^2}{2z}. \quad (1.62)$$

V Fraunhoferjevem približku zadošča uporaba le linearnih členov v gornjem izrazu in za Fraunhoferjev uklonski integral dobimo

$$E_P = -\frac{i}{z\lambda} \int \int E_S e^{-ik(xx' + yy')/z} dx' dy', \quad (1.63)$$

kar ni nič drugega kot Fourierova transformacija polja  $E_S$ .

V Fresnelovem približku upoštevamo tudi kvadratne člene v razvoju in dobimo

$$E_P = -\frac{i}{z\lambda} \int \int E_S e^{-ik((x-x')^2 + (y-y')^2)/2z} dx' dy'. \quad (1.64)$$

**Naloga 1.7.2** Pokaži, da je v Fraunhoferjevi uklonski sliki uklon na okrogli odprtini s premerom  $a$  podan z

$$E_P = E_0 \frac{J_1(\pi a \rho / \lambda z)}{\pi a \rho / \lambda z}, \quad (1.65)$$

kjer je  $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$ .

## 1.8 EM valovanje v anizotropnih snoveh

Do zdaj smo obravnavali elektromagnetno valovanje v izotropnih snoveh, v katerih je dielektričnost skalar in hitrost širjenja valovanja neodvisna od njegove smeri. V splošnem so snovi anizotropne, dielektričnost je tenzor, hitrost potovanja svetlobe skozi snov pa je odvisna od smeri razširjanja in od polarizacije valovanja.

Gostoto električnega polja v anizotropni snovi zapišemo kot

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \underline{\epsilon} \cdot \mathbf{E} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{bmatrix} \mathbf{E}, \quad (1.66)$$

kjer je  $\epsilon_{ij}$  tenzor drugega reda in ima v splošnem devet komponent. V dielektričnih snoveh, v katerih ne pride do optične aktivnosti ali absorpcije, je tenzor realen in simetričen  $\epsilon_{ij} = \epsilon_{ji}^*$ . Tak tenzor lahko vedno diagonaliziramo, torej poiščemo koordinatni sistem, v katerem je tenzor  $\underline{\epsilon}$  diagonalen. V takem koordinatnem sistemu velja

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \begin{bmatrix} \epsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \epsilon_3 \end{bmatrix} \mathbf{E} \quad (1.67)$$

in

$$\begin{aligned} D_1 &= \epsilon_0 \epsilon_1 E_1 \\ D_2 &= \epsilon_0 \epsilon_2 E_2 \\ D_3 &= \epsilon_0 \epsilon_3 E_3. \end{aligned} \quad (1.68)$$

Glavne osi sistema določajo smeri, vzdolž katerih sta jakost in gostota električnega polja vzporedni, lastne vrednosti pa ustrezajo trem lomnim količnikom  $\epsilon_i = \sqrt{n_i}$ . Kristale, za katere so vse tri vrednosti  $n_i$  različne, imenujemo optično dvoosni kristali, medtem ko sta v optično enoosnih kristalih dve lastni vrednosti enaki  $n_1 = n_2$ . Če so enake vse tri vrednosti, je snov izotropna.

### Optična indikatrisa

Poglejmo, kako se po anizotropnih snoveh širi valovanje v odvisnosti od njegove smeri in polarizacije. Preprost primer je valovanje, ki se širi vzdolž lastne osi  $z$ , polarizirano pa je vzdolž lastne osi  $x$ . Pri prehodu skozi kristal se polarizacija valovanja ohrani, lomni količnik za tak val pa je  $n_1$ . Podobno velja za val, polariziran v smeri  $y$ , za katerega je lomni količnik enak  $n_2$ . Če se valovanje širi vzdolž lastne osi  $z$ , vendar njegova polarizacija ne Sovpada z lastnima osema  $x$  ali  $y$ , nastane po prehodu skozi kristal iz vpadnega linearno polariziranega valovanja v splošnem eliptično valovanje. Lastni komponenti namreč potujeta z različnima hitrostma, zato pride med njima do faznega zamika.

Za poljubno smer širjenja valovanja ter poljubno polarizacijo je račun bolj zapleten in je treba lomne količnike še izračunati. Pri tem si pomagamo z grafično upodobitvijo, s tako imenovano optično indikatriso (elipsoidom lomnega količnika).



Slika 1.7: Optična indikatrica oziroma elipsoid lomnega količnika. Glavne osi elipsoida sovpadajo z glavnimi osmi tenzorja  $\epsilon$ , polosi elipsoida pa so enake lomnim količnikom  $n_i$ . V primeru optično enoosnega kristala je indikatrica rotacijski elipsoid, v primeru izotropne snovi pa je optična indikatrica krogla.

Optična indikatrica je elipsoid, podan z enačbo

$$\frac{x^2}{n_1^2} + \frac{y^2}{n_2^2} + \frac{z^2}{n_3^2} = 1. \quad (1.69)$$

Glavne osi elipsoida sovpadajo z glavnimi osmi tenzorja  $\epsilon$ , polosi elipsoida pa so  $n_1$ ,  $n_2$  in  $n_3$ . Za val, ki se širi z valovnim vektorjem  $\mathbf{k}$ , skozi izhodišče narišemo ravnino, pravokotno na smer valovnega vektorja (slika 1.7). Presečišče ravnine in elipsoida je elipsa, katere glavni osi podata vrednosti lomnih količnikov  $n_a$  in  $n_b$  za obe lastni polarizaciji, njuni smeri pa predstavljata lastni smeri gostote električnega polja. Ker sta to lastni osi, smer jakosti električnega polja izračunamo z enačbo (1.68).

### Optično enoosni kristali

V optično enoosnih kristalih sta dve lastni vrednosti enaki in indikatrica je rotacijski elipsoid. Po dogovoru izberemo lastne vrednosti tako, da velja  $n_1 = n_2 \neq n_3$ . Za valovanje, ki se razširja v smeri  $z$ , sta lomna količnika za obe polarizacije enaka in os  $z$  imenujemo optična os. Hitrost valovanja, ki se širi vzdolž optične osi, je torej neodvisna od njegove polarizacije. Navadno vpeljemo tudi nove označke:  $n_1 = n_2 = n_o$ , ki označuje redni (*ordinary*) lomni količnik,  $n_3 = n_e$  pa izredni (*extraordinary*) lomni količnik.

Zaradi simetrije je pri izračunu lomnega količnika pomemben le kot  $\vartheta$  med valovnim vektorjem  $\mathbf{k}$  in optično osjo  $z$ . Dvema lastnima polarizacijama pripadata dva različna lomna količnika. Za lažjo predstavo oba lomna količnika skiciramo v odvisnosti od kota  $\vartheta$  (slika 1.8). Lomni količnik za žarek, ki je polariziran pravokotno na vpadno ravnino, je neodvisen od  $\vartheta$ , zato narišemo krožnico. Takemu žarku pravimo redni žarek. Žarek, ki je polariziran v vpadni ravnini, je tako imenovan izredni žarek. Pripadajoč lomni količnik je odvisen od kota  $\vartheta$  in ga izračunamo iz sledeče enačbe elipse s polosema  $n_o$  in  $n_e$ :

$$\frac{1}{n^2(\vartheta)} = \frac{\cos^2 \vartheta}{n_o^2} + \frac{\sin^2 \vartheta}{n_e^2}. \quad (1.70)$$

Opazimo, da se krožnica in elipsa dotikata ravno na osi  $z$ . Takrat se valovanje širi vzdolž optične osi in lomna količnika sta za obe polarizacije enaka  $n_o$ .

Snov	$n_o$	$n_e$
CaCO <sub>3</sub> (kalcit)	1,6557	1,4849
BaTiO <sub>3</sub>	2,4042	2,3605
LiNbO <sub>3</sub>	2,2864	2,2022
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	1,5074	1,4669
tekoči kristal 5CB (25°C)	1,5319	1,7060
telur ( $\lambda = 10 \mu\text{m}$ )	4,7969	6,2455

Tabela 1.1: Redni in izredni lomni količnik za nekaj izbranih kristalov. Razen v primeru telurja veljajo vrednosti za svetlobo z valovno dolžino 633 nm.



Slika 1.8: V optično enoosnih kristalih je lomni količnik odvisen od smeri valovnega vektorja in njegove polarizacije. a) primer pozitivno anizotropne snovi ( $n_e > n_o$ ). b) Redni žarek je polariziran pravokotno na vpadno ravnino. Zanj velja, da je  $\mathbf{D} \parallel \mathbf{E}$  in  $\mathbf{S} \parallel \mathbf{k}$ . Izredni žarek je polariziran v vpadni ravnini. Smer širjenja žarka  $\mathbf{S}$  ni vzporedna z valovnim vektorjem  $\mathbf{k}$ , prav tako valovne fronte niso pravokotne nanjo. c) Primer negativno anizotropne snovi ( $n_e < n_o$ ).

Navadno sta pri ravnem valu vektorja  $\mathbf{E}$  in  $\mathbf{D}$  vzporedna, prav tako  $\mathbf{k}$  in  $\mathbf{S}$ . Žarek se širi v smeri valovnega vektorja, valovne fronte pa so pravokotne nanj. To velja tudi za redni žarek v anizotropnih snoveh. Izredni žarek pa ima, kot že ime nakazuje, "izredne" lastnosti. Vektorja  $\mathbf{E}$  in  $\mathbf{D}$  nista vzporedna, zato tudi valovni vektor  $\mathbf{k}$  ni vzporeden toku energije oziroma Poyntingovemu vektorju  $\mathbf{S}$  (slika 1.8 b). Žarek, ki ga vidimo, torej potuje v smeri, ki ni enaka smeri valovnega vektorja. Smer Poyntingovega vektorja določimo kot normalo na elipso pri kotu  $\vartheta$ .

### Dvojni lom

Ko vpade žarek na anizotropno snov, se lomi. Privzemimo, da je lomni količnik snovi, iz katere valovanje prehaja v anizotropen kristal, enak 1. Vemo, da je hitrost valovanja v snovi – in s tem tudi kot, pod katerim se lomi – odvisna od polarizacije valovanja. V splošnem se pojavita dva lomljena žarka z različnima polarizacijama, kar da ime pojavu: dvolomnost (slika 1.9). Da zadostimo ohranitvi faze pri prehodu, moramo popraviti tudi lomni zakon (enačba 1.42).

Za redni val s TE polarizacijo (pravokotno na vpadno ravnino) velja navadni lomni zakon, pri čemer je lomni količnik snovi enak rednemu lomnemu količniku  $n_o$ :

$$\sin \vartheta_1 = n_o \sin \vartheta_o. \quad (1.71)$$



Slika 1.9: Dvojni lom. a) Pri poševnem vpadu na anizotropno snov se valovanje loči na dva različno polarizirana žarka. b) Tudi pri pravokotnem vpadu se žarka ločita, če je optična os pod poljubnim kotom glede na normalo mejne ravnine. Valovni vektorji so v tem kolinearni, Poyntingovi vektorji pa imajo različne smeri.

Za izredni val s TM polarizacijo (električna poljska jakost leži v vpadni ravnini) pa velja

$$\sin \vartheta_1 = n(\vartheta_e) \sin \vartheta_e, \quad (1.72)$$

pri čemer  $n(\vartheta_e)$  izračunamo iz enačbe (1.70).

Kadar vpada valovanje pravokotno na izotropno snov, se žarek ne lomi. V dvolomnih snoveh pa lahko tudi pri pravokotnem vpadu pride do razklona žarkov (slika 1.9 b). Kadar je optična os nagnjena glede na vpadnico, sta valovna vektorja obeh prepuščenih žarkov sicer vzporedna valovnemu vektorju vpadnega žarka ( $\mathbf{k}_1 \parallel \mathbf{k}_o \parallel \mathbf{k}_e$ ), razlikujejo pa se smeri Poyntingovih vektorjev ( $\mathbf{S}_1 \parallel \mathbf{S}_o \not\parallel \mathbf{S}_e$ ). Ob prehodu skozi plast anizotropne snovi tako nastaneta dva vzporedna, a razmaknjena žarka z medsebojno pravokotnimi polarizacijami. Enosne kristale, odrezane pod primernim kotom in prave dolžine, zato lahko uporabimo kot polarizacijski delilnik žarkov.

## 2. Koherenca

V tem poglavju bomo spoznali koherenco. To je lastnost valovanja, ki je tesno povezana s pojavom interference. Ohlapno pravimo, da je koherentno tisto valovanje, s katerim se posrečijo interferenčni poskusi.

### 2.1 Youngov poskus

Interferenčnih pojavov ni mogoče opazovati z vsakim svetlobnim izvorom. Da bi to razumeli, si oglejmo interference valovanja, ki vpada na dve ozki reži (tako imenovani Youngov poskus<sup>1</sup>). Navadno predpostavimo, da sta obe reži osvetljeni z istim ravnim valom. Delni valovanji, ki izhajata iz rež, imata tako ves čas poskusa enako polarizacijo, enako frekvenco in enako fazno razliko. Zaradi različnih dolžin poti obeh delnih valovanj od reže do dane točke na zaslono nastane na oddaljenem zaslono interferenčni vzorec (slika 2.1). Vendar se interference pojavi le v primeru, ko je faza valovanja, ki vpada na reži, konstantna. Svetloba s konstantno fazo je koherentna in nastane, na primer, v kvalitetnem laserju. Svetloba iz običajnih svetil ne da interferenčnega vzorca, zato zanjo pravimo, da ni koherentna.



Slika 2.1: Youngov poskus na dveh režah. Le če je vpadno valovanje koherentno (levo), se pojavi na zaslono interferenčni vzorec. Nekoherentno valovanje s spremenljivo fazo (desno) ne da interferenčnega vzorca.

Svetloba navadnih svetil, na primer plinskih razelektritvenih cevi, je zaradi vrste nastanka kaotične narave. Atomi sevajo neodvisno, zato se faza izsevanega valovanja spreminja. Približno konstantna je le znotraj nekega karakterističnega časa. Če je pri interferenčnem poskusu karakteristični čas spremicanja faze krajši od zakasnitve med valovanjem, ki nastane zaradi različno dolgih poti, pride na danem mestu zaslona do izmenično konstruktivne in destruktivne interference. Ker je čas spremicanja praviloma bistveno krajši od časa opazovanja interference, utripanje svetlobe na zaslono ni vidno. Interferenčni poskus se ne posreči zaradi majhne časovne koherence, karakterističnemu času spremicanja faze pa rečemo koherenčni čas  $t_c$ . Časovno koherenco bomo natančneje obravnavali v razdelku (2.3), zaenkrat povejmo le, da je časovna koherenca vezana na fazno razliko med dvema točkama, ki ležita vzdolž smeri širjenja valovanja.

<sup>1</sup>Angleški znanstvenik Thomas Young, 1773–1829.

Poleg časovne koherence na interferenčno sliko pomembno vpliva tudi prostorska koherenca, ki je posledica končne dimenzijske svetlobe. Svetloba, ki vpada na reži z različnih delov svetlobe, ima namreč različno fazo zaradi različnih dolžin poti od svetlobe do rež. Ta faza se prišteje fazni razliki zaradi različno dolgih poti od rež do zaslona, zaradi česar se na zaslolu interferenčne proge nekoliko premaknejo. Če je fazna razlika žarkov iz različnih delov svetlobe večja od fazne razlike za režami, se celotna interferenčna slika na zaslolu izpopreči. Interferenca se pri Youngovem poskusu pojavi, kadar sta reži razmiknjeni le toliko, da je povprečna fazna razlika manjša od  $2\pi$ . Največjemu prečnemu razmiku, ki še da interferenco, rečemo prečna koherenčna razdalja  $d_c$ . Prostorska koherenca, ki jo bomo podrobnejše spoznali v razdelku (2.5), je torej vezana na fazno razliko med dvema točkama, ki ležita prečno na smer širjenja valovanja.

Poudarimo še enkrat, da je pojem koherenčnosti statističen. Če je koherenčni čas  $t_c$  dolg v primerjavi s časom opazovanja, se vedno seštevajo amplitude valovanj in pojavi se interferenčna slika. Ta se slučajno spreminja z značilnim časom  $t_c$ . Če pa so razlike poti večje od  $ct_c$  ali razmik rež večji od  $d_c$ , gledamo le povprečno sliko in interferenčne proge izginejo.

## 2.2 Koherenca navadnih svetil

Obravnavajmo plinsko razelektritveno cev in z ustreznim filtrom izberimo eno samo spektralno črto. Ta črta naj ima osrednjo frekvenco  $v_0$  in končno frekvenčno širino  $\delta v$ , ki je kombinacija naravne širine in razširitve zaradi trkov med atomi ter Dopplerjevega pojava (glej poglavje 5.8). Privzemimo, da je glavni prispevek k razširitvi spektralne črte zaradi medatomskih trkov, razširitev, povezano z Dopplerjevim pojavom, pa zanemarimo.

Celotna izsevana svetloba je vsota delnih valov, ki izhajajo iz posameznih atomov in so med seboj neodvisni. Vsak delni val ohranja konstantno fazo med dvema trkoma, to je v časovnem intervalu  $t_c$ . Valovni paket dolžine  $t_c$  mora vsebovati frekvence v pasu  $\Delta\omega$ , za katerega velja  $t_c\Delta\omega \sim 1$ . Koherenčni čas je torej kar reda velikosti obratne vrednosti spektralne širine svetlobe. Povsem monokromatsko valovanje bil imelo neskončen koherenčni čas in bi bilo popolno koherentno.

Zapišimo še izsevano polje takega svetila. Jakost električnega polja v izbrani točki prostora je vsota delnih valov, ki izvirajo iz raznih delov izvora. Vsak atom v izvoru, naj jih bo  $N$ , seva neodvisno, zato so tudi delna valovanja med seboj neodvisna. Posamična valovanja ohranjajo konstantno fazo v času med dvema trkoma atoma,  $t_c$ . Zaradi enostavnosti privzemimo, da so amplitudi  $E_1$  in polarizacije izsevanih polj posameznih atomov enake. Električno poljsko jakost  $E$  v izbrani točki prostora lahko zapišemo kot vsoto posameznih prispevkov

$$E = E_1 \sum_{n=1}^N e^{i\phi_n(t)}. \quad (2.1)$$

kjer se faza polja  $\phi_n(t)$ , ki ga izseva posamezni atom, naključno spremeni ob trku z drugim atomom. Povprečje vsote polj je nič, povprečni kvadrat skupnega polja, ki je sorazmeren z gostoto svetlobnega toka, pa je  $NE_1^2$ . Zaradi slučajnosti faz je slučajna tudi faza celotnega polja in se gotovo povsem spremeni v času, ko se spremeni faza posameznih prispevkov, to je  $t_c$ . S tako svetlobo bomo videli interferenco na režah, če bo razlika poti delnih valovanj manjša od  $ct_c$ .

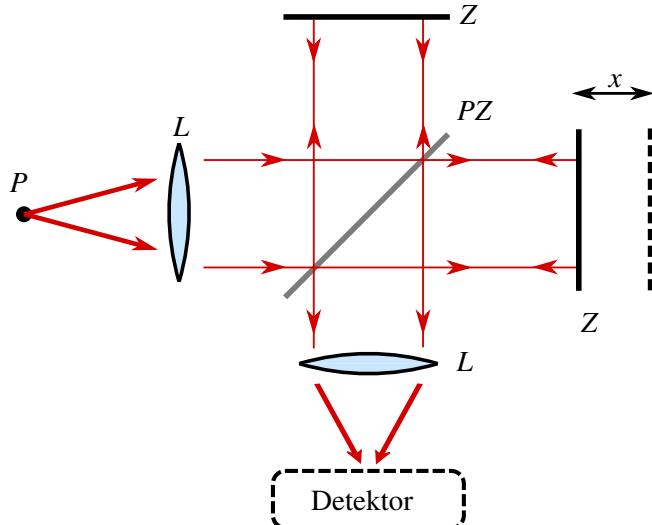
Oglejmo si izračun na primeru. Imejmo  $N = 100$  neodvisnih atomov, ki se jim faza naključno spreminja s karakterističnim časom  $t_c = 10/v$ , kjer je  $v$  frekvanca valovanja. Na sliki (2.2) sta prikazana časovna poteka amplitude  $E$  (enačba 2.1) in  $|E|^2$ , ki je sorazmeren z intenzitetu svetlobe. Za primerjavo je prikazan tudi ravni val  $E = \sqrt{N}E_1 e^{-i\omega t}$  s konstantno fazo in njegova intenziteta. Intenziteta ravnega vala je konstantna, medtem ko je povprečna intenziteta svetlobe navadnega svetila približno konstantna le znotraj  $t_c$ .



Slika 2.2: Zgoraj: shematski prikaz električne poljske jakosti ravnega vala s konstantno fazo (rdeča črta) in električne poljske jakosti navadnega svetila (modra črta) kot funkcije časa. Faza polja se naključno spreminja s karakterističnim časom  $t_c$ . Spodaj: intenziteta ravnega vala (rdeča črta) in intenziteta svetlobe navadnega svetila (modra črta) kot funkciji časa. Modra črtkana črta je povprečna intenziteta  $\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E(t+t')E^*(t+t')dt'$  s časom integracije  $T = t_c$ .

### 2.3 Časovna koherenca

Časovno koherenco je najlažje obravnavati z Michelsonovim interferometrom<sup>2</sup>, ki je prikazan na sliki (2.3).



Slika 2.3: Michelsonov interferometer. Svetlobo iz izvora  $P$  usmerimo preko kolimacijske leče ( $L$ ) na polprepustno zrcalo ( $PZ$ ), s čimer jo razdelimo na dva snopa. S premikom enega zrcala ( $Z$ ) en delni žarek zakasnimo. Interferenco opazujemo na detektorju.

<sup>2</sup>Ameriški fizik in nobelovec Albert Abraham Michelson, 1852–1931.

Valovanje iz točke  $P$  na polprepustnem zrcalu razdelimo na dva delna snopa, nato enega s premikanjem zrcala zakasnimo za  $\tau = 2x/c$ . S kolimacijsko lečo dosežemo, da je čim več žarkov, ki izhajajo iz  $P$ , vzporednih z osjo interferometra. Dokler je zakasnitev  $\tau$  manjša od koherenčnega časa  $t_c$ , so na detektorju interferenčni vrhovi in doline. Pri zakasnitvah, ki so večje od koherenčnega časa, ni stalne fazne povezave, interferenčna slika se spreminja in v daljših časih izpovpreči. Zapišimo to ugotovitev še matematično.

Svetlobni tok na detektorju je sorazmeren s kvadratom električne poljske jakosti obeh delnih valovanj

$$|E_d(t)|^2 = |E(t) + E(t + \tau)|^2 = |E(t)|^2 + |E(t + \tau)|^2 + 2\Re E(t)E^*(t + \tau). \quad (2.2)$$

Zakasnitev  $\tau$  je določena s premikom pomičnega zrcala,  $\tau = 2x/c$ . Navadno opazujemo v času  $T$ , ki je dolg v primerjavi s koherenčnim časom, zato povprečimo po času

$$\begin{aligned} \langle |E_d|^2 \rangle &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} |E_d(t)|^2 dt \\ &= 2\langle |E|^2 \rangle + 2\Re \langle E(0)E^*(\tau) \rangle = 2\langle |E|^2 \rangle + 2\Re G(\tau). \end{aligned} \quad (2.3)$$

Prvi člen je vsota povprečnih svetlobnih tokov obeh delnih snopov. Privzeli smo, da je polje v povprečju stacionarno in je zato povprečje neodvisno od izbire časovnega intervala. Drugi člen opisuje interferenco. Pri tem smo vpeljali časovno avtokorelacijsko funkcijo električnega polja

$$G(\tau) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E(t)E^*(t + \tau) dt. \quad (2.4)$$

Za majhne zakasnitve  $\tau$  je  $|G(\tau)| \approx |G(0)| = 1$  in na detektorju zaznamo interferenco. Za zakasnitve  $\tau$ , ki so precej večje od koherenčnega časa  $t_c$ , sta polji  $E(0)$  in  $E(\tau)$  statistično neodvisni in povprečje produkta je enako produktu povprečij. Ker je  $\langle E(t) \rangle = 0$ , pri velikih zakasnitvah  $\tau$  interferenčni člen izgine in svetlobni tok je enak vsoti tokov posameznih delnih snopov.

Priročno je vpeljati normirano avtokorelacijsko funkcijo

$$g(\tau) = \frac{G(\tau)}{G(0)}. \quad (2.5)$$

Za povsem koherentno valovanje je  $|g(\tau)| = 1$ , za povsem nekoherentno valovanje je  $|g(\tau)| = 0$ , za delno koherentna pa  $0 < |g(\tau)| < 1$ . Praviloma se vrednost  $|g(\tau)|$  z naraščajočim  $\tau$  zmanjšuje, saj postaja valovanje za velike časovne zamike vedno manj korelirano. Ohlapno povedano je koherenčni čas zakasnitev, pri kateri postane vrednost avtokorelacijske funkcije majhna. Koherenčni čas  $t_c$  pa lahko tudi bolj natančno definiramo z normirano avtokorelacijsko funkcijo

$$t_c = \int_{-\infty}^{\infty} |g(\tau)|^2 d\tau. \quad (2.6)$$

Zakasnitev delnih valov je pogosto posledica različno dolgih optičnih poti, zato pogosto namesto koherenčnega časa uporabljamo koherenčno dolžino  $l_c = ct_c$ . Pri tem moramo paziti, da koherenčne dolžine, ki jo izpeljemo iz časovne koherence, ne zamešamo s prečno koherenčno razdaljo, o kateri bomo govorili kasneje.

**Naloga 2.3.1** Pokaži, da v navedenih avtokorelacijskih funkcijah  $g(\tau)$  spremenljivka  $t_c$  ustreza koherenčnemu času, kot je definiran v enačbi (2.6), in izračunaj  $|g(t_c)|$  za oba primera.

$$g(\tau) = \begin{cases} \exp(i\omega_0\tau - |\tau|/t_c), \\ \exp(i\omega_0\tau - \pi\tau^2/2t_c^2), \end{cases} \quad (2.7)$$

V razdelku (5.8) bomo spoznali, da sta to avtokorelacijski funkciji za svetlobo z Lorentzovim spektrom (razširitev spektralne črte zaradi trkov) in Gaussovim spektrom (Dopplerjeva razširitev).

Poglejmo še nekaj značilnih koherenčnih dolžin. Koherenčna dolžina svetlobe, izsevana iz črnega telesa, je  $l_c = ct_c \approx \hbar c/k_B T$  (glej nalogo 2.4.3). Svetloba s Sonca ( $T \approx 6000$  K) ima tako koherenčno dolžino zgolj  $\sim 0,4 \mu\text{m}$ . Svetloba, izsevana iz LED sijalk, ima koherenčno dolžino  $\sim 20 - 100 \mu\text{m}$ . Če želimo povečati koherenčno dolžino taki svetlobi, jo moramo usmeriti na ustrezne filtre in ji s tem zmanjšati spektralno območje. Ožje spektralno območje ima na primer živosrebrna svetilka, zato je koherenčna dolžina svetlobe za izbrano spektralno črto do okoli 50 cm. Koherenčna dolžina laserjev z ozko spektralno črto je tipično okoli 100 m, v nekaterih vlakenskih laserjih s širino spektralne črte nekaj kHz pa koherenčna dolžina presega 100 km.

## 2.4 Zveza med avtokorelacijsko funkcijo in spektrom

Spoznali smo, da je monokromatski ravni val povsem koherenten in njegov korelacijski čas neskončno velik. Oglejmo si še koherenco elektromagnetnega vala, ki traja čas  $T$  in je sestavljen iz več monokromatskih valov. Jakost električnega polja valovanja razvijemo v Fourierovo vrsto:

$$E(t) = \sum_n A_n e^{-in\Delta\omega t}, \quad \Delta\omega = \frac{2\pi}{T}, \quad (2.8)$$

kjer amplituda  $A_n$  označuje delež polja pri frekvenci  $\omega = n\Delta\omega$ . Čas  $T$ , ki označuje čas opazovanja svetlobnega polja, mora biti bistveno daljši od  $t_c$ . Pravzaprav bi morali napraviti limito  $T \rightarrow \infty$ , da bi rezultat ne bil odvisen od konkretnega vzorca svetlobnega polja. Izračunamo amplitudo  $A_n$

$$A_n = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} E(t) e^{in\Delta\omega t} dt. \quad (2.9)$$

Kvadrat  $|A_n|^2$  je sorazmeren gostoti svetlobnega toka pri frekvenci  $\omega = n\Delta\omega$ . Zdaj lahko vpeljemo spekter, to je intenziteto svetlobnega toka pri frekvencah med  $\omega$  in  $\omega + \Delta\omega$ . Spekter  $S(\omega)$  torej izračunamo tako, da jakost svetlobnega toka pri  $\omega$  delimo s frekvenčnim intervalom  $\Delta\omega$ . Spekter je potem<sup>3</sup>

$$S(\omega) = \frac{|A_n|^2}{\Delta\omega} = \frac{T}{2\pi} |A_n|^2. \quad (2.10)$$

Vstavimo zdaj še amplitudo  $A_n$  (enačba 2.9) in dobimo

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi T} \int \int_{-T/2}^{T/2} E(t) E^*(t') e^{-i\omega(t'-t)} dt dt' \quad (2.11)$$

$$= \frac{1}{2\pi T} \int_{-T/2}^{T/2} e^{-i\omega\tau} d\tau \int_{-T/2}^{T/2} E(t) E^*(t+\tau) dt, \quad (2.12)$$

<sup>3</sup>Gostota svetlobnega toka je  $j = \epsilon\epsilon_0c|E|^2/2$  z enotami  $\text{W/m}^2$ . Zaradi poenostavitev bomo namesto  $j$  pogosto pisali intenziteto  $I = |E|^2$ , konstantne člene pa dodali le, če bomo rabili točno numerično vrednost.

kjer smo uvedli novo spremenljivko  $\tau = t' - t$ . Integral po  $t$  da ravno korelacijsko funkcijo  $G(\tau)$ . Ker je  $T \gg t_c$ , je korelacijska funkcija na mejah integracije po  $\tau$  nič, zato lahko meje raztegnemo do neskončnosti. S tem dobimo iskano zvezo, tako imenovani Wiener-Hinčinov teorem<sup>4</sup>

$$S(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \iff G(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega. \quad (2.13)$$

Spekter svetlobe je torej Fourierova transformacija avtokorelacijske funkcije svetlobnega polja.

Vpeljemo lahko tudi normirani spekter

$$s(\omega) = \frac{S(\omega)}{\int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega} = \frac{S(\omega)}{G(0)}, \quad (2.14)$$

za katerega seveda velja

$$\int_{-\infty}^{\infty} s(\omega) d\omega = 1. \quad (2.15)$$

Sledi

$$s(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) e^{-i\omega\tau} d\tau \iff g(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s(\omega) e^{i\omega\tau} d\omega. \quad (2.16)$$

Iz Wiener-Hinčinovega teorema (enačba 2.13) neposredno sledi, da je koherenca povezana s spektrom in koherenčni čas  $t_c$  s spektralno širino svetlobe. Spektralno širino vpeljemo kot

$$\gamma = \frac{1}{2\pi} \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) d\omega \right|^2}{\int_{-\infty}^{\infty} |S(\omega)|^2 d\omega} = \frac{1}{2\pi \int_{-\infty}^{\infty} |s(\omega)|^2 d\omega}. \quad (2.17)$$

Iz gornje definicije za spektralno širino in definicije za koherenčni čas (enačba 2.6) sledi, da je spektralna širina ne glede na obliko spektra obratno sorazmerna s koherenčnim časom (glej nalogo 2.4.1):

$$\gamma = \frac{1}{t_c}. \quad (2.18)$$

**Naloga 2.4.1** Iz definicij za spektralno širino  $\gamma$  (enačba 2.17) in koherenčni čas  $t_c$  (enačba 2.6) pokaži, da je spektralna širina obratno sorazmerna s koherenčnim časom (enačba 2.18) ne glede na obliko spektra. Namig: Uporabi Parsevalov teorem, ki pravi:

$$\int_{-\infty}^{\infty} |f(t)|^2 dt = 2\pi \int_{-\infty}^{\infty} |F(\omega)|^2 d\omega, \quad (2.19)$$

kjer je

$$F(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} d\tau \quad (2.20)$$

Fouriereva transformiranka funkcije  $f(t)$ .

<sup>4</sup>Ameriški matematik Norbert Wiener, 1894–1964, in ruski matematik Aleksander Jakovljevič Hinčin, 1894–1959.

Za zgled vzemimo konkreten primer, ki je predstavljen na sliki (2.2). Na sliki (2.4) sta prikazana pripadajoč spekter in ustrezna avtokorelacijska funkcija. Ker so trki med atomi naključni, je avtokorelacijska funkcija eksponentno pojemača

$$G(t) = G_0 e^{-i\omega_0 t} e^{-t/t_c}, \quad (2.21)$$

spekter take svetlobe pa je Lorentzove oblike (glej nalogo 2.4.2)

$$S(\omega) = G_0 \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{(\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2}, \quad (2.22)$$

kjer je  $\gamma = 1/t_c$  spektralna širina in  $G_0$  do konstante natančno intenziteta svetlobe. Točke na grafih predstavljajo spekter in izračunano avtokorelacijsko funkcijo za integracijski čas  $T = 100t_c$ . Za primerjavo sta z rdečo krivuljo prikazana tudi pričakovani spekter in avtokorelacijska funkcija (enačba 2.22). Zaradi končnega časa  $T$  pri izračunu povprečja se izmerjeni spekter nekoliko razlikuje od pričakovane vrednosti.



Slika 2.4: Spekter in avtokorelacijska funkcija valovanja s slike (2.2)

**Naloga 2.4.2** Imejmo dve vrsti svetlobe. Prva naj ima avtokorelacijsko funkcijo, ki je eksponentno pojemača, druga pa ima avtokorelacijsko funkcijo Gaussove oblike (enacbi 2.7). Pokazi, da sta njuna spektra oblike

$$s(\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{(\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2} \quad \text{in} \quad s(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}\pi\gamma} \exp\left(-\frac{(\omega - \omega_0)^2}{2\pi\gamma^2}\right), \quad (2.23)$$

kjer je  $\gamma = 1/t_c$  spektralna širina.

Spektralne črte atomov so pogosto Lorentzove oblike, kar je posledica eksponentnega razpada stanj (naravna širina). Dodatno se spektralne črte razširijo zaradi trkov med atomi, vendar tudi to vodi do Lorentzove oblike spektra. V plinih pa je pogostokrat prevladujoča razširitev črt zaradi Dopplerjevega pojava (glej razdelek 5.8). Spekter Dopplerjevo razširjene svetlobe je, kot bomo videli v nadaljevanju, Gaussove oblike. V tem primeru iz enačbe (2.13) sledi, da je tudi avtokorelacijska funkcija Gaussove oblike.

**Naloga 2.4.3** Numerično pokaži, da je koherenčni čas svetlobe, ki jo oddaja črno telo s temperaturo  $T$ , približno enak  $t_c \approx \hbar/k_B T$ . Normaliziran spekter sevanja črnega telesa zapišemo kot Planckov spekter

$$s(\omega) = \frac{15}{\pi^4} \frac{\hbar^4 \omega^3}{(kT)^4} / \left( e^{\hbar\omega/kT} - 1 \right) \quad \text{za } \omega > 0, \text{ sicer } s(\omega) = 0. \quad (2.24)$$



### Fouriereva spektroskopija

V prejšnjem razdelku smo videli, da časovno avtokorelacijsko funkcijo merimo z Michelsonovim interferometrom. Dobljena povezava med avtokorelacijo in spektrom je osnova za Fourierevo spektroskopijo, ki ima nekatere pomembne prednosti pred drugimi metodami in se danes precej uporablja, posebej v infrardečem področju.

## 2.5 Prostorska koherenca

Vrnimo se k Youngovem poskusu in obravnavi interference na dveh ozkih režah. Osvetljujmo zdaj reži s svetilom končnih razsežnosti. Svetilo naj še vedno sveti skoraj enobarvno svetlobo in naj bo na simetrali med režama, kot kaže slika (2.5).



Slika 2.5: Shema interferenčnega eksperimenta z razsežnim svetilom. Svetilo velikosti  $R$  postavimo v izhodišče koordinatnega sistema, na zaslonu  $B$  pa opazujemo sliko, ki nastane zaradi interference na dveh režah v ravnini  $A$ . Zaradi končne dimenzije svetila so interferenčne proge, ki jih tvorita robna žarka, premaknjene glede na proge centralnih žarkov. Če je razlika poti za žarke z roba reda velikosti valovne dolžine  $\lambda$  ali več, se celotna interferenčna slika na zaslonu  $B$  izpovpreči.

Žarka, ki izhajata iz sredine svetila (polna črta), opravita do rež v ravnini  $A$  enako dolgo pot in povzročita na zaslonu  $B$  interferenčne proge. Žarka, ki izhajata iz roba izvora (prekinjena črta), imata do rež različno dolgo pot, zato nastane med njima fazna razlika že do ravnine  $A$ , ki se prišteje fazni razlici do ravnine  $B$ . Interferenčne proge, ki jih tvorita robna žarka, so premaknjene glede na proge centralnih žarkov. Ker so žarki z roba pri našem svetilu statistično neodvisni od žarkov iz sredine, z njimi ne interferirajo. Celoten interferenčni vzorec je zato kar vsota interferenčnih vzorcev žarkov iz različnih delov svetila. Če je razlika poti za žarke z roba reda velikosti valovne dolžine  $\lambda$  ali več, se celotna interferenčna slika na zaslonu  $B$  izpovpreči.

S slike razberemo, da velja za razdaljo med režama  $d$ , pri kateri interferenčne proge izginejo, približno

$$\delta s = d \sin \varphi \approx d \frac{R}{z} \sim \lambda \Rightarrow d_c \sim \frac{z\lambda}{R}, \quad (2.25)$$

Kjer  $d_c$  imenujmo prečno koherenčno razdaljo. Pogosto uporabljajo tudi pojem koherenčne ploskve, to je območja, v katerem je fazna razlika v povprečju konstantna. Velikost te ploskve je približno  $d_c^2$ . V območju koherenčne ploskve so tudi valovne fronte približno gladke.

Zapišimo gornje ugotovitve nekoliko bolj natančno. Na zaslonu  $B$  izmerimo gostoto svetlobnega toka, ki je sorazmerna povprečju kvadrata električne poljske jakosti valovanj, ki izhajata iz obeh odprtin

$$\begin{aligned} \langle |E_d|^2 \rangle &= \langle |K_1 E_1 + K_2 E_2|^2 \rangle \\ &= |K_1|^2 \langle |E_1|^2 \rangle + |K_2|^2 \langle |E_2|^2 \rangle + 2\Re K_1 K_2^* \langle E_1(0) E_2^*(\tau) \rangle. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Pri tem je  $\tau = d \sin \vartheta / c$  zakasnitev valovanja iz druge odprtine glede na valovanje iz prve. Faktorja  $K_1$  in  $K_2$  sta določena z uklonom na posameznih odprtinah. Interferenčna slika je vsebovana v podobnem členu kot pri Michelsonovem interferometru, le da nastopa v tem primeru namesto avtokorelacijske funkcije navzkrižna korelacijska funkcija polj  $E_1$  in  $E_2$  iz obeh odprtin.

Kako je interferenčni člen povezan z lastnostmi svetila, brez težav doženemo v izbranem primeru skoraj enobarvne svetlobe z osrednjo frekvenco  $\omega$ . Tedaj lahko za zakasnitve  $\tau$ , ki so krajše od koherenčnega časa, zapišemo

$$E_2(\tau) = E_2(0) e^{-i\omega\tau} \quad (2.27)$$

in

$$\langle E_1(0) E_2^*(\tau) \rangle = \langle E_1(0) E_2^*(0) \rangle e^{i\omega\tau} = J(P_1, P_2) e^{i\omega\tau}. \quad (2.28)$$

Zadnji člen  $\Re e^{i\omega\tau} = \cos(\omega\tau) = \cos(kd \sin \vartheta)$  da interferenčne proge za koherentno osvetlitev zaslona  $A$ , povprečje produkta polj v odprtinah ob istem času  $J(P_1, P_2) = \langle E(P_1, 0) E^*(P_2, 0) \rangle$  pa meri stopnjo prečne koherence med obema odprtinama. Od velikosti tega člena je odvisen kontrast interferenčnih prog. Izračunajmo ga.

Polje v posamezni odprtini je vsota prispevkov iz celega izvora.

$$E(P_j) = -\frac{i}{\lambda} \int E(\xi, \eta) \frac{e^{iks_j}}{s_j} d\xi d\eta. \quad (2.29)$$

Pri tem je  $s_j$  razdalja med točko  $(\xi, \eta)$  na izvoru in točko  $P_j(x_j, y_j)$  na reži v ravni A (glej sliko 2.5). Faktor pred integralom  $-i/\lambda$  smo dobili iz uklonske teorije (enačba 1.55). Tako je

$$J(P_1, P_2) = \frac{1}{\lambda^2} \int \int \langle E(\xi, \eta) E^*(\xi', \eta') \rangle \frac{e^{ik(s_1 - s'_2)}}{s_1 s'_2} d\xi d\eta d\xi' d\eta'. \quad (2.30)$$

V našem svetilu sevajo atomi neodvisno. Valovanji iz dveh točk svetila, ki sta razmaknjeni za več kot  $\lambda$ , sta tako neodvisni in povprečje njunega produkta je enako nič. Tako približno velja

$$\langle E(\xi, \eta) E^*(\xi', \eta') \rangle = \frac{\lambda^2}{\pi} \cdot \delta(\xi - \xi', \eta - \eta') \langle |E(\xi, \eta)|^2 \rangle. \quad (2.31)$$

Faktor  $\lambda^2/\pi$  poskrbi za ustrezno normalizacijo. Naj bo oddaljenost svetila od zaslona  $A$  mnogo večja od dimenzije svetila ( $z \gg R$ ), tako da lahko imenovalec pod integralom v izrazu (2.30) nadomestimo z  $z^2$  in postavimo pred integral. Dobimo

$$J(P_1, P_2) = \frac{1}{\pi z^2} \int \langle |E(\xi, \eta)|^2 \rangle e^{ik(s_1 - s_2)} d\xi d\eta. \quad (2.32)$$

Dobljeni izraz lahko še nekoliko poenostavimo, če razvijemo  $s_1$  in  $s_2$  do drugega reda:

$$s_j = \sqrt{z^2 + (x_j - \xi)^2 + (y_j - \eta)^2} \approx z + \frac{(x_j - \xi)^2 + (y_j - \eta)^2}{2z}, \quad (2.33)$$

kjer sta  $(x_j, y_j)$  koordinati točke  $P_j$ . Pišimo še  $\langle |E(\xi, \eta)|^2 \rangle = I(\xi, \eta)$ , ki je do konstante natančno enak intenziteti valovanja, ter  $x_2 - x_1 = \Delta x$  in  $y_2 - y_1 = \Delta y$ . S tem dobimo znani rezultat, tako imenovani van Cittert-Zernikov teorem<sup>5</sup>

$$J(\Delta x, \Delta y) = \frac{e^{-i\phi}}{\pi z^2} \int I(\xi, \eta) e^{ik \frac{\Delta x \xi + \Delta y \eta}{z}} d\xi d\eta. \quad (2.34)$$

Faza

$$\phi = \frac{\pi}{\lambda z} [(x_2^2 + y_2^2) - (x_1^2 + y_1^2)] \quad (2.35)$$

meri skupni premik interferenčnih prog, do katerega pride, kadar svetilo ni na isti osi kot odprtini v zaslonu. Kadar ležijo svetilo in odprtini v zaslonu  $A$  simetrično na isti osi, je faza  $\phi$  enaka nič.

Smiselno je vpeljati še normalizirano prečno prostorsko korelacijsko funkcijo

$$j(\Delta x, \Delta y) = \frac{J(\Delta x, \Delta y)}{J(0, 0)} = \frac{e^{-i\phi} \int I(\xi, \eta) \exp[ik(\Delta x \xi + \Delta y \eta)/z] d\xi d\eta}{\int I(\xi, \eta) d\xi d\eta}. \quad (2.36)$$

Dobljeni rezultat si je vredno nekoliko ogledati. Prečno prostorsko korelacijsko funkcijo  $J(P_1, P_2)$ , ki določa kontrast interferenčnih prog, smo izrazili kot 2-D Fourierovo transformacijo intenzitete svetlobe na samem svetilu (enačba 2.34). Ob tem se spomnimo, da velja podobna zveza med električno poljsko jakostjo v osvetljeni odprtini in njenega Fraunhoferjevo uklonsko sliko (enačba 1.63), pri čemer so količine, ki nastopajo v obeh zvezah, povsem različne. Različna je tudi veljavnost obeh: medtem ko je Fraunhoferjeva uklonska formula veljavna le v veliki oddaljenosti, za bližje odprtine pa je treba uporabiti Fresnelov izraz (enačba 1.64), je rezultat za  $J(P_1, P_2)$  veljaven v obeh območjih.

Ker je velikost svetila končna,  $J(P_1, P_2)$  pri dovolj veliki razdalji med točkama  $P_1$  in  $P_2$  gotovo pade na nič. Največja razdalja, do katere je  $J(P_1, P_2)$  še različna od nič, je ravno prečna koherenčna razdalja  $d_c$ , ustrezna ploskev pa je koherenčna ploskev  $S_c$ . Iz izraza za koherenčno razdaljo (enačba 2.25) jo lahko ocenimo

$$S_c \sim \frac{(\lambda z)^2}{S_0} \sim \frac{\lambda^2}{\Omega_0}, \quad (2.37)$$

kjer je  $S_0$  površina svetila,  $\Omega_0$  pa prostorski kot, pod katerim je videti svetilo v ravnini  $A$ .

---

<sup>5</sup>Nizozemski fizik Pieter Hendrik van Cittert, 1889–1959, in nizozemski fizik in nobelovec Frits Zernike, 1888–1966.

Oglejmo si primer. Naj bo svetilo v obliki kroga s polmerom  $R$ , obe odprtini v zaslonu naj imata koordinati  $y$  enaki nič, razmak med režama v smeri  $x$  pa naj bo  $d$ . Za prečno korelacijsko funkcijo dobimo iz enačbe (2.34)

$$J(0, \Delta y) = 2 \frac{R^2 I_0}{z^2} \frac{J_1(kRd/z)}{kRd/z}, \quad (2.38)$$

kjer je  $J_1(x)$  Besselova funkcija. V ničlah Besselove funkcije pade prečna korelacijska funkcija  $J$  na nič in interferenčnega vzorca ne vidimo. Za prečno koherenčno razdaljo je zato smiselno vzeti ravno prvo ničlo, to je pri

$$d_c \approx 3,83 \frac{z}{kR} = 0,61 \frac{\lambda z}{R}. \quad (2.39)$$

Doslej smo obravnavali le valovanje v središču interferenčne slike na zaslonu  $B$ , to je pri tako majhnih kotih  $\vartheta$ , da je zakasnitev manjša od koherenčnega časa. Pri večjih kotih moramo upoštevati še vpliv končnega koherenčnega časa, zaradi česar se kontrast interferenčnih prog še dodatno zmanjšuje. Interferenčna slika je tako produkt časovnega in prostorskega dela.

V primeru dveh zelo tankih rež z razmikom  $d$  nastanejo na zaslonu  $B$  uklonski vrhovi. Za nekaj različnih razmikov med odprtinama  $d$  je intenziteta svetlobe na zaslonu prikazana na sliki (2.6). Če je  $d \ll \lambda z/R$  (slika a), je modulacija interferenčnih prog v sredini popolna in se zaradi končnega koherenčnega časa zmanjšuje le pri večjih kotih  $\vartheta$ . Pri nekaj večjem razmiku (slika b) tudi v sredini kontrast ni več popoln. Obenem se interferenčne proge zgostijo. Kadar je  $d \approx 3,83 z/kR$ , dosežemo prvo ničlo Besselove funkcije  $J_1(x)$  in interferenčni vzorec prvič izgine (slika c). Takrat je razdalja med režama ravno enaka koherenčni razdalji valovanja. Pri še večjih razmikih (slika d) je Besselova funkcija negativna in ponovno se pojavijo interferenčne proge, vendar so slabše izražene in z nasprotno fazo, kar nam da v sredini temno progno.



Slika 2.6: Interferenčna slika na zaslonu  $B$  za različne vrednosti razmikov med odprtinama: a)  $d = z/kR$ , b)  $d = 2z/kR$ , c)  $d = 3,832z/kR$  in d)  $d = 5,136z/kR$ . Z večanjem razdalje med režama se proge zgostijo in kontrast se zmanjša. Koherenčni čas svetlobe je  $t_c = 10/\omega$ , kar še dodatno zmanjšuje modulacijo interferenčnih prog. Pri  $d = 3,832z/kR$  dosežemo prvo ničlo Besselove funkcije in interferenčni vzorec popolnoma izgine. Nato se interferenčne proge zopet pojavijo, vendar z manjšim kontrastom in nasprotno fazo.



Merjenje prečne koherenčne razdalje svetlobe zvezd je osnova za Michelsonovo metodo določanja zvezdnih premerov. Svetobo izbrane zvezde zberejo v teleskop preko dveh manjših parov zrcal, kjer sta zunanji zrcali na pomicnih rokah, tako da jih je mogoče razmikati. Glavno zrcalo teleskopa zbere svetlobna snopa v goriščni ravnini, kjer nastanejo interferenčne proge, če le pomicni zrcali nista preveč razmiknjeni. Iz razmika, pri katerem interferenčne proge izginejo, je mogoče določiti premere bližnjih svetlih zvezd. Za zvezdo s polmerom  $10^6$  km v razdalji 5 svetlobnih let je prečna koherenčna razdalja za zeleno svetobo okoli 15 m, kar je z Michelsonovim zvezdnim interferometrom mogoče izmeriti. Pri zvezdah, ki so dlje od nekaj deset svetlobnih let, metoda odpove.

**Naloga 2.5.1** Svetloba s frekvenco  $\omega$  in koherentnim časom  $t_c$  izhaja iz svetila s polmerom  $R$  in vpada na zaslon, ki je z oddaljen od svetila. V zaslonu sta dve zelo ozki reži na razmiku  $d$ . Pokaži, da je uklonska slika za zaslonom enaka

$$\frac{I}{I_0} = \left(1 + 2 \frac{J_1(kRd/z)}{kRd/z} \cos(\omega\tau) e^{-\tau/t_c}\right), \quad (2.40)$$

kjer je  $\tau = d \sin \vartheta/c$  zakasnitev žarkov iz rež na zaslonu.

---

### 3. Koherentni snopi svetlobe

V tem poglavju bomo zapisali obosni približek valovne enačbe in spoznali njeno osnovno rešitev: Gaussov snop. Obravnavali bomo snope osnovnega in višjega reda ter se naučili računati prehode Gaussovih snopov prek optičnih elementov.

#### 3.1 Omejen snop svetlobe

Pri obravnavi elektromagnetnega valovanja pogosto uporabljamo približek ravnih valov. Ti so v smeri pravokotno na smer širjenja neomejeni in so zato lahko le idealizacija. Čim raven val usmerimo skozi odprtino v zaslonu, nastane omejen snop svetlobe. V snopu svetlobe valovna čela niso ravna in meje snopa niso vzporedne, ampak se snop zaradi uklona širi (slika 3.1).



Slika 3.1: Omejen snop nastane ob prehodu ravnega vala skozi končno odprtino.

V veliki oddaljenosti od zaslona lahko za izračun polja uporabimo Fraunhoferjevo uklonsko teorijo (glej poglavje 1.7). Vendar za oceno kota širjenja podrobnega računa niti ne potrebujemo. Velja približno

$$\vartheta \sim \frac{\lambda}{a}, \quad (3.1)$$

kjer je  $a$  polmer odprtine v zaslonu. Opis polja v bližini zaslona je zahtevnejši, saj je treba uporabiti Fresnelov približek. S slike (3.1) ocenimo, da seže območje bližnjega polja do razdalje

$$b \sim \frac{a}{\vartheta} = \frac{a^2}{\lambda}. \quad (3.2)$$

Včasih taki približni oceni zadoščata. Bolj kvantitativen opis omejenih snopov bi lahko dobili s Fraunhoferjevo in Fresnelovo uklonsko teorijo, kar pa ni najudobnejša pot. Lotimo se naloge raje preko približka obosne valovne enačbe.

**Naloga 3.1.1** Pokaži, da je Fraunhoferjeva uklonska slika reže, katere prepustnost se v radialni smeri spreminja kot Gaussova funkcija  $T(\xi, \eta) = e^{-(\xi^2 + \eta^2)/w_0^2}$ , podana z Gaussovo funkcijo oblike  $E(x, y, z) \propto e^{-(x^2 + y^2)/w^2(z)}$  in določi odvisnost  $w(z)$ . Izračunaj še uklonsko sliko v bližnjem polju po Fresnelovi uklonski teoriji.

### 3.2 Obosna valovna enačba

Pričnimo s časovno neodvisno valovno enačbo za monokromatsko valovanje s frekvenco  $\omega$ , to je Helmholtzevo enačbo (enačba 1.23)

$$\nabla^2 E + k^2 E = 0, \quad (3.3)$$

kjer je  $k = n\omega/c_0$  valovno število in  $n$  lomni količnik sredstva, po katerem se valovanje širi. Zaradi enostavnosti obravnavajmo le eno polarizacijo, tako da  $E$  pišemo kot skalar. Iščemo rešitev za omejen snop, ki se širi približno vzdolž osi  $z$ . Zapišimo jo v obliki

$$E = E_0 \psi(\mathbf{r}, z) e^{ikz}, \quad (3.4)$$

kjer je  $\mathbf{r}$  krajevni vektor v ravnini  $xy$ . Glavni del odvisnosti od koordinate  $z$  smo zapisali v faktorju  $e^{ikz}$ , tako da lahko privzamemo, da se  $\psi$  v smeri  $z$  le počasi spreminja. Vstavimo gornji nastavek v Helmholtzevo enačbo (enačba 3.3) in pri tem zanemarimo druge odvode po  $z$ , saj je zaradi počasnega spremenjanja  $\partial^2 \psi / \partial z^2$  majhen v primerjavi s  $k \partial \psi / \partial z$  in  $k^2 \psi$ . Zaenkrat obravnavajmo le radialno simetrične rešitve. Dobimo obosno ali paraksialno valovno enačbo

$$\nabla_{\perp}^2 \psi = -2ik \frac{\partial \psi}{\partial z}. \quad (3.5)$$

Opazimo, da je obosna valovna enačba enaka Schrödingerjevi enačbi za prost delec v dveh dimenzijah, v kateri ima koordinata  $z$  vlogo časa. Omejenemu snopu v kvantni mehaniki ustreza lokaliziran delec – valovni paket. Ta se s časom širi, kar v optiki ustreza pojavi uklona.

Ena družina rešitev, ki v kvantni mehaniki predstavlja lastne funkcije energije in gibalne količine, so ravni valovi

$$\psi = e^{ik_1 x + ik_2 y} e^{-i\beta z}. \quad (3.6)$$

Pri tem  $\beta$  ustreza energiji v kvantni mehaniki,  $k_1$  in  $k_2$  pa komponentama gibalne količine. Da bo gornji nastavek rešitev obosne valovne enačbe (enačba 3.5), mora veljati

$$\beta = \frac{k_1^2 + k_2^2}{2k}. \quad (3.7)$$

Ko vstavimo nastavek za  $\psi$  v izraz za celotno polje  $E$  (enačba 3.4), dobimo ravni val, za katerega velja

$$k_3 = k - \beta = k - \frac{k_1^2 + k_2^2}{2k}, \quad (3.8)$$

pri čemer je  $k_3$  vzdolžna komponenta valovnega vektorja,  $k_1$  in  $k_2$  prečni komponenti,  $k$  pa valovno število.

Za ravni val, ki je rešitev prvotne točne valovne enačbe (enačba 3.3) in ne samo obosnega približka, velja

$$k_3 = \sqrt{k^2 - (k_1^2 + k_2^2)}. \quad (3.9)$$

Očitno dobimo enačbo (3.8) iz enačbe (3.9) z razvojem korena za majhne vrednosti prečnih komponent valovnega vektorja, kar seveda ni nič nepričakovanega. Ta ugotovitev nam tudi pove, da je približek obosne enačbe dober, kadar je razmerje prečne in vzdolžne komponente valovnega vektorja majhno. Takrat je majhen tudi kot širjenja snopa in v razvoju lahko zanemarimo člene, višje od kvadratnih. To pa je tudi območje veljavnosti Fresnelove uklonske teorije, zato rešitve obosne valovne enačbe dajo enako dober približek.

### Fouriereva optika

Časovno odvisnost poljubnega začetnega stanja v kvantni mehaniki navadno izračunamo tako, da v nekem začetnem trenutku paket razvijemo po lastnih stanjih energije – ravnih valovih. Rešitev v poljubnem kasnejšem trenutku je potem dana v obliki Fourierevega integrala. Ta pot je zelo uporabna tudi v optiki in je osnova sklopa računskeih metod, znanih pod imenom Fouriereva optika. V našem primeru z njo brez težav pridemo nazaj do Fresnelove uklonske formule.

## 3.3 Osnovni Gaussov snop

Naša naloga je poiskati rešitve obosne enačbe, ki popišejo omejene snope. Iz kvantne mehanike vemo, da je najbolj lokaliziran in se najpočasneje širi valovni paket Gaussove oblike. Zato poskusimo najti rešitev obosne enačbe (3.5) v obliki

$$\psi(r, z) = e^{i \frac{kr^2}{2q(z)}} e^{-i\phi(z)}, \quad (3.10)$$

kjer funkcija  $q(z)$  opisuje širjenje snopa v prečni smeri,  $\phi(z)$  pa opisuje počasno spreminjanje faze snopa vzdolž osi  $z$ . Vstavimo nastavek (enačba 3.10) v obosno valovno enačbo (enačba 3.5). Zaradi simetričnosti računamo v cilindričnih koordinatah in zapišemo

$$\nabla_{\perp}^2 \psi = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial \psi}{\partial r} = \left( \frac{2ik}{q} - \frac{k^2 r^2}{q^2} \right) \psi \quad (3.11)$$

in

$$\frac{\partial \psi}{\partial z} = \left( -\frac{ikr^2}{2q^2} q(z)' - i\phi' \right) \psi. \quad (3.12)$$

Tako iz obosnega približka (enačba 3.5) dobimo

$$\frac{2ik}{q} - \frac{k^2 r^2}{q^2} = ik \left( \frac{ikr^2}{q^2} q(z)' + 2i\phi' \right). \quad (3.13)$$

Gornji izraz mora veljati pri vsakem  $r$ , zato morajo biti koeficienti pri  $r^2$  in pri drugih členih posebej enaki 0. Dobimo

$$q(z)' = 1 \quad \text{in} \quad \phi' = -\frac{i}{q}. \quad (3.14)$$

Z integracijo dobimo najprej

$$q = z - iz_0, \quad (3.15)$$

kjer smo z  $iz_0$  označili integracijsko konstanto. Integriramo še enačbo za fazo

$$\phi = \int_0^z -\frac{idz}{z - iz_0} = -i \ln(1 + i \frac{z}{z_0}). \quad (3.16)$$

Sledi

$$\begin{aligned} \psi &= \exp \left[ i \frac{kr^2}{2(z - iz_0)} \right] \exp \left[ -\ln(1 + i \frac{z}{z_0}) \right] = \\ &= \frac{1}{1 + i \frac{z}{z_0}} \exp \left[ -\frac{kr^2 z_0}{2(z_0^2 + z^2)} + \frac{ikr^2 z}{2(z_0^2 + z^2)} \right]. \end{aligned} \quad (3.17)$$

Realni del eksponenta opisuje širjenje snopa. Vpeljimo polmer snopa  $w$ :

$$w^2 = \frac{2z_0}{k} \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right]. \quad (3.18)$$

V izhodišču pri  $z = 0$  je snop najožji in pravimo, da je tam grlo snopa. Vpeljimo še polmer snopa v grlu  $w_0$  in zapišimo hiperbolično odvisnost  $w$  od  $z$ :

$$w^2 = w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{z}{z_0} \right)^2 \right]. \quad (3.19)$$

Med  $w_0$  in  $z_0$  velja zveza

$$z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}. \quad (3.20)$$

Dolžina  $z_0$  je ravno razdalja, pri kateri preide snop v asimptotično enakomerno širjenje. Pri  $z_0$  tudi preidemo v območje veljavnosti Fraunhoferjevega uklonskega približka. Celotna dolžina grla je  $2z_0$ , območju grla pa pravimo tudi območje bližnjega polja ali Rayleighovo območje in dolžini  $z_0$  Rayleighova dolžina<sup>1</sup>.



Slika 3.2: Gaussov snop s karakterističnimi parametri

Iz izraza za polmer snopa  $w(z)$  (enačba 3.19) razberemo še kot divergenco snopa v asimptotičnem območju. Najprej izračunajmo le polovični kot širjenja:

$$\vartheta = \lim_{z \rightarrow \infty} \frac{dw}{dz} = \frac{w_0}{z_0} = \frac{\lambda}{\pi w_0}. \quad (3.21)$$

Nato pa zapišimo celotno divergenco snopa

$$\theta = 2 \frac{w_0}{z_0} = \frac{2\lambda}{\pi w_0}. \quad (3.22)$$

Dobljena izraza za območje bližnjega polja (enačba 3.20) in divergenco (enačba 3.21) sta v skladu z grobimi ocenami, ki smo jih napravili v začetku poglavja (enačbi 3.1 in 3.2). Faktor  $1/\pi$  je značilen za Gaussov snop, ki ima od vseh mogočih oblik najmanjšo divergenco.

Vrnimo se k imaginarnemu delu eksponenta v enačbi (3.17). Vpeljimo količino

$$R = z \left[ 1 + \left( \frac{z_0}{z} \right)^2 \right], \quad (3.23)$$

<sup>1</sup>Angleški fizik in nobelovec John William Strutt, 3. baron Rayleighski, 1842–1919.

ki meri krivinski radij valovnih front snopa na razdalji  $z$ . To najlažje uvidimo, če krogelni val razvijemo po majhnih odmikih  $r$  od osi  $z$ :

$$\frac{1}{R} e^{ikR} = \frac{1}{R} e^{ik\sqrt{z^2+r^2}} \approx \frac{1}{R} e^{ik(z+\frac{r^2}{2R})}. \quad (3.24)$$

Upoštevali smo, da je na osi  $z = R$ .

**Naloga 3.3.1** Pokaži, da je največja ukrivljenost valovnih front snopa (najmanjši  $R$ ) ravno pri  $z = \pm z_0$ . Izračunaj še ukrivljenost front v grlu in v veliki oddaljenosti od grla.

Ostane nam še faktor pred eksponentom v izrazu (3.17). Ta faktor meri zmanjševanje amplitude snopa in s tem poskrbi za ohranitev energijskega toka ob širjenju žarka, poleg tega pa da še dodatno spremembo faze. Zapišimo ga v obliki

$$\frac{1}{1+i\frac{z}{z_0}} = \frac{1}{\sqrt{1+(\frac{z}{z_0})^2}} e^{-i\eta(z)} = \frac{w_0}{w} e^{-i\eta(z)}, \quad (3.25)$$

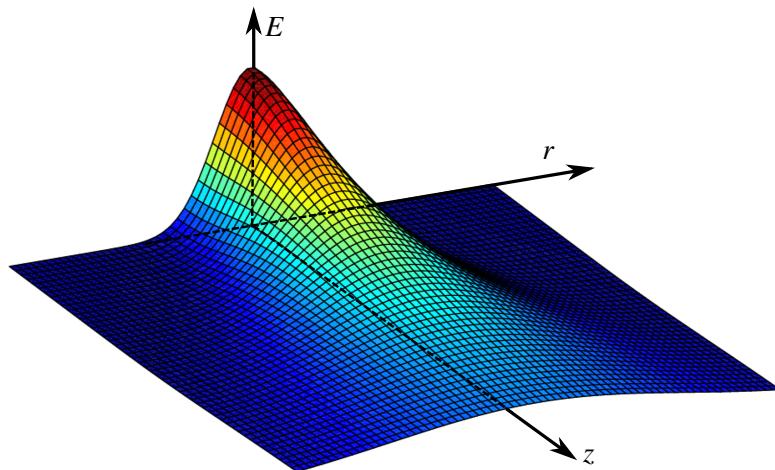
pri čemer je

$$\eta(z) = \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right). \quad (3.26)$$

Dodatna faza  $\eta$ , imenujemo jo tudi Gouyeva faza<sup>2</sup> je posledica povečane fazne hitrosti valovanja, kadar je omejeno v prečni smeri. Pojav je najizrazitejši v bližini grla snopa. Srečamo ga tudi pri valovanju v valovodih.

S tem lahko končno zapišemo izraz za električno poljsko jakost osnovnega Gaussovega snopa<sup>3</sup>

$$E = E_0 \frac{w_0}{w(z)} e^{ikz-i\omega t} e^{-r^2/w^2(z)} e^{ikr^2/2R(z)} e^{-i\eta(z)}. \quad (3.27)$$



Slika 3.3: Upodobitev gostota svetlobnega toka v Gaussovem snopu za  $z > 0$

<sup>2</sup>Francoski fizik Louis Georges Gouy, 1854–1926.

<sup>3</sup>Nemški matematik Carl Friedrich Gauss, 1777–1855.

Intenziteta svetlobe je sorazmerna z  $E(r, z)E^*(r, z)$  in zanjo velja

$$I(r, z) = I_0 \frac{w_0^2}{w(z)^2} e^{-2r^2/w^2(z)}. \quad (3.28)$$

**Naloga 3.3.2** Pokaži, da je znotraj širine snopa  $w$  približno 87 % celotnega svetlobnega toka.

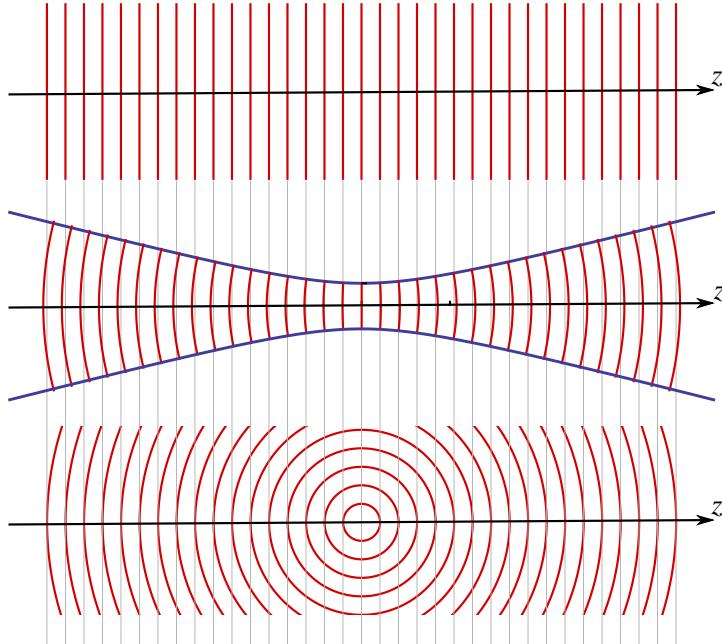
Povejmo še nekaj o parametru  $q(z)$ , ki smo ga uporabili pri izračunu Gaussovega snopa. Spomnimo se, da parameter  $q$  narašča linearno z oddaljenostjo od grla:

$$q(z) = z - iz_0. \quad (3.29)$$

Parameter  $q$  imenujemo kompleksni krivinski radij, njegov inverz pa kompleksna ukrivljenost:

$$\frac{1}{q(z)} = \frac{1}{R} + i \frac{2}{kw^2}. \quad (3.30)$$

Primerjajmo še Gaussov snop z drugimi valovanji. Na sliki (3.4) so shematsko prikazane valovne fronte ravnega vala, Gaussovega snopa (3.27) in krogelnega vala (3.24). Vidimo, da je za majhne oddaljenosti od grla  $z$  Gaussov snop podoben ravnemu valu (ukrivljenost front je zelo majhna in  $R \rightarrow \infty$ ), medtem ko je za velike  $z$  podoben krogelnemu valu (krivinski radij  $R$  narašča sorazmerno z oddaljenostjo  $z$ ). Faza Gaussovega snopa je pri  $z \gg z_0$  zamaknjena za  $\pi/2$  glede na ravni in krogelni val.



Slika 3.4: Ravnih val, Gaussov snop ter krogelni val. Pri majhnih razdaljah od grla je Gaussov snop podoben ravnemu valu, pri velikih razdaljah pa krogelnemu valu. Faza Gaussovega snopa se razlikuje od faze ravnega in krogelnega vala.

### 3.4 Snopi višjega reda

Osnovna rešitev obosne valovne enačbe je Gaussov snop. Poleg te rešitve pa obstaja še veliko drugih rešitev, ki so tudi omejene v prečni smeri. V kartezičnih koordinatah tako rešijo obosno valovno enačbo tudi Hermite-Gaussovi snopi<sup>4</sup>

$$\psi_{n,m}(x,y) = \frac{w_0}{w} H_n\left(\frac{\sqrt{2}x}{w}\right) H_m\left(\frac{\sqrt{2}y}{w}\right) \exp\left[\frac{ik(x^2+y^2)}{2q} - i\eta_{n,m}\right], \quad (3.31)$$

kjer so  $H_n$  Hermitovi polinomi stopnje  $n$ . V to se lahko prepričamo, če izraz vstavimo v obosno valovno enačbo (enačba 3.5) in upoštevamo, da Hermitovi polinomi zadoščajo enačbi

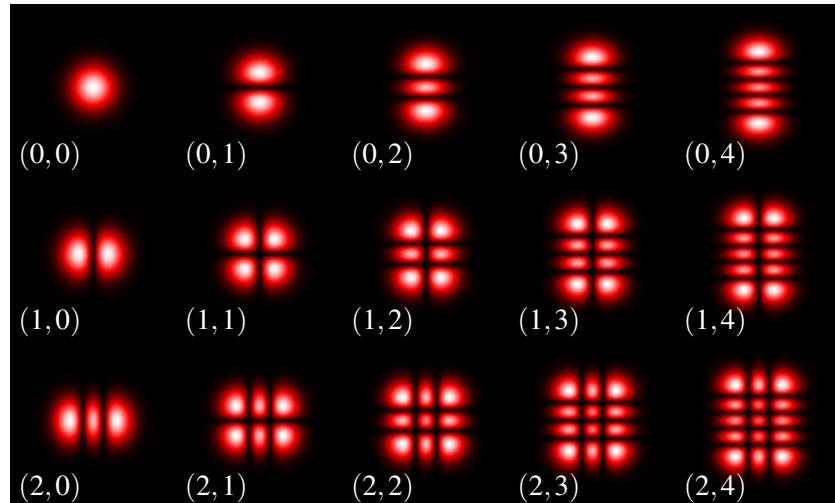
$$H_n'' - 2xH_n' + 2nH_n = 0. \quad (3.32)$$

Osnovni Gaussov snop je očitno poseben primer gornje rešitve za  $m = n = 0$ . Polmer snopa  $w(z)$  in kompleksni krivinski radij  $q(z)$  sta za vse  $m$  in  $n$  enaka kot za osnovni snop in podana z enačbama (3.19) in (3.29). Razlika je v fazi, ki je odvisna tudi od  $n$  in  $m$ :

$$\eta_{n,m}(z) = (n+m+1) \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right). \quad (3.33)$$

To hitrejše spremjanje faze v bližnjem polju snopov višjega reda je analogno večji fazni hitrosti valov višjega reda v valovodih.

Nekaj višjih redov Hermite-Gaussovinih snopov je na sliki (3.5), kjer rišemo  $|\Re\psi_{n,m}(x,y,0)|$ . Vidimo, da indeksa  $n$  in  $m$  predstavlja število vozlov v prečni smeri, pri danem  $w$  pa polmer snopa narašča z  $n$  in  $m$ .



Slika 3.5: Prečni profil Hermite-Gaussovinih snopov za različne vrednosti  $(n, m)$

---

**Naloga 3.4.1** Pokaži, da za Hermite-Gaussove snope višjih redov efektivni polmer snopa narašča sorazmerno s korenom iz števila prečnih vozlov  $w_{eff} \propto w\sqrt{n+m}$ . Namig: pri zapisu prečne odvisnosti polja upoštevaj le vodilni člen Hermitovih polinomov ( $\psi_{n,m} \propto x^n y^m \exp(-(x^2+y^2)/w^2)$ ) in določi, na kateri razdalji od središča snopa ima polje  $\psi$  največjo amplitudo.

---

<sup>4</sup>Francoski matematik Charles Hermite, 1822–1901.

Hermite-Gaussovi snopi (enačba 3.31) tvorijo popoln ortogonalen sistem funkcij koordinat  $x$  in  $y$ :

$$\int \psi_{n,m}^*(x,y) \psi_{n',m'}(x,y) dx dy = \pi w_0^2 2^{n+m-1} n! m! \delta_{n,n'} \delta_{m,m'} \quad (3.34)$$

Polje nekega valovanja, ki ga poznamo v ravnini  $z = 0$ , lahko pri poljubnem  $z$  dobimo z razvojem po Hermite-Gaussovih snopih. Pri tem je izbira premora grla  $w_0$  poljubna, bo pa seveda vplivala na hitrost konvergencije razvoja. Na tak način lahko obravnavamo uklon na odprtini, kjer je očitno smiselno vzeti  $w_0$  približno enak dimenziji odprtine. Dobljeni rezultat je enako natančen kot Fresnelov uklonski integral.

Pri velikih  $z$ , kjer velja Fraunhoferjeva uklonska teorija, je polje Fourierjeva transformacija polja pri  $z = 0$ . Hermite-Gaussovi snopi ohranjajo prečno obliko, ki pa se z naraščajočim  $z$  širi. Od tod vidimo, da je Fourierjeva transformacija Hermite-Gaussove funkcije  $H_n(x)e^{-x^2/2}$  zopet Hermite-Gaussova funkcija.

V cilindričnih koordinatah imajo snopi višjega reda obliko Laguerre-Gaussovih snopov<sup>5</sup>

$$\psi_{p,l}(r, \phi, z) = \frac{w_0}{w} \left( \frac{\sqrt{2}r}{w} \right)^{|l|} L_p^{|l|} \left( \frac{2r^2}{w^2} \right) e^{\pm il\phi} \exp \left[ \frac{ikr^2}{2q} - i\eta_{p,l} \right], \quad (3.35)$$

kjer je  $L_p^l$  pridruženi Laguerrov polinom in

$$\eta_{p,l}(z) = (2p + l + 1) \arctan \left( \frac{z}{z_0} \right). \quad (3.36)$$

Podobno kot je v kartezičnem primeru red polinoma določal število prečnih ničel, določata  $p$  in  $l$  v cilindričnem primeru število vozelnih črt, kjer je gostota svetlobnega toka nič. Na sliki (3.6) je prikazanih nekaj oblik amplitud  $|\Re \psi_{p,l}(r, \phi, 0)|$ .



Slika 3.6: Prečni profil Laguerre-Gaussovih snopov za različne vrednosti  $(p, l)$

Iz laserjev navadno želimo dobiti čim čistejši osnovni snop, vendar lahko pogosto opazimo tudi snope višjega reda. Da dobimo le osnovni snop, je treba posebej paziti pri konstrukciji laserja.

<sup>5</sup>Francoski matematik Edmond Nicolas Laguerre, 1834–1886.



### Tirna vrtilna količina in spin

Valovne fronte Laguerre-Gaussovih snopov pri  $l \neq 0$  imajo obliko vijačnic. Poyntingov vektor pri njih ni vzporeden z osjo žarka, ampak ima komponento tudi v prečni smeri. Ta spreminja smer, zato pride do pojava vrtilne količine v smeri osi snopa in snop na snov deluje z navorom. Pravimo, da Laguerre-Gaussovi snopi nosijo t.i. tirno vrtilno količino. V kvantni mehaniki funkcija  $\psi_{p,l}$  predstavlja foton s tirno vrtilno količino  $L = \hbar l$ , medtem ko leva in desna cirkularna polarizacija predstavlja spin fotona.



Slika 3.7: Valovna fronta Laguerre-Gaussovega snopa

## 3.5 Besselov snop

Poglejmo si še poseben primer omejenega snopa, to je Besselov snop<sup>6</sup>. Kot nastavek za rešitev valovne enačbe (enačba 3.3) izberemo

$$E = E_0 \psi(x, y) e^{i\beta z - i\omega t}, \quad (3.37)$$

kjer mora nastavek  $\psi$  zadostovati Helmholtzovi enačbi

$$\nabla_{\perp}^2 \psi + k_{\perp}^2 \psi = 0, \quad (3.38)$$

pri  $k_{\perp}^2 = k^2 - \beta^2$ . V cilindričnih koordinatah ( $x = r \cos \phi$ ,  $y = r \sin \phi$ ) se enačba prepiše v

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial \phi^2} + k_{\perp}^2 \psi = 0. \quad (3.39)$$

Rešitve gornje enačbe so s faznim faktorjem pomnožene Besselove funkcije:

$$\psi_m(x, y) = A_m J_m(k_{\perp} r) e^{im\phi}, \quad (3.40)$$

kjer je  $J_m$  Besselova funkcija in  $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$ . Za  $m = 0$  ima val obliko

$$E(r, \phi, z, t) = A_0 J_0(k_{\perp} r) e^{i\beta z - i\omega t}, \quad (3.41)$$

ki ga imenujemo Besselov snop. Valovne fronte takega snopa so ravne in snop nima divergence. Vendar pa Besselov snop ni omejen v pravem smislu. Za velike oddaljenosti od središča snopa  $r$  intenzitetni profil namreč pojema kot  $I \propto J_0^2(k_{\perp} r) \sim (2/\pi k_{\perp} r) \cos^2(k_{\perp} r - \pi/4)$ . Energija takega snopa ni omejena znotraj efektivnega radija, kot je to pri Gaussovih snopih. Za konstrukcijo Besselovih snopov bi (tako kot za konstrukcijo ravnega vala) potrebovali neskončno energije, kar je seveda nemogoče. Kljub temu pa lahko ustvarimo približke Besselovih snopov, ki imajo pomembne in uporabne lastnosti.

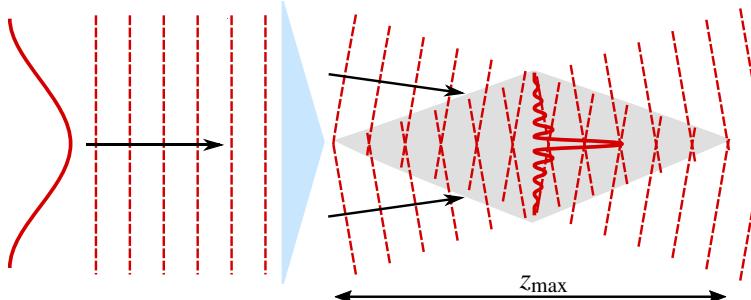
<sup>6</sup>Nemški astronom, matematik in fizik Friedrich Wilhelm Bessel, 1784–1846.



Slika 3.8: Prečni presek in profil intenziteta Besselovega snopa



Z uporabo stožaste leče lahko preoblikujemo v približek Besselovega snopa (slika 3.9). Na plašču stožaste leče se namreč Gaussov snop zlomi in valovni vektorji nastalega žarka opisujejo stožec, kar je sicer lastnost Besselovih žarkov. Dobljeni žarek je približek Besselovega snopa, vendar le na določenem območju, dolgem  $z_{max}$ . Znotraj tega območja je divergenca snopa praktično enaka nič. Poleg manjše divergence imajo ti snopi še lastnost regeneracije. To pomeni, da se snop v senčni strani za objektom, ki ga osvetljuje (na primer v optični pinceti), regenerira. Profil snopa v senčni strani (daleč stran od objekta) je tako enak profilu snopa pred objektom.



Slika 3.9: Nastanek Besselovega snopa na stožasti leči

### 3.6 Transformacije snopov z lečami

Vrnimo se h Gaussovim snopom in poglejmo, kaj se zgodi z njimi pri prehodu skozi optične naprave. Začnimo z enostavno tanko lečo z goriščno razdaljo  $f$ . V geometrijski optiki je krivinski radij krogelnega vala, ki izhaja iz točke na osi, kar enak razdalji do točke. Leča preslika točko na osi v točko na osi, od tod pa sledi, da se sferični val s krivinskim radijem  $R_1$  po prehodu skozi lečo spremeni v val s krivinskim radijem  $R_2$ . Pri tem velja zveza

$$\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} = \frac{1}{f}. \quad (3.42)$$

Krivinski radij v točki  $z$  je pozitiven, če je središče krožnice pri  $z' \leq z$ .

Kako pa je z Gaussovim snopom? Polmer snopa  $w$  se pri prehodu skozi tanko lečo ne spremeni, zato velja po enačbi (3.30) za kompleksni krivinski radij tik pred lečo in tik za njo

$$\frac{1}{q_1} - \frac{1}{q_2} = \frac{1}{f}. \quad (3.43)$$

Kompleksni krivinski radij  $q$  je po enačbi (3.29) linearja funkcija koordinate  $z$ . To nam skupaj z enačbo (3.43) omogoča račun prehoda snopa skozi poljuben sistem leč brez aberacij. Kot primer poglejmo, kako z zbiralno lečo zberemo snop.



Slika 3.10: Prehod Gaussovega snopa skozi tanko lečo. Grlo velikosti  $w_{01}$  v oddaljenosti  $x_1$  od gorišča leče se preslikava v grlo  $w_{02}$  v oddaljenosti  $x_2$  od gorišča leče.

Vpadni snop naj ima grlo s polmerom  $w_{01}$  in parametrom  $z_{01}$ . Lega grla je v točki, ki je za  $x_1$  oddaljena od levega gorišča leče (slika 3.10). Naj bosta

$$q_1^F = x_1 - iz_{01} \quad \text{in} \quad q_2^F = -x_2 - iz_{02} \quad (3.44)$$

kompleksna krivinska radija v levem in desnem gorišču, pri čemer je koordinatna os  $z$  usmerjena v desno, gledamo pa referenčno glede na lego grla vsakega posameznega snopa. Velja tudi

$$q_1 = q_1^F + f \quad \text{in} \quad q_2 = q_2^F - f. \quad (3.45)$$

Od tod dobimo z uporabo enačbe (3.43) enačbo za  $q$  v goriščih v kompaktni obliki

$$q_1^F q_2^F = -f^2. \quad (3.46)$$

Enačba je po obliki podobna enačbi za oddaljenost slike od gorišča v geometrijski optiki, pomen pa ima drugačen. Zapišimo posebej realni in imaginarni del

$$x_1 x_2 = f^2 - z_{01} z_{02} \quad \text{in} \quad \frac{x_1}{z_{01}} = \frac{x_2}{z_{02}}. \quad (3.47)$$

Dobimo enačbi za preslikavo Gaussovega snopa čez lečo z goriščno razdaljo  $f$ . Prva da povečavo:

$$\frac{w_{02}}{w_{01}} = \sqrt{\frac{x_2}{x_1}}, \quad (3.48)$$

druga enačba pa lego grla na desni strani leče:

$$x_2 = \frac{x_1 f^2}{x_1^2 + z_{01}^2}. \quad (3.49)$$

Gornja enačba se ujema z izrazom za preslikavo točke v geometrijski optiki le, kadar je  $z_{01} \ll x_1$ . Kadar je  $z_{01} \gg f$ , je val na leči pri vsakem  $x_1$  skoraj raven in  $x_2 \rightarrow 0$ , kar pomeni, da leži grlo na desni strani v gorišču. V praksi dobimo Gaussove snope iz laserjev in pogosto ne velja ne prva ne druga limita, temveč je treba uporabiti izraz (3.49). Tudi povečava polmera grla na desni, podana z enačbo (3.48), je precej drugačna kot v geometrijski optiki.

Za primer vzemimo snop iz He-Ne laserja (valovna dolžina 632,8 nm), ki ima grlo s polmerom  $w_{01} = 0,5$  mm na izhodnem ogledalu in je 50 cm pred lečo z goriščno razdaljo  $f = 25$  cm. Tedaj je  $z_{01} = 124$  cm. Po enačbi (3.49) leži grlo za lečo v oddaljenosti 1 cm od gorišča in 26 cm za lečo, po enačbi (3.48) pa izračunamo polmer  $w_{02} = 100 \mu\text{m}$ . Enačbe geometrijske optike bi dale popolnoma napačen položaj grla 50 cm za lečo, polmer grla pa 0,5 mm. Po drugi strani bi približek, da je vpadni snop kar raven, da grlo na desni v gorišču s približno pravim polmerom. Zakaj da približek ravnih valov bolj pravilen rezultat, lahko hitro uvidimo, če pogledamo Rayleighovo dolžino snopa: snop vpada na lečo še v območju bližnjega polja ( $x_1 + f < z_{01}$ ), kjer je približno oblike ravnih valov.

Če postavimo grlo snopa v gorišče leče ( $x_1 = 0$ ), je grlo na desni strani tudi v gorišču ( $x_2 = 0$ ). Razmerje polmerov grl na eni in drugi strani leče lahko izračunamo:

$$\lim_{x_1 \rightarrow 0} \frac{x_2}{x_1} = \frac{f^2}{z_{01}^2} \quad \text{in} \quad \frac{w_{02}}{w_{01}} = \frac{f}{z_{01}}. \quad (3.50)$$

Velikost grla na desni strani je

$$w_{02} = \frac{\lambda f}{\pi w_{01}}, \quad (3.51)$$

torej tem manjša, čim večji je polmer grla na levem. Vpadni žarek je tako smiselnou razširiti, vendar je polmer žarka lahko največ enak polmeru leče  $a$ . Najmanjša velikost grla na desni je tako

$$w_{02 \min} = \frac{\lambda f}{\pi a} \sim \lambda. \quad (3.52)$$

Dobi mikroskopski in fotografiski objektivi dosegajo numerično odprtino  $f/a \simeq 1$  in z njimi je mogoče Gaussov snop zbrati v piko velikosti  $\sim \lambda$ .

Omenili smo, da je treba za dosego majhnega polmera grla za lečo žarek pred lečo čim bolj razširiti. Razširitev vpadnega snopa naredimo s teleskopom (slika 3.11), katerega značilnost je, da je razmik med lečama enak vsoti goriščnih razdalj leč in zato gorišči leč sovpadata. Povečava teleskopa je pri taki postavitvi leč enaka razmerju med goriščima razdaljama (glej nalogu 3.6.1).



Slika 3.11: Prehod Gaussovega snopa skozi sistem dveh leč z goriščnima razdaljama  $f_1$  in  $f_2$

**Naloga 3.6.1** Dve leči z goriščnima razdaljama  $f_1$  in  $f_2$  naj bosta na medsebojni razdalji  $d = f_1 + f_2$ . Pokaži, da je povečava takega teleskopa enaka

$$\frac{w_{02}}{w_{01}} = \frac{f_2}{f_1}, \quad (3.53)$$

in je neodvisna od postavitve grla snopa  $x_1$ .

### 3.7 Matrične (ABCD) preslikave v geometrijski optiki

Preden se lotimo splošnejšega zapisa preslikav Gaussovega snopa, se spomnimo, kako se lotimo preslikav v geometrijski optiki. Slika nastane kot presečišče geometrijskih žarkov, ki izhajajo iz točke predmeta pred optičnim sistemom. Geometrijski žarek je pravokoten na valovne ploskve, pri čemer moramo vzeti še limito, ko gre valovna dolžina proti nič. Ukrivljenost valovne fronte je neposredno povezana s spremjanjem naklona žarkov, pri čemer bomo privzeli, da so nakloni žarkov glede na os majhni.

Geometrijski žarek v izbrani ravnini  $z$  lahko opišemo z dvema parametrom: oddaljenostjo od osi  $y$  in naklonom glede na os  $\theta$ . Ti dve količini sta med seboj neodvisni in ju sestavimo v vektor

$$\begin{bmatrix} y \\ \theta \end{bmatrix}. \quad (3.54)$$

Preslikavo snopa bomo zapisali kot matriko, ki bo delovala na gornji vektor. Matrike bodo v splošnem oblike

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (3.55)$$

zato jih imenujemo tudi ABCD matrike. Zapišimo nekaj primerov.

Pri premiku za  $d$  se spremeni odmik od osi, naklon pa ostane enak:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 + d\theta_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (3.56)$$

To lahko zapišemo v matrični obliki

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (3.57)$$

Matrika za premik  $d$  vzdolž osi  $z$  je tako

$$M = \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Poglejmo še matriko za prehod skozi lečo. Pri prehodu skozi tanko lečo se spremeni nagib žarka. Če je pred lečo vzporeden z osjo, gre za lečo skozi gorišče, zato

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ -\frac{y_1}{f} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & B \\ -\frac{1}{f} & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} y_1 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.59)$$

Pri tem koeficientov  $B$  in  $D$  še ne poznamo. Določimo jih iz drugega pogoja, ki pravi, da ostane žarek, ki gre skozi lečo na osi, nespremenjen:

$$\begin{bmatrix} y_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & B \\ -\frac{1}{f} & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ \theta_1 \end{bmatrix}. \quad (3.60)$$

Sledi  $B = 0$  in  $D = 1$ . Matrika za prehod skozi lečo je tako

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}. \quad (3.61)$$

Podobno izpeljavo kot za prehod skozi lečo lahko naredimo za odboj na sferičnem ogledalu s krivinskim radijem  $R$ . Pripadajoča matrika je

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}, \quad (3.62)$$

pri čemer je  $R > 0$  za konkavna zrcala. Matrika za odboj na ravnem zrcalu je identiteta.

Matriko sestavljenih optičnih naprave dobimo z množenjem matrik posameznih komponent. Pri tem moramo paziti na vrstni red množenja, saj množenje matrik ni komutativno. Matriko preslikave čez dva optična elementa, pri čemer žarek najprej preide element z indeksom 1 in nato element z indeksom 2, zapišemo kot

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2 & B_2 \\ C_2 & D_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A_1 & B_1 \\ C_1 & D_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_2A_1 + B_2C_1 & A_2B_1 + B_2D_1 \\ C_2A_1 + D_2C_1 & C_2B_1 + D_2D_1 \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

V sistemu z več elementi (slika 3.12) zapišemo produkt matrik za vse elemente, pri čemer ne smemo pozabiti na premike med elementi.

Poglejmo primer. Žarek naj najprej prepotuje razdaljo  $d$ , nato pa ga usmerimo na tanko lečo z goriščno razdaljo  $f$ . Matrika za celoten prehod je

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & d \\ -\frac{1}{f} & -\frac{d}{f} + 1 \end{bmatrix}. \quad (3.64)$$

Gornji matrični formalizem je zelo prikladen predvsem za računanje zapletenih optičnih sistemov, saj ga je prav lahko izvesti na računalnik. Poleg tega bomo spoznali, da je enolično povezan z matričnim formalizmom izračuna kompleksne ukrivljenosti Gaussovih snopov, zato da preprosto možnost prenosa rezultatov računov geometrijske optike v optiko snopov.



Slika 3.12: Preslikave žarkov lahko obravnavamo z matrikami. Optični element  $M$  preslika žarek  $(y_1, \theta_1)$  v  $(y_2, \theta_2)$ . Matriko za prehod poljubnega zaporedja optičnih elementov dobimo z množenjem matrik.

### 3.8 Linearne racionalne transformacije kompleksnega krivinskega radija

Poskusimo zdaj zapisati podoben matrični formalizem še za kompleksne krivinske radije. Za opis Gaussovega snopa zadošča, če v izbrani ravnini  $z$  poznamo kompleksni krivinski radij  $q$ . Ugotovili smo že, da je  $q$  linearna funkcija premika po  $z$  (enačba 3.29). Vemo tudi, kako se  $q$  spremeni pri prehodu skozi tanko lečo (enačba 3.43).

Pri premiku iz ravnine  $z_1$  v ravnino  $z_2$ , ki je premaknjena za  $d$ , se  $q$  spremeni

$$q_2 = q_1 + d. \quad (3.65)$$

Po enačbi (3.43) je pri prehodu skozi lečo

$$q_2 = \frac{q_1 f}{f - q_1} = \frac{q_1}{-\frac{q_1}{f} + 1}. \quad (3.66)$$

Premik in leča dasta skupaj

$$q_2 = \frac{q_1 + d}{-\frac{q_1 + d}{f} + 1} = \frac{q_1 + d}{-\frac{q_1}{f} - \frac{d}{f} + 1}. \quad (3.67)$$

V vseh treh primerih lahko transformacijo kompleksnega krivinskega radija  $q$  zapišemo v obliki ulomljene linearne preslikave

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}. \quad (3.68)$$

Koeficiente preslikave razvrstimo v matriko

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}. \quad (3.69)$$

Če iz gornjih enačb razberemo koeficiente ABCD matrik, vidimo, da so povsem enake kot v primeru geometrijske optike. Hitro lahko tudi preverimo, da je matrika za premik in lečo enaka produktu matrike za premik in matrike za lečo (enačba 3.64).

Omenimo še eno lastnost ABCD matrik. Kadar po prehodu čez optične elemente preidemo v snov z enakim lomnim količnikom kot je bil na začetku, je determinanta ABCD matrike enaka 1. V nasprotnem primeru je determinanta matrike enaka razmerju lomnih količnikov začetne in končne snovi.

$$AD - BC = \frac{n_1}{n_2}. \quad (3.70)$$

Opis prehoda	Skica	Matrika za prehod
Prehod skozi prostor za $d$		$\begin{bmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$
Prehod preko meje dveh snovi		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$
Prehod preko konveksno ukrivljene meje $R > 0$		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{(n_1 - n_2)}{n_2 R} & \frac{n_1}{n_2} \end{bmatrix}$
Prehod preko konveksne leče $f > 0$		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix}$
Odboj na konkavnem zrcalu $R > 0$		$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{2}{R} & 1 \end{bmatrix}$

Tabela 3.1: Matrike ABCD za nekaj osnovnih preslikav, ki veljajo tako v geometrijski optiki kot tudi za izračun preslikave kompleksnega krivinskega radija  $q$  Gaussovih snopov.

**Naloga 3.8.1** Pokaži, da za naslednje prehode veljajo ustrezne ABCD matrike.

Prehod skozi prostor in lečo		$\begin{bmatrix} 1 & d \\ -\frac{1}{f} & 1 - \frac{d}{f} \end{bmatrix}$
Prehod preko leče z debelino $d$ in krivinskima radijema $R_1$ in $R_2$		$\begin{bmatrix} 1 - \frac{d}{n f_1} & \frac{d}{n} \\ -\frac{1}{f_2} - \frac{1}{f_1} - \frac{d}{n f_1 f_2} & 1 - \frac{d}{n f_2} \end{bmatrix} f_i = \frac{R_i}{n-1}$
Prehod čez zaporedje plasti		$\begin{bmatrix} 1 & \sum_{i=1}^N \frac{d_i}{n_i} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$



## 4. Optični resonatorji

Osnovni gradnik vsakega laserja je resonator. V njem je vzbujeno lastno valovanje, ki skozi delno prepustno steno resonatorja izhaja iz sistema. V tem poglavju bomo najprej spoznali optične resonatorje in kriterije za njihovo stabilno delovanje, nato pa izračunali lastne frekvence ter povezali širino črt z izgubami v sistemu.

### 4.1 Odprtii resonatorji

Optični resonatorji so votline, v katerih je mogoče vzpostaviti stoječe svetlobno valovanje. Taka stoječa valovanja so skoraj stacionarne rešitve valovne enačbe z ustreznimi robnimi pogoji v votlini in se obnašajo kot harmonika nihala. Če vzbujamo v resonatorju valovanja z različnimi frekvencami, se pojavi pri nekaterih diskretnih frekvencah resonančno obnašanje. Te frekvence imenujemo lastne frekvence resonatorja. Zaradi dušenja imajo lastne frekvence končno širino, pri čemer je čas dušenja mnogo daljši od nihajne periode.

Optične resonatorje uporabljamo predvsem v dva namena:

1. V resonatorjih lahko z razmeroma šibkim zunanjim vzbujanjem nastane velika električna poljska jakost pri resonančni frekvenci. Za vzdrževanje konstantne amplitude lastnega nihanja mora zunanjji vir zgolj pokrivati izgube v resonatorju. Če so te majhne, je zunanjji vir lahko šibek, polje v resonatorju pa vseeno veliko.
2. Resonatorji delujejo kot filtri, ki prepuščajo le polje s točno določeno frekvenco in prostorsko odvisnostjo. Primer take uporabe je Fabry-Perotov interferometer, opisan v nadaljevanju poglavja.

Resonatorje poznamo z različnih področij, na primer akustične pri glasbilah ali mikrovalovne in radijske. V mikrovalovnem področju, kjer so valovne dolžine valovanja okoli 1 cm, so resonatorji zaprte kovinske votline z dimenzijami, ki so primerljive z valovno dolžino vzbujenega valovanja. Resonančne frekvence so v takem resonatorju med seboj dobro ločene in ni težko doseči enega samega nihanja v izbranem frekvenčnem intervalu.

V optičnem področju je drugače, saj so resonatorji navadno mnogo večji od valovne dolžine. Vzemimo kocko s stranico  $L \gg \lambda$ , v kateri je vzbujeno zelo veliko število lastnih nihanj. Število lastnih nihanj  $N$  na frekvenčni interval  $\Delta\nu$  zapišemo z zvezno gostoto stanj

$$N = 2 \frac{1}{8} 4\pi k^2 \Delta k \frac{1}{(\pi/L)^3} = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} V \Delta \omega = \frac{8\pi v^2}{c^3} V \Delta \nu. \quad (4.1)$$

To gornje enačbe smo prišli tako, da smo prešteli stoječa valovanja z velikostjo valovnega vektorja med  $k$  in  $k + \Delta k$ : volumen pripadajoče krogelne lupine v pozitivnem oktantu  $\frac{1}{8} 4\pi k^2 \Delta k$  smo delili z volumnom  $(\pi/L)^3$ , ki pripada enemu stanju. Upoštevali smo tudi, da ima vsako lastno nihanje dve možni polarizaciji.

Poglejmo primer. Izberimo osrednjo frekvenco  $v = 3 \cdot 10^{14}$  Hz, ki ustreza valovni dolžini  $1 \mu\text{m}$ , in širino frekvenčnega intervala  $\Delta v = 3 \cdot 10^9$  Hz, ki je tipična za Dopplerjevo razširjeno emisijsko črto v plinu. Potem je v votlini s stranico  $L = 1 \text{ cm}$  in prostornino  $V = 1 \text{ cm}^3$  število lastnih nihanj na izbran interval po enačbi (4.1) enako  $N = 2,5 \cdot 10^8$ . Če bi bile vse stene votline idealna zrcala, bi bil čas dušenja vseh lastnih nihanj približno enako dolg in vedno bi vzbujali zelo veliko število resonanc hkrati. Tak resonator bi bil neuporaben.

Hkratnemu vzbujanju velikega števila nihanj se izognemo z zmanjšanjem odbojnosti stranskih sten votline, saj s tem povečamo dušenje stoječih valov v prečni smeri. Dušenje valov, ki so pravokotni na idealno odbojni končni steni, ostane nespremenjeno. Nazadnje lahko stranske stene povsem odstranimo, tako da stoječih valov v prečni smeri ni več. Ostane le še nekaj valov, ki so pravokotni na končni steni. Takemu resonatorju pravimo odprt resonator (slika 4.1).



Slika 4.1: Odprt resonator. Levo: lastni nihajni načini takega resonatorja imajo diskretne vrednosti valovnih vektorjev  $k_n$ . Desno: žarki, ki niso pravokotni na zrcali, uidejo iz resonatorja.

Oglejmo si odprte resonatorje podrobneje. V zaprti pravokotni votlini velikosti  $a \times a \times L$  z idealno prevodnimi (zrcalnimi) stenami so dovoljene vrednosti valovnega vektorja za lastna nihanja

$$\mathbf{k}_{l,m,n} = \left( \frac{l\pi}{a}, \frac{m\pi}{a}, \frac{n\pi}{L} \right), \quad (4.2)$$

kjer so  $l$ ,  $m$  in  $n$  cela števila,  $L$  dolžina,  $a$  pa prečna dimenzija resonatorja. Lastne frekvence so

$$\omega_{l,m,n} = c |\mathbf{k}_{l,m,n}|. \quad (4.3)$$

Dolžina resonatorja  $L$  je velika v primerjavi z  $\lambda$  in zato je  $n$  veliko število. Če prečnih sten ni, mora biti  $\mathbf{k}$  približno vzporeden z osjo  $z$ , zato morata biti  $l$  in  $m$  majhna. Tedaj lahko velikost valovnega vektorja razvijemo in frekvenco zapišemo kot

$$\omega_{l,m,n} = c \left( \frac{n\pi}{L} + \frac{l^2 + m^2}{2n} \frac{L\pi}{a^2} \right). \quad (4.4)$$

Drugi člen v oklepaju je navadno le majhen popravek, tako da so lastne frekvence odprtih optičnih resonatorjev odvisne predvsem od števila vozlov v vzdolžni smeri. To število je navadno veliko, med  $10^5$  in  $10^7$ . Možna so tudi lastna nihanja z nekaj vozli v prečni smeri, ki pa le malo vplivajo na lastne frekvence. Zato bomo v nadaljevanju obravnavali predvsem lastna stanja brez vozlov v prečni smeri, ki jih bomo označili z enim samim indeksom  $n$ .

Razlika med frekvencama dveh zaporednih lastnih nihanj  $n$  in  $n+1$  je

$$\Delta\omega_n = \frac{\pi c}{L}. \quad (4.5)$$

Pri dolžini resonatorja  $L = 30 \text{ cm}$  je v frekvenčnem intervalu s širino  $3 \cdot 10^9 \text{ Hz}$  le še 6 nihanj, ki jih je brez težav mogoče razločiti.

V zaprtih votlinah z zrcalnimi stenami obstajajo dobro določena lastna stanja pri poljubni obliki votline. Pri odprtih resonatorjih to ne velja. Da se pojavijo lastna nihanja z majhnimi izgubami, morata biti izpolnjena dva pogoja:

1. Snop geometrijskih žarkov mora ostati po mnogih odbojih ujet med zrcaloma resonatorja.
2. Polmer zrcala mora biti večji od polmera uklonsko razširjenega snopa, ki izhaja iz nasprotnega zrcala.

Resonatorjem, ki zadoščajo gornjima pogojem, pravimo stabilni resonatorji. Drugi pogoj lahko zapišemo tudi z enačbami, izhajajoč iz enačbe za oceno divergencije (enačba 3.1):

$$\vartheta = \frac{\lambda}{a_1} < \frac{a_2}{L} \quad \Rightarrow \quad \frac{a_1 a_2}{\lambda L} > 1, \quad (4.6)$$

kjer sta  $a_1$  in  $a_2$  polmera zrcal resonatorja. Izrazu  $F = a_1 a_2 / \lambda L$  pravimo tudi Fresnelovo število.

### Fabry-Perotov interferometer

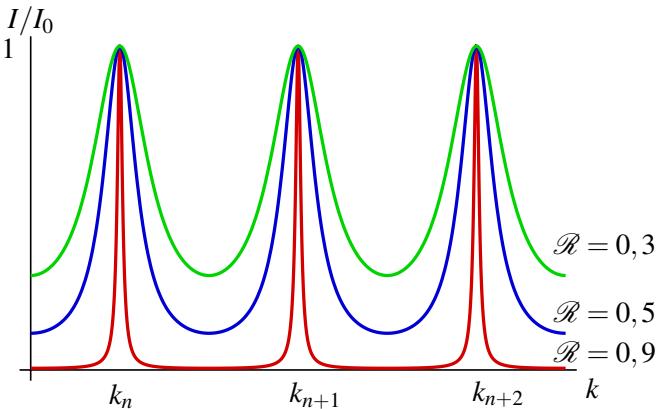
Poglejmo preprost primer resonatorja, omejenega z dvema vzporednima ravnima zrcaloma z veliko odbojnostjo. Takemu sistemu pravimo Fabry-Perotov interferometer<sup>1</sup>. Da nastane med zrcaloma stoječe valovanje, mora biti razdalja med zrcaloma večkratnik polovične valovne dolžine (enačba 4.2)

$$L = \frac{n\lambda}{2}. \quad (4.7)$$

Prepustnost interferometra za ravni val, ki vpada pravokotno na zrcali z odbojnostjo  $\mathcal{R}$ , je

$$T = \frac{1}{1 + \frac{4\mathcal{R}}{(1-\mathcal{R})^2} \sin^2 kL} \quad (4.8)$$

in je prikazana na sliki (4.2). Ko je frekvenca vpadnega valovanja ravno enaka lastni frekvenci resonatorja, je sistem v resonanci in  $T = 1$ . Širina resonance je tem manjša, čim večja je odbojnost zrcal. Ta tudi določa čas dušenja vzbujenega lastnega nihanja.



Slika 4.2: Prepustnost Fabry-Perotovega interferometra v odvisnosti od valovnega vektorja  $k$  za tri različne odbojnosti zrcal  $\mathcal{R}$ .

<sup>1</sup>Francoska fizika Maurice Paul Auguste Charles Fabry, 1867–1945, in Jean-Baptiste Alfred Perot, 1863–1925.

**Naloga 4.1.1** Pokaži, da je prepustnost Fabry-Perotovega interferometra, katerega zrcali imata odbojnost  $\mathcal{R}$ , enaka

$$T = \frac{1}{1 + \frac{4\mathcal{R}}{(1-\mathcal{R})^2} \sin^2 \delta}, \quad (4.9)$$

kjer je  $\delta = kL \cos \vartheta$ ,  $L$  razmik med zrcaloma,  $\vartheta$  vpadni kot,  $k$  pa valovni vektor svetlobe.

Prvemu pogoju stabilnosti ustreza v Fabry-Perotovem interferometru le žarki, ki so natanko pravokotni na zrcali. Čim sta zrcali le malo nevporedni, stabilnih žarkov sploh ni več. Tako imenovani planparalelni interferometer je tako na meji stabilnosti. Z izpolnjevanjem drugega pogoja ni težav, saj morata biti pri na primer 30 cm dolgem resonatorju in valovni dolžini 0,5  $\mu\text{m}$  zrcali večji od 0,4 mm, da zadostita pogoju, zapisanem v enačbi (4.6).

Bolj stabilni resonatorji so sestavljeni iz dveh konkavno ukrivljenih zrcal. Tedaj so žarki, ki potujejo pod majhnim kotom glede na osrednjo os, ujeti med zrcaloma in energija lastnih valovanj ostaja lokalizirana blizu osi.

## 4.2 Gaussovi snopi v resonatorjih

V stabilnih resonatorjih s konkavnima zrcaloma pričakujemo, da so lastna valovanja omejena na bližino osrednje osi in zrcali mnogo večji od polmera lastnega nihanja. Tedaj lahko za obravnavo električnega polja uporabimo obosno valovno enačbo (enačba 3.5). Veliko odbojnost imajo zrcala z veliko električno prevodnostjo. Iz tega izhaja robni pogoj, ki pravi, da je električno polje na zrcalu približno enako nič. Valovna fronta stoečega valovanja na zrcalu mora zato sovpadati s površino zrcala.



Slika 4.3: Gaussov snop v odprtem resonatorju s konkavno ukrivljenima zrcaloma s krivinskima radijema  $R_1$  in  $R_2$ . Krivinski radij zrcal se ujema s krivinskim radijem čela snopa. Kadar sta polmera različna, grlo ne leži na sredini med zrcaloma.

V prečni smeri omejene rešitve obosne enačbe smo našli v obliki potupočnih Gaussovih snopov (enačba 3.27). Podobno kot zapišemo stoeče valovanje na vrvi kot vsoto valovanj v nasprotnih smereh lahko stoeče snope zapišemo kot s superpozicijo snopov, ki se širijo v različnih smereh ob osi. Da zadostimo robnim pogojem na zrcalih, se mora krivinski radij snopa ujemati s krivinskima radijema zrcal  $R_1$  in  $R_2$  (slika 4.3). Pri tem sta neznanki polmer grla snopa, ki je podan s parametrom  $z_0$ , in lega grla.

Postavimo izhodišče osi  $z$  v grlo, kot smo navajeni, tako da sta zrcali pri  $z_1 < 0$  in  $z_2 > 0$ . Z uporabo enačbe za krivinski radij snopa  $R$  (enačba 3.23) dobimo

$$-R_1 = z_1 \left[ 1 + \left( \frac{z_0}{z_1} \right)^2 \right] \quad \text{in} \quad (4.10)$$

$$R_2 = z_2 \left[ 1 + \left( \frac{z_0}{z_2} \right)^2 \right]. \quad (4.11)$$

Pri tem smo upoštevali, da je krivinski radij za konkavno zrcalo glede na pozitivno smer  $z$  pozitiven. Prvo enačbo smo zapisali z negativnim predznakom pri  $R_1$ , zato da je krivinski radij pozitivno število. Veljati mora še

$$z_2 - z_1 = L. \quad (4.12)$$

Iz gornjih enačb najprej izračunamo razdaljo  $z_1$ , ki določa lego grla v resonatorju, nato pa parameter  $z_0$ , ki določa območje bližnjega polja, in preko enačbe (3.20) enolično tudi polmer grla

$$z_0^2 = \frac{L(R_1 - L)(R_2 - L)(R_1 + R_2 - L)}{(R_1 + R_2 - 2L)^2}. \quad (4.13)$$

Da je snop realen in omejen, mora biti  $z_0^2 > 0$  in zato števec gornjega izraza pozitiven. Ta pogoj lahko po kratkem računu zapišemo v obliki stabilnostnega kriterija

$$0 < \left( 1 - \frac{L}{R_1} \right) \left( 1 - \frac{L}{R_2} \right) < 1. \quad (4.14)$$

Resonatorji, ki zadoščajo gornjemu pogoju, so stabilni.

---

**Naloga 4.2.1** Izhajajoč iz pogoja, da se na zrcalih krivinski radij valovnih front snopa ujema s krivinjskim radijem zrcal (enačbi 4.10 in 4.11) izpelji kriterij za stabilno delovanje resonatorja (enačba 4.14).

---

Stabilnostni kriterij za resonatorje je najbolj nazorno predstaviti na diagramu, kjer na os  $x$  nanašamo  $L/R_1$ , na os  $y$  pa  $L/R_2$ . Na sliki (4.4) je stabilno območje delovanja resonatorjev, kot ga razberemo iz enačbe (4.14), označeno senčeno. Opazimo, da je možnih veliko različnih vrst stabilnih resonatorjev, ob tem da resonatorji, ki so sestavljeni iz dveh konveksnih zrcal, niso nikoli stabilni. Če je eno zrcalo ravno (plankonkavni resonatorji), je grlo Gaussovega snopa vedno na ravnem zrcalu. V primeru konveksno-konkavnega resonatorja leži grlo snopa izven resonatorja. Podrobneje si oglejmo nekaj posebnih primerov stabilnih resonatorjev.

### Simetrični resonatorji

Za simetrični resonator velja  $R_1 = R_2 = R$ . Na diagramu (slika 4.4) se taki resonatorji nahajajo na simetrali lihih kvadrantov pri  $x = y$ . Pri simetričnih resonatorjih je grlo v sredini resonatorja in enačba (4.13) se poenostavi v

$$z_0 = \frac{1}{2} \sqrt{(2R - L)L}. \quad (4.15)$$

Polmer grla v simetričnem resonatorju je enak

$$w_0 = \sqrt{\frac{\lambda z_0}{\pi}} = \sqrt{\frac{\lambda}{2\pi}} \sqrt[4]{(2R - L)L}. \quad (4.16)$$



Slika 4.4: Področje stabilnih resonatorjev. Resonator je stabilen, če sta parametra  $L/R_1$  in  $L/R_2$  znotraj osenčenega območja: (a) konfokalni resonator, (b) koncentrični resonator, (c) planparalelni resonator (Fabry-Perot), (d) konveksno-konkavni resonator in (e) plankonkavni resonator.

Po enačbi (3.19) lahko izračunamo še polmer snopa na ogledalu

$$w_1^2 = w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{L}{2z_0} \right)^2 \right] = \frac{\lambda}{\pi} \frac{R\sqrt{L}}{\sqrt{2R-L}}. \quad (4.17)$$

Pri izbrani dolžini simetričnega resonatorja je polmer snopa na zrcalu najmanjši, kadar je  $R = L$ . Tedaj sovpadata geometrijski gorišči obeh zrcal, zato imenujemo tak resonator konfokalni. Hiter račun pokaže, da velja  $z_0 = L/2$ , snop od grla do zrcala pa se razširi za  $w_1/w_0 = \sqrt{2}$ .

---

**Naloga 4.2.2** Pokaži, da je polmer snopa na izhodnem zrcalu v simetričnem resonatorju z danimi parametromi  $R$  in  $L$  najmanjši, kadar je resonator konfokalni.

---

Pri dejanskem načrtovanju laserjev velja dodatna omejitev, saj želimo ojačevalno sredstvo, ki je v resonatorju, čim boljše izrabiti. Pogosto je zato polmer grla snopa razmeroma velik. Iz enačbe (4.16) sledi, da mora biti v tem primeru velik tudi krivinski radij zrcal. S tem pridobimo na ojačanju, po drugi strani pa se nekoliko poslabša stabilnost.

Poglejmo primer. Naj bo dolžina resonatorja laserja  $L = 1$  m in valovna dolžina  $\lambda = 633$  nm. Tedaj je v konfokalni geometriji po enačbi (4.16) polmer grla  $w_0 = 0,32$  mm. Premer razelektrične cevi je navadno nekaj milimetrov in približno tako debel mora biti tudi svetlobni snop, če naj dobro izkoristi ojačanje zaradi stimuliranega sevanja. Da bi pri isti dolžini laserja dobili grlo s premerom 2 mm, moramo vzeti zrcali s krivinskim radijem okoli 50 m. Primer kaže, da že majhna ukrivljenost zrcal zagotovi dokaj ozke snope.

 Izkaže se, da so konfokalni resonatorji najmanj občutljivi na majhne zasuke zrcal. Pri zasuku zrcala se v navadnih stabilnih resonatorjih namreč premakne os, ki gre skozi krivinski središči obeh zrcal. Če želimo, da je največji odmik nove osi čim manjši, uporabimo konfokalne resonatorje.

Skrajna primera stabilnega simetričnega resonatorja sta koncentrični resonator, pri katerem sovpadata krivinski središči zrcal in  $L = 2R$ , in planparalelni resonator, pri katerem sta zrcali ravni. V prvem primeru gre po enačbi (4.16) polmer grla proti nič, v drugem pa raste sorazmerno z  $R^{1/4}$ . Pri ravnih zrcalah postanejo uklonske izgube na robovih znatne. Račun z Gaussovimi snopi tedaj ni več veljaven in treba je uporabiti pristope, ki jih bomo opisali v razdelku (4.6).

Spomnimo se, da obstajajo poleg osnovnega Gaussovega snopa še rešitve obosne enačbe z vozli v prečni smeri, to so snopi višjega reda. Imajo enak parameter  $z_0$  in enako ukrivljenost valovnih ploskev, zato so seveda tudi dobre rešitve za polje v stabilnih resonatorjih. Pri tem je treba vedeti, da je pri enakem  $w_0$  dejanski polmer snopa reda  $n$  za približen faktor  $\sqrt{n}$  večji (glej nalogo 3.4.1). Če želimo dobiti iz laserja samo osnovni Gaussov snop (imenovan tudi  $TEM_{00}$ ), ki ima od vseh snopov najbolj gladko valovno fronto in ima najmanjšo divergenco pri danem  $w_0$ , pogosto uporabimo zaslonko, ki snope višjih redov poreže, ali kakšen drug element, na primer Fabry-Perotov etalon, ki poveča izgube za snope višjega reda.

 V praksi se včasih uporablajo tudi nestabilni resonatorji, to je taki, za katere ne obstajajo rešitve v obliki Gaussovih snopov. Taki resonatorji imajo velike izgube na robovih zrcal, ker žarki v njih niso ujeti. Uporabni so v laserjih z velikim ojačanjem. Njihova prednost je, da je cel volumen resonatorja enakomerno pokrit s svetlobo.

### 4.3 Stabilnostni kriterij z ABCD formalizmom

V prejšnjem razdelku smo izpeljali pogoj za stabilnost resonatorja, sestavljenega iz dveh zrcal s polmeroma  $R_1$  in  $R_2$ , ki sta med seboj oddaljeni za  $L$ . Izhajali smo iz pogoja, da se ukrivljenost valovnih front na zrcalu ujema z ukrivljenostjo zrcala. Vendar so sistemi z zgolj dvema zrcalomoma razmeroma redki. Pogosto so v resonatorju druge optične komponente, ki jih je treba upoštevati pri zapisu kriterija za stabilnost. Takrat si pomagamo z matrikami ABCD.

Izhajamo iz zahteve, da se v stabilnem resonatorju snop po enem celotnem obhodu preslika sam vase. Gaussov snop na neki točki v resonatorju zapišemo s kompleksno ukrivljenostjo (enačba 3.30). V najpreprostejšem primeru resonatorja snop prepotuje dano razdaljo, se odbije od zrcala, prepotuje resonator v nasprotni smeri, se odbije od drugega zrcala in se vrne v začetno lego. V bolj zapletenih primerih dodamo še prehode skozi druge optične elemente. Matriko za celotni prehod potem zapišemo kot produkt matrik ABCD za posamezne prehode  $M = M_N M_{N-1} \dots M_2 M_1$ . Končni produkt za celoten obhod je matrika oblike

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (4.18)$$

kompleksni krivinski radij po prehodu pa je enak začetnemu kompleksnemu radiju

$$q_2 = \frac{Aq + B}{Cq + D} = q. \quad (4.19)$$

Gornjo enačbo prepišemo v

$$Cq^2 + (D - A)q - B = 0. \quad (4.20)$$

Da je  $w$  realen, mora biti  $q$  kompleksen in diskriminanta negativna

$$(D - A)^2 + 4BC < 0. \quad (4.21)$$

Upoštevamo še, da je determinanta matrike  $AD - BC = 1$  in dobimo pogoj za stabilnost, zapisan s koeficienti matrike  $M$ :

$$-1 < \left( \frac{A+D}{2} \right) < 1. \quad (4.22)$$

**Naloga 4.3.1** Pokaži, da je za resonator z dolžino  $L$  in s konkavnima zrcaloma s krivinskima radijema  $R_1$  in  $R_2$  pogoj za stabilnost (enačba 4.22) ekvivalenten pogoju (4.14).

Podoben, a malo bolj zapleten račun lahko naredimo tudi za resonatorje, v katerih se snop ne vrne v svojo začetno obliko po enem obhodu, ampak je teh obhodov  $n$ . Potem zapišemo matriko  $M$  kot produkt elementov v enem obhodu, celotna matrika pa je enaka  $M^n$ . Iz pogoja, da matrika ne divergira za velike  $n$ , izpeljemo pogoj za stabilnost, ki je natančno enak pogoju (4.22), ki smo ga ravnokar izpeljali.

## 4.4 Resonančne frekvence

Doslej smo obravnavali le prostorsko obliko polja v resonatorju, ničesar pa še nismo povedali o časovni odvisnosti lastnih nihanj. Frekvence lastnih nihanj izpeljemo iz pogoja, da se mora faza snopa pri enem obhodu (preletu resonatorja v obeh smereh) spremeniti za mnogokratnik  $2\pi$ . Fazo za osnovni snop zapišemo po enačbi (3.27)

$$kz + \frac{kr^2}{2R} - \eta(z) = kz - \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad (4.23)$$

pri čemer gledamo valovanje na osi, pri  $r = 0$ . Razlika faze pri enem preletu je

$$\frac{\omega_n}{c}L - \left[ \arctan\left(\frac{z_2}{z_0}\right) - \arctan\left(\frac{z_1}{z_0}\right) \right] = n\pi \quad (4.24)$$

Pri tem smo zanemarili, da lahko pride do dodatne majhne spremembe faze pri odboju na zrcalu. Ta za delček valovne dolžine spremeni efektivno dolžino resonatorja, ki je niti ne poznamo tako natančno. Iz istega razloga za osnovni snop ni treba upoštevati člena v oglatem oklepaju enačbe (4.24). Tako dobimo znano enačbo za resonančne frekvence

$$\omega_n = \frac{n\pi c}{L}. \quad (4.25)$$

Razmik med dvema zaporednima lastnima frekvencama je v skladu z enačbo (4.5)

$$\Delta\omega = \frac{\pi c}{L}. \quad (4.26)$$

Za snope višjega reda, ki imajo vozle v prečni smeri, je fazni premik odvisen tudi od števila vozlov. Tako je na primer v cilindričnih koordinatah (enačba 3.36)

$$\eta_{p,l}(z) = (2p + l + 1) \arctan\left(\frac{z}{z_0}\right). \quad (4.27)$$

Resonančni pogoj zapišemo kot

$$\frac{\omega_{n,p,l}}{c} L - (2p + l + 1) \left[ \arctan\left(\frac{z_2}{z_0}\right) - \arctan\left(\frac{z_1}{z_0}\right) \right] = n\pi. \quad (4.28)$$

Resonančne frekvence so torej odvisne tudi od števila prečnih vozlov (slika 4.5), kar je dodaten razlog, da v laserjih vzbujamo le osnovno lastno nihanje.



Slika 4.5: Resonančne frekvence za skoraj planparalelni ( $R \gg L$ ) resonator.

Zanimiv in praktično pomemben je primer konfokalnega resonatorja, pri katerem je  $z_0 = L/2$  in  $\arctan(L/2z_0) = \arctan(1) = \pi/4$ . Resonančne frekvence so

$$\omega_{n,p,l} = \frac{\pi c}{L} \left[ n + \frac{1}{2}(2p + l + 1) \right]. \quad (4.29)$$

Snopi, pri katerih je  $2p + l$  liho število, imajo iste resonančne frekvence kot osnovni snopi, pri sodih  $2p + l$  pa se pojavijo še resonance na sredini med osnovnimi. Razmak med sosednjimi frekvencami je tako  $\Delta\nu = c/4L$  in konfokalni interferometer se obnaša kot dvakrat daljši planparalelni. To lahko razumemo tudi iz geometrijske slike: žarek, ki vstopi v konfokalni interferometer vzporedno z osjo, se šele po dveh preletih vrne sam vase.



Slika 4.6: V konfokalnem resonatorju se žarek šele po dveh preletih vrne sam vase.

Pri skoraj planparalelnem resonatorju je  $z_0 \gg L$ ,  $\arctan(L/2z_0)$  lahko razvijemo, upoštevamo enačbo (4.15) in dobimo

$$\omega_{n,p,l} = \frac{\pi c}{L} \left[ n + (2p + l + 1) \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2L}{R}} \right]. \quad (4.30)$$

Ker je  $L$  majhen v primerjavi z  $R$ , so resonance snopov nizkega prečnega reda zelo blizu resonancam osnovnih snopov, niso pa čisto enake. Poglejmo primer. Vzemimo simetrični resonator z dolžino  $L = 1$  m in krivinskim radijem zrcal  $R = 50$  m, valovna dolžina pa naj bo  $\lambda = 500$  nm. Z uporabo enačbe (4.15) hitro lahko izračunamo  $z_0 = 4,97$  m. Ker je pogoj  $z_0 \gg L$  izpolnjen, lahko uporabimo gornji približek. Razlika med frekvencama za dva zaporedna osnovna snopa

$$\Delta\omega_{n,p,l} = \frac{\pi c}{L} = 940 \text{ MHz}, \quad (4.31)$$

medtem ko je razlika med frekvencama dveh prečnih snopov

$$\Delta\omega_{n,p,l} = \frac{c}{L} \sqrt{\frac{2L}{R}} = 60 \text{ MHz}. \quad (4.32)$$

## 4.5 Izgube v resonatorjih

Energija lastnega nihanja odprtrega resonatorja ni konstantna, ampak se počasi zmanjšuje iz več vzrokov:

1. Odbojnost ogledal ni enaka 1. Tudi če bi znali narediti popolno odbojna zrcala, tak resonator ne bi bil uporaben, saj nihanja ne bi mogli sklopiti z zunanjim poljem. Če torej hočemo dobiti nekaj svetlobe iz laserja ali filtrirati vpadajoči snop, mora biti odbojnost zrcal manjša od 1.
2. Na sredstvu in na optičnih elementih v resonatorju pride do absorpcije in sipanja svetlobe. Te izgube želimo navadno čim bolj zmanjšati.
3. Uklonske izgube so odvisne od premera zrcal in premera snopa na njih. V dani geometriji imajo najmanjši polmer osnovni snopi, snopi višjega reda so širši, zato imajo večje uklonske izgube. Merilo za uklonske izgube je Fresnelovo število (enačba 4.6)  $N_F = a^2/(L\lambda)$ , kjer je  $a$  polmer ogledal. Pri enakem  $N_F$  je polmer snopa na izhodnem zrcalu najmanjši, če je resonator konfokalni, zato ima tak resonator tudi najmanjše uklonske izgube (glej analogo 4.2.2). Če je  $N_F$  znatno večji od 1, kar navadno je, so uklonske izgube zanemarljive.

Vse izgube lahko popišemo z razpadnim časom za energijo nihanja

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{2}{\tau}W, \quad (4.33)$$

in

$$W = W_0 e^{-\frac{2t}{\tau}}, \quad (4.34)$$

pri čemer  $\tau$  imenujemo življenjski ali razpadni čas nihanj. Izguba energije na celoten obhod resonatorja je

$$-dW = (1 - \mathcal{R}_1)W + (1 - \mathcal{R}_2)W + \Lambda_0 W = \Lambda W. \quad (4.35)$$

Z  $\mathcal{R}_1$  in  $\mathcal{R}_2$  smo označili odbojnosti zrcal, od katerih je navadno ena kolikor mogoče blizu 1. Parameter  $\Lambda_0$  popiše absorpcijo in sipanje znotraj resonatorja ter morebitne uklonske izgube. Tipične vrednosti zanj so do nekaj stotink. Celotne izgube popišemo s parametrom  $\Lambda$ .

Razpadni čas nihanja lahko neposredno povežemo z izgubami, če v enačbo (4.33) vstavimo čas enega obhoda  $t = 2L/c$ . Zapišemo

$$\frac{dW}{W} = \Lambda = -\frac{2}{\tau} \frac{2L}{c}, \quad (4.36)$$

od koder sledi

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\Lambda c}{4L} = \frac{1}{\tau_0} + \frac{c}{4L}[(1 - \mathcal{R}_1) + (1 - \mathcal{R}_2)], \quad (4.37)$$

kjer smo s

$$\tau_0 = \frac{4L}{\Lambda_0 c} \quad (4.38)$$

označili razpadni čas zaradi notranjih izgub.

Notranje izgube so navadno zelo majhne, odbojnosc enega zrcala pa je približno enaka 1, tako da je življenjski čas nihanj približno

$$\frac{1}{\tau} = \frac{c}{4L}(1 - \mathcal{R}). \quad (4.39)$$

Zaradi dušenja se energija lastnih nihanj eksponentno zmanjšuje, prav tako tudi amplituda jakosti električnega polja. Amplituda pojema z dvakrat daljšim karakterističnim časom, ki je enak kar  $\tau$ . Spekter eksponentno pojemajoče funkcije lahko izračunamo (glej nalogo 2.4.2) in dobimo Lorentzovo krivuljo s širino črte, ki ustreza ravno

$$\Delta\omega_{1/2} = \frac{1}{\tau}. \quad (4.40)$$

Lastne frekvence torej niso neskončno ozke, ampak imajo končno širino  $2/\tau$ . Poglejmo primer. Naj bodo notranje izgube na en obhod  $\Lambda_0 = 0,01$ , eno zrcalo naj bo idealno, drugo naj ima odbojnosc  $\mathcal{R} = 0,93$ . Dolžina resonatorja naj bo  $L = 0,5$  m, valovna dolžina pa 500 nm. Tedaj je  $1/\tau = 12 \cdot 10^6$  s<sup>-1</sup>. Zanimivo je pogledati razmerje med razmikom med zaporednima resonančnima frekvencama  $\Delta\omega$  (enačba 4.5) in širino resonance  $2/\tau$ . Dobimo  $\Delta\omega\tau/2 \approx 80$ .



Namesto razpadnega časa  $\tau$  se pogosto za opis izgub uporablja dobrota resonatorja, ki jo vpeljemo kot razmerje med resonančno frekvenco in širino črte

$$Q = \frac{\omega_n}{\Delta\omega_{1/2}}. \quad (4.41)$$

Za tipične optične resonatorje je resonančna frekvanca  $\omega_n \sim 10^{15}$  Hz, širino pa smo izračunali, da je reda  $1/\tau \sim 10^7$  Hz. Faktor dobrete je tako  $Q \sim 10^8$ . Optični resonatorji imajo zelo velike faktorje dobrete!

Poglejmo še primer, ko so notranje izgube zanemarljive in sta odbojnosti obeh zrcal enaki. Potem sledi iz enačbe (4.37)

$$\frac{1}{\tau} = \frac{c}{2L}(1 - \mathcal{R}). \quad (4.42)$$

To istega rezultata pridemo tudi z razvojem izraza za prepustnost Fabry-Perotovega interferometra (enačba 4.8) okoli vrha pri  $\omega_n$ :

$$T = \frac{1}{1 + \frac{4\mathcal{R}}{(1-\mathcal{R})^2} \sin^2 L \frac{c}{(\omega - \omega_n)}} \approx \frac{1}{1 + \left[ \frac{2}{(1-\mathcal{R})} \frac{L}{c} (\omega - \omega_n) \right]^2}, \quad (4.43)$$

kjer smo upoštevali še, da je odbojnosc blizu  $\mathcal{R} \approx 1$ . Rezultat je znana Lorentzova krivulja oblike

$$T = \frac{(\Delta\omega_{1/2})^2}{(\omega - \omega_n)^2 + (\Delta\omega_{1/2})^2}, \quad (4.44)$$

od koder hitro razberemo

$$\frac{1}{\tau} = \Delta\omega_{1/2} = \frac{c}{2L}(1 - \mathcal{R}). \quad (4.45)$$

#### 4.6 \*Obravnavava z uklonskim integralom

V nestabilnih resonatorjih stacionarna rešitev v obliki stoječega Gaussovega snopa ne obstaja. Zato je v takih resonatorjih poiskati rešitev za električno polje precej zahtevno. Ker pa je problem soroden uklonu, ga lahko obravnavamo s pomočjo uklonske teorije.

Naj bo električno polje v točki  $P_1$  prvega zrcala  $E_1$ . Polje na drugem zrcalu v točki  $P_2$  lahko zapišemo s pomočjo Kirchhoffovega uklonskega integrala (enačba 1.56)

$$E_2 = -\frac{i}{2\lambda} \int_1 E_1(P_1) \frac{e^{ikr}(1 + \cos \vartheta)}{r} dS_1 \quad (4.46)$$

$$= \int_1 E_1(P_1) K(P_1, P_2) dS_1, \quad (4.47)$$

kjer je  $r$  razdalja med točkama  $P_1$  in  $P_2$ ,  $\vartheta$  je kot med zveznico in normalo na zrcali, druge faktorje pa smo pospravili v faktor

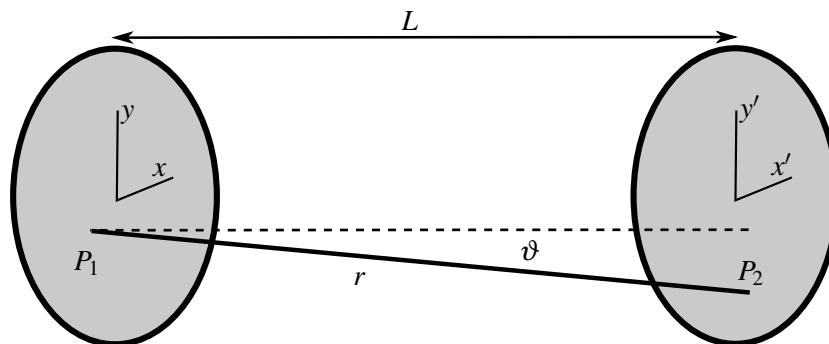
$$K(P_1, P_2) = -\frac{i}{2\lambda} \frac{e^{ikr}(1 + \cos \vartheta)}{r}, \quad (4.48)$$

ki predstavlja jedro integralske enačbe. Polje na prvem zrcalu mora biti na enak način povezano s poljem na drugem. Če naj zapisano polje predstavlja lastno nihanje resonatorja, mora biti po dveh odbojih sorazmerno začetnemu polju:

$$E_1(P) = \gamma \int_1 \int_2 E_1(P_1) K(P_1, P_2) K(P_2, P_1) dS_1 dS_2. \quad (4.49)$$

Enačba (4.49) je homogena integralska enačba, katere lastne rešitve so iskana lastna nihanja elektromagnetnega polja v resonatorju. Kompleksne lastne vrednosti  $\gamma$  določajo frekvenco in dušenje nihanj. V splošnem rešitev ni mogoče poiskati analitično in treba je uporabiti numerične metode. Najenostavnejša je iterativna metoda, pri kateri začnemo z nekim začetnim poljem in ponavljamo integracijo v enačbi (4.49), dokler se polje ne spreminja več.

Integralsko enačbo (4.49) je mogoče rešiti v posebnem primeru konfokalnega resonatorja. Prizemimo, da je brez izgub. Ker je resonator simetričen, se polje na obeh zrcalih lahko razlikuje kvečjemu za predznak. Vpeljimo kartezische koordinate na obeh zrcalih, kot kaže slika (4.7).



Slika 4.7: Koordinatna sistema na zrcalih resonatorja

Pričakujemo, da bo prečna razsežnost lastnega stanja majhna v primerjavi z dolžino resonatorja, zato lahko  $r$  razvijemo

$$r \approx L - \frac{xx' + yy'}{L}. \quad (4.50)$$

Ker obravnavamo konfokalni resonator, je krivinski radij zrcal kar enak dolžini resonatorja. V imenovalcu jedra integrala (enačba 4.48) zato lahko  $r$  nadomestimo z  $L$ . Kot med zveznico točk na obeh zrcalih in normalo na zrcali so majhni, zato je  $\cos \vartheta \approx 1$ .

Tako iz enačbe (4.47) sledi

$$E(x',y') = \pm \frac{ie^{ikL}}{\lambda L} \int E(x,y) \exp\left[\frac{-ik(xx' + yy')}{L}\right] dx dy. \quad (4.51)$$

Integracija poteka po celiem zrcalu. Jedro integrala je produkt dveh faktorjev, ki vsebujejo vsak le  $x'$  ali  $y'$  koordinati. Zato poiščimo rešitev enačbe (4.51) v obliki produkta  $E(x',y') = E_0 f(x') g(y')$ . S tem nastavkom morata biti funkciji  $f(x')$  in  $g(y')$  rešitvi enačbe

$$\alpha f(x') = \int f(x) \exp\left[\frac{-ikxx'}{L}\right] dx, \quad (4.52)$$

kjer je  $\alpha$  še neznana konstanta. Meje integrala so od enega do drugega roba zrcala. Če je zrcalo dovolj veliko, pričakujemo, da je polje na robu dovolj majhno, da lahko meje vzamemo kar od  $-\infty$  do  $\infty$ . Vpeljimo še brezdimenzijski koordinati

$$X' = x' \sqrt{k/L} \quad \text{in} \quad Y' = y' \sqrt{k/L} \quad (4.53)$$

in dobimo

$$\alpha f(X') = \sqrt{\frac{L}{k}} \int_{-\infty}^{\infty} f(X) e^{-iXX'} dX \quad (4.54)$$

ter podobno enačbo za  $g(Y')$ . Enačba (4.54) pravi, da mora biti  $f(X)$  podobna svoji Fourierovi transformiranki. Najpreprostejša funkcija s to lastnostjo je Gaussova funkcija

$$f(X) = \exp[-\frac{1}{2}X^2]. \quad (4.55)$$

Polje na zrcalu ima tako po pričakovanju obliko Gaussovega snopa

$$E(x,y) = E_0 \exp\left[-\frac{k(x^2 + y^2)}{2L}\right]. \quad (4.56)$$

Poglejmo še konstanto  $\alpha$ . Imeti mora imeti vrednost  $\alpha = \sqrt{2\pi L/k} = \sqrt{\lambda L}$ . Enaki izrazi veljajo tudi za smer  $y$ . Postavimo zdaj izračunano električno poljsko jakost (enačba 4.56) z ustrezno vrednostjo za  $\alpha$  v enačbo (4.51) in upoštevajmo, da mora biti  $E_2 = \pm E_1$ . Sledi

$$i\alpha^2 \frac{e^{ikL}}{\lambda L} = ie^{ikL} = \pm 1. \quad (4.57)$$

Izpeljemo resonančni pogoj za frekvenco lastnega stanja, ki ga že poznamo (enačba 4.29)

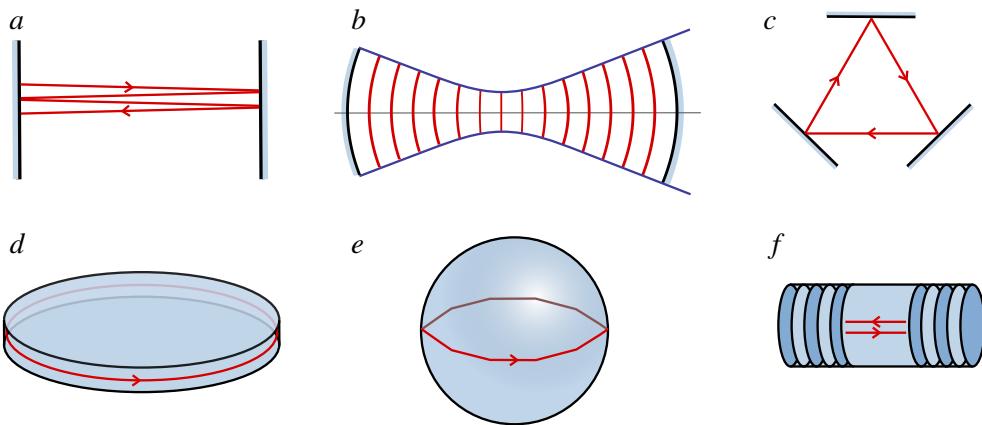
$$\omega_n = ck_n = \frac{c}{L}(2n+1)\frac{\pi}{2}. \quad (4.58)$$

Integralna enačba, dobljena iz uklonske teorije, tako da isti rezultat kot stoječe valovanje oblike Gaussovih snopov, ki so rešitve obosne valovne enačbe. To nas seveda ne preseneča, saj je obosna valovna enačba enako natančna kot Fresnelova uklonska teorija.

**Naloga 4.6.1** Pokaži, da so funkcije, ki so sorazmerne svoji Fourierovi transformaciji, Hermite-Gaussove funkcije (enačba 3.31), in izračunaj lastne frekvence stanj višjega reda.



V tem poglavju smo obravnavali samo dva primera laserskih resonatorjev: Fabry-Perotov resonator z dvema vzporednima ravnimi zrcaloma (a) in resonator z dvema sferičnima zrcaloma (b). Poleg teh dveh primerov je v uporabi še cela vrsta različnih resonatorjev. Ciklični resonator (c) je sestavljen iz več zrcal in žarek ciklično potuje med njimi. V vlakenskih laserjih je resonator optično vlakno med dvema zrcaloma ali pa sklenjeno vlakno. Kot laserski resonator lahko delujejo tudi mikroploščice (d) ali mikrokroglice (e), v katere je s totalnim odbojem ujeta svetloba. Namesto zrcal v mikroresonatorjih uporabimo tudi periodične dielektrične strukture, na katerih pride do Braggovega odboja (f).



## 5. Interakcija svetlobe s snovjo

V prejšnjih poglavjih smo obravnavali svetlobo v praznem prostoru. Oglejmo si zdaj osnovne procese interakcije svetlobe s snovjo. To je seveda zelo obširna tema in jo bomo obdelali le toliko, kolikor je treba za obravnavo ojačevanja svetlobe s stimulirano emisijo, ki je osnova za delovanje laserjev. Najprej bomo na kratko pogledali termodinamsko ravnovesje svetlobe v stiku s toplotnim rezervoarjem, torej sevanje črnega telesa, ki zahteva kvantno obravnavo elektromagnetnega polja. Nato bomo vpeljali fenomenološki Einsteinov opis mikroskopskih procesov absorpcije, spontane in stimulirane emisije in pokazali, da ti procesi niso neodvisni. Izpeljali bomo izraze za absorpcijski koeficient in koeficient ojačanja, na koncu poglavja pa bomo nakazali še kvantomehansko izpeljavo verjetnosti za prehod atoma iz višjega energijskega stanja v nižje s sevanjem.

### 5.1 Kvantizacija elektromagnetnega polja

Ravni valovi so enostavne in zelo prikladne rešitve valovne enačbe (1.14), zato jih pri reševanju problemov pogosto uporabimo kot bazo, po kateri razvijemo elektromagnetno polje. Možen je razvoj po celotnem prostoru, vendar je tedaj nekoliko nerodna normalizacija baznih funkcij. Če je omejimo na le del prostora, se temu problemu izognemo. Mora pa biti izbrani del prostora dovolj velik, da končni rezultat ni odvisen od izbire njegove velikosti in oblike.

Najpreprosteje je vzeti votlino v obliki velike kocke s stranico  $L$  in idealno prevodnimi stenami. Rešitve Maxwellovih enačb (1.1 do 1.4) znotraj take votline so ob upoštevanju robnih pogojev (1.10) stoječa valovanja. Zapišemo jih v obliki

$$\begin{aligned} E_x &= E_{x0} \cos \frac{\pi l x}{L} \sin \frac{\pi m y}{L} \sin \frac{\pi n z}{L} e^{-i\omega t}, \\ E_y &= E_{y0} \sin \frac{\pi l x}{L} \cos \frac{\pi m y}{L} \sin \frac{\pi n z}{L} e^{-i\omega t}, \\ E_z &= E_{z0} \sin \frac{\pi l x}{L} \sin \frac{\pi m y}{L} \cos \frac{\pi n z}{L} e^{-i\omega t}, \end{aligned} \quad (5.1)$$

kjer so  $l, m$  in  $n$  cela števila. Vsako stoječe valovanje je določeno z valovnim vektorjem

$$\mathbf{k} = \left( \frac{\pi l}{L}, \frac{\pi m}{L}, \frac{\pi n}{L} \right), \quad (5.2)$$

katerega velikost je povezana s frekvenco  $k = \omega/c$ . Iz Maxwellove enačbe za prazen prostor (enačba 1.3)  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$  sledi  $\mathbf{k} \cdot \mathbf{E} = 0$ . Za vsako trojico števil  $l, m, n$  imamo tako le dve neodvisni polarizaciji.

**Naloga 5.1.1** Pokaži, da stoječe valovanje, zapisano v obliki (5.1), reši valovno enačbo v kocki s stranico  $L$  in zadosti robnim pogojem idealno prevodnih sten votline.

Preštejmo, koliko je lastnih nihanj v intervalu velikosti valovnega vektorja med  $k$  in  $k + dk$  - to smo na hitro naredili že pri obravnavni resonatorjev (enačba 4.1). Možni valovni vektorji tvorijo tridimenzionalno mrežo v prvem oktantu prostora vseh valovnih vektorjev. Razmik med dvema zaporednima mrežnima točkama v smeri ene od osi je  $\pi/L$ . Število točk v osmini krogelne plasti med  $k$  in  $k + dk$  je za dovolj velike  $l, m$  in  $n$  enako volumnu plasti, deljenemu z volumnom, ki pripada posamezni mrežni točki, to je  $(\pi/L)^3$ . Upoštevati moramo še, da imamo pri vsakem  $\mathbf{k}$  dve polarizaciji, in dobimo

$$dN = \left(\frac{L}{\pi}\right)^3 \pi k^2 dk. \quad (5.3)$$

Zapišemo število nihanj na enoto volumna

$$\rho(k) dk = \frac{k^2}{\pi^2} dk \quad (5.4)$$

in ga prevedemo na frekvenčno odvisnost

$$\rho(v) dv = \frac{8\pi v^2}{c^3} dv. \quad (5.5)$$

oziroma

$$\rho(\omega) d\omega = \frac{\omega^2}{\pi^2 c^3} d\omega. \quad (5.6)$$

Številu nihanj na frekvenčni interval in enoto volumna votline  $\rho(\omega)$  pravimo gostota stanj.

Vsote po lastnih valovanjih, to je po dovoljenih vrednostih valovnega vektorja  $k$  lahko s pomočjo gostote stanj spremenimo v integrale po  $k$  ali po  $\omega$

$$\sum_k \dots \rightarrow V \int \rho(k) \dots dk = V \int \rho(\omega) \dots d\omega. \quad (5.7)$$

Označimo zdaj brezdimenzijski krajevni del rešitve (5.1) z  $E_\alpha$ , kjer  $\alpha$  označuje vsa tri cela števila  $l, m$  in  $n$  in še obe možni polarizaciji, da bo manj pisave. Pripadajoče magnetno polje izračunamo z Maxwellovo enačbo (1.2)

$$\nabla \times \mathbf{E}_\alpha = i\omega \mathbf{B}_\alpha. \quad (5.8)$$

Polja  $\mathbf{E}_\alpha$  in  $\mathbf{B}_\alpha$  tvorijo poln ortogonalen sistem, zato lahko vsako elektromagnetno polje v votlini razvijemo

$$\begin{aligned} \mathbf{E}(\mathbf{r}, t) &= -\frac{1}{\sqrt{V\varepsilon_0}} \sum_\alpha p_\alpha(t) \mathbf{E}_\alpha(\mathbf{r}) \quad \text{in} \\ \mathbf{B}(\mathbf{r}, t) &= i\sqrt{\frac{\mu_0}{V}} c_0 \sum_\alpha \omega_\alpha q_\alpha(t) \mathbf{B}_\alpha(\mathbf{r}). \end{aligned} \quad (5.9)$$

Postavimo razvoj (5.9) v Maxwellovi enačbi (1.2 in 1.1), upoštevamo zvezo (5.8) in njej analogno za rotor magnetnega polja in dobimo

$$p_\alpha = \dot{q}_\alpha \quad \text{in} \quad \omega_\alpha^2 q_\alpha = -\dot{p}_\alpha, \quad (5.10)$$

od koder sledi še

$$\ddot{p}_\alpha + \omega_\alpha^2 p_\alpha = 0. \quad (5.11)$$

Ta enačba da seveda pričakovano odvisnost od časa oblike  $e^{-i\omega_\alpha t}$ .

Z upoštevanjem razvoja (enačbi 5.9) lahko zapišemo še energijo polja – Hamiltonovo funkcijo<sup>1</sup>

$$\mathcal{H} = \frac{1}{2} \int (\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}) dV = \frac{1}{2} \sum_{\alpha} (p_{\alpha}^2 + \omega_{\alpha}^2 q_{\alpha}^2). \quad (5.12)$$

Enačbi (5.11) in (5.12) kažeta, da lahko elektromagnetno polje v votlini obravnavamo kot sistem neodvisnih harmonskih oscilatorjev. Pri tem se koeficienti razvoja  $p_{\alpha}$  in  $q_{\alpha}$  obnašajo kot impulzi in koordinate.

Prehod v kvantno mehaniko dosežemo tako, da klasičnim spremenljivkam impulza in koordinate pripredimo operatorje  $\hat{p}_{\alpha}$  in  $\hat{q}_{\alpha}$ , ki morajo zadoščati komutacijskim pravilom

$$[\hat{q}_{\alpha}, \hat{p}_{\beta}] = i\hbar\delta_{\alpha,\beta}. \quad (5.13)$$

Iz kvantne mehanike vemo, da so lastne vrednosti energije harmonskega oscilatorja, opisanega s Hamiltonianom (enačba 5.12), enake

$$W_{n,\alpha} = \hbar\omega_{\alpha}(n_{\alpha} + \frac{1}{2}), \quad n_{\alpha} = 1, 2, \dots \quad (5.14)$$

Celotna energija kvantiziranega elektromagnetskoga polja v votlini je torej

$$W = \sum_{\alpha} \hbar\omega_{\alpha} n_{\alpha}, \quad (5.15)$$

pri čemer smo izpustili ničelno energijo. Izpuščali jo bomo tudi v nadaljevanju, saj je to energija osnovnega stanja, ki se ne more sprostiti.

**Razliki energije harmonskega oscilatorja, če se  $n_{\alpha}$  spremeni za 1, pravimo foton.** Iz same konstrukcije vidimo, da je pojem fotona vezan na določen opis elektromagnetskoga polja – reprezentacijo. V njej na primer vprašanje, kje se foton nahaja, očitno nima smisla.

## 5.2 Sevanje črnega telesa

Obravnavajmo sevanje v votlini, ki je v toplotnem ravnovesju s stenami s temperaturo  $T$ . Iz statistične fizike vemo, da verjetnost  $P$ , da je v izbranem stanju votline  $\alpha$   $n_{\alpha}$  fotonov, zapišemo s kanonično porazdelitvijo

$$P(n_{\alpha}) = \frac{e^{-W_{n,\alpha}/k_B T}}{\sum_{n_{\alpha}} e^{-W_{n,\alpha}/k_B T}} = \frac{e^{-\beta\hbar\omega_{\alpha}n_{\alpha}}}{\sum_{n_{\alpha}} e^{-\beta\hbar\omega_{\alpha}n_{\alpha}}} = e^{-\beta\hbar\omega_{\alpha}n_{\alpha}}(1 - e^{-\beta\hbar\omega_{\alpha}}), \quad (5.16)$$

pri čemer  $\beta = 1/k_B T$  in  $k_B$  Boltzmannova konstanta. Povprečno število fotonov v stanju  $\alpha$  je potem

$$\overline{n_{\alpha}} = \sum_{n_{\alpha}} n_{\alpha} P(n_{\alpha}) = \frac{1}{e^{\beta\hbar\omega_{\alpha}} - 1}. \quad (5.17)$$

S tem izrazom lahko tudi verjetnost  $P(n)$  zapišemo nekoliko drugače

$$P(n) = \frac{\bar{n}^n}{(1 + \bar{n})^{1+n}}. \quad (5.18)$$

---

<sup>1</sup>Irski fizik in matematik Sir William Rowan Hamilton, 1805–1865.

Ravnovesno gostoto energije elektromagnetnega polja v votlini na frekvenčni interval  $u$  dobimo tako, da povprečno energijo posameznega stanja  $n_\alpha \hbar \omega_\alpha$  pomnožimo s številom stanj na frekvenčnem intervalu, to je, z gostoto stanj  $\rho(\omega)$  (enačba ref4.4)

$$u(\omega) d\omega = \hbar \omega \bar{n} \rho(\omega) d\omega = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \frac{\omega^3 d\omega}{e^{\beta \hbar \omega} - 1}. \quad (5.19)$$

Dobimo znano formulo za energijo na enoto volumna na enoto frekvence, to je Planckov zakon<sup>2</sup> za spekter svetlobe v toplotnem ravnovesju z okolio s temperaturo  $T$

$$u(\omega) = \hbar \omega \bar{n} \rho(\omega) d\omega = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \frac{\omega^3}{e^{\beta \hbar \omega} - 1}. \quad (5.20)$$

Lahko ga zapišemo tudi z valovno dolžino in dobimo energijo na enoto volumna na interval valovne dolžine

$$u(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\beta hc/\lambda} - 1}. \quad (5.21)$$



Slika 5.1: Planckov spekter za sevanje črnega telesa pri različnih temperaturah

### 5.3 Absorpcija, spontano in stimulirano sevanje

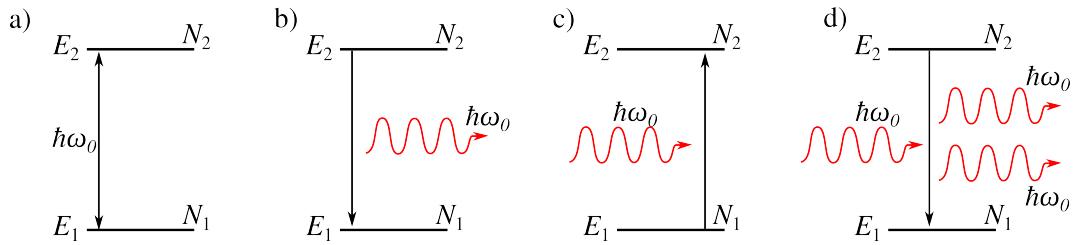
Oglejmo si zdaj osnovne procese interakcije svetlobe s snovjo. Naj bo v votlini poleg elektromagnetnega polja še  $N$  atomov, ki se med seboj ne motijo. Za začetek naj bodo prav enostavni: imajo naj le dve energijski stanji z energijama  $E_1$  in  $E_2 > E_1$  (glej sliko 5.2 a).

Zaradi interakcije s poljem pri frekvenci prehoda  $\omega_0 = (E_2 - E_1)/\hbar$  atomi prehajajo iz nižjega stanja v višje in obratno. Trije procesi opisujejo to prehajanje: spontano sevanje, absorpcija in stimulirano sevanje. Oglejmo si te procese bolj natančno.

#### Spontano sevanje

Vemo, da atom v vzbujenem stanju tudi brez vpliva zunanjega polja ni stabilen, temveč prej ali slej preide v nižje stanje. Temu pojavu pravimo spontano sevanje ali spontana emisija (slika 5.2 b).

<sup>2</sup>Nemški fizik in nobelovec Max Karl Ernst Ludwig Planck, 1858–1947.



Slika 5.2: Shema energijskih nivojev dvonivojskega atoma (a) in prehodov med njima: spontano sevanje (a), absorpcija (b) in stimulirano sevanje (c).

Pri spontanem sevanju se izseva foton v katerokoli stanje polja v bližini frekvence prehoda. Verjetnost za prehod na enoto časa označimo z  $A_{21}$ . Karakteristični razpadni čas gornjega stanja je tako  $1/A_{21}$ .

### Absorpcija

Absorpcija fotona je prehod, pri katerem se foton z ustrezno energijo absorbira, atom pa preide iz spodnjega stanja v zgornje (slika 5.2 c). Verjetnost za prehod na časovno enoto  $r_{12}$  je sorazmerna spektralni gostoti energije polja  $u(\omega)$ , to je energiji na enoto volumna in frekvenčni interval, pri frekvenci prehoda  $\omega_0$

$$r_{12} = B_{12}u(\omega_0). \quad (5.22)$$

Vpeljali smo sorazmernostni koeficient  $B_{12}$ . Pri absorpciji se seveda zmanjša število fotonov v enem od stanj polja pri frekvenci  $\omega_0$ .

### Stimulirano sevanje

Tretji pojav je prehod atoma iz gornjega stanja v spodnje zaradi interakcije s poljem. Temu procesu pravimo stimulirano sevanje ali stimulirana emisija. Tudi verjetnost za stimuliran prehod na časovno enoto  $r_{21}$  je sorazmerna spektralni gostoti energije polja pri frekvenci prehoda  $\omega_0$

$$r_{21} = B_{21}u(\omega_0). \quad (5.23)$$

V tem primeru smo sorazmernostni koeficient označili z  $B_{21}$ . V primeru stimuliranega sevanja, se število fotonov v stanju, ki je prehod povzročilo, poveča za ena.

Preden nadaljujemo, se še nekoliko pomudimo pri izrazih za absorpcijo (enačba 5.22) in stimulirano emisijo (enačba 5.23). Zaradi končnega življenskega časa ima gornje stanje tudi končno spektralno širino. Zapisani enačbi (5.22) in (5.23) veljata le, kadar je spektralna gostota elektromagnetnega polja  $u(\omega)$  preko celotne širine prehoda približno konstantna (slika 5.3 a). To je gotovo res, če obravnavamo sevanje v votlini, ki je v termičnem ravnovesju (črno telo).

Če pa na atome svetimo s svetlobo s spektrom, ki je ozek v primerjavi s širino prehoda, na primer iz laserskega resonatorja, je verjetnost za prehod odvisna tudi od tega, kako blizu centralne frekvence prehoda je frekvenca vpadne svetlobe (slika 5.3 b). Naj bo  $w_{\omega R}$  gostota energije (ne spekter!) monokromatske svetlobe s frekvenco  $\omega_R$ . Tedaj lahko verjetnost za absorpcijo na časovno enoto zapišemo v obliki

$$r_{12} = B_{12}g(\omega_R)w_{\omega R}. \quad (5.24)$$



Slika 5.3: Pri izračunu verjetnosti za absorpcijo in stimulirano emisijo je pomembno, ali je širina spektralne gostote elektromagnetnega polja bistveno večja (a) ali bistveno manjša (b) glede na atomsko spektralno črto.

Pri tem funkcija  $g(\omega)$  opisuje obliko atomske spektralne črte z vrhom pri  $\omega_0$  ima vrh.

V splošnem primeru, ko se spekter vpade svetlobe spreminja v območju frekvence prehoda, moramo sešteti prispevke pri posameznih frekvencah (5.24) po ozkih frekvenčnih intervalih

$$r_{12} = B_{12} \int g(\omega) u(\omega) d\omega. \quad (5.25)$$

Če preverimo gornji zapis na primeru spektra črnega telesa, ki se ne spreminja dosti v območju prehoda, lahko  $u(\omega)$  postavimo pred integral in po pričakovanju dobimo znano enačbo (5.22). Iz tega sledi, da mora biti funkcija  $g(\omega)$  normirana

$$\int g(\omega) d\omega = 1. \quad (5.26)$$

Zelo pogosto je  $g(\omega)$  Lorentzove oblike

$$g(\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{(\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2}. \quad (5.27)$$

Za grobe ocene lahko funkcijo  $g(\omega)$  aproksimiramo tudi s pravokotnikom širine  $\delta\omega \simeq \gamma$  in višine  $1/\delta\omega$ .

### Einsteinovi koeficienti

Vrnimo se k fenomenološkim koeficientom  $A_{21}$ ,  $B_{21}$  in  $B_{12}$ , ki jih je vpeljal Einstein<sup>3</sup>. S temi koeficienti, pravimo jim tudi Einsteinovi koeficienti, je mogoče uspešno opisati velik del pojavov pri interakciji svetlobe s snovjo.

Vpeljimo pojem zasedenost stanj, ki pove število atomov v določenem stanju. Ker obravnavamo preproste modele atomov z zgolj dvema stanjema, zapišemo samo dve zasedenosti. Naj bo  $N_1$  zasedenost spodnjega stanja,  $N_2$  zasedenost zgornjega, skupno število atomov pa  $N = N_1 + N_2$ . V prisotnosti svetlobe se bo število atomov v spodnjem in zgornjem stanju v splošnem spremenjalo, skupno število pa se bo ohranjalo.

Obravnavajmo termično ravnovesje, ko je spekter svetlobe bistveno širši od širine atomskega prehoda (slika 5.3 a), tako da lahko uporabljamo enačbi (5.22) in (5.23). Zasedenost zgornjega nivoja se zmanjšuje zaradi spontanih in stimuliranih prehodov v spodnje stanje, povečuje pa se zaradi absorpcije s spodnjega stanja. To zapišemo z enačbo

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 - r_{21}N_2 + r_{12}N_1 = -A_{21}N_2 - B_{21}u(\omega_0)N_2 + B_{12}u(\omega_0)N_1. \quad (5.28)$$

<sup>3</sup>Nemški fizik in nobelovec Albert Einstein, 1879–1955.

Zaradi ohranitve skupnega števila atomov velja

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{-dN_2}{dt}. \quad (5.29)$$

V termičnem ravnovesju sta zasedenosti konstantni, tako da lahko zapišemo

$$\frac{dN_1}{dt} = A_{21}N_2 + B_{21}u(\omega_0)N_2 - B_{12}u(\omega_0)N_1 = 0. \quad (5.30)$$

Vemo pa, da mora biti v termičnem ravnovesju spektralna gostota energije sevanja  $u(\omega)$  kar termična Planckova gostota  $u_T(\omega)$ . Izrazimo najprej spektralno gostoto iz enačbe (5.30)

$$u_T(\omega_0) = \frac{A_{21}}{B_{12}\frac{N_1}{N_2} - B_{21}}. \quad (5.31)$$

Vemo tudi, da v termičnem ravnovesju za zasedenosti  $N_1$  in  $N_2$  velja kanonična porazdelitev

$$\frac{N_2}{N_1} = e^{-\beta(E_2-E_1)} = e^{-\beta\hbar\omega_0}, \quad (5.32)$$

kjer je  $\beta = 1/k_B T$ . Sledi

$$u_T(\omega_0) = \frac{A_{21}/B_{12}}{e^{\beta\hbar\omega_0} - B_{21}/B_{12}}. \quad (5.33)$$

Za določitev koeficientov primerjamo gornji izraz s Planckovo formulo za  $u_T(\omega_0)$  (enačba 5.20). Očitno morata biti koeficienta  $B_{21}$  in  $B_{12}$  enaka (če sta stanji nedegenerirani), med  $A_{21}$  in  $B_{12}$  pa velja zveza

$$A_{21} = \frac{\hbar\omega^3}{\pi^2 c^3} B_{12} \quad \text{in} \quad B_{12} = B_{21}. \quad (5.34)$$

Koeficient pred  $B_{12}$  je ravno enak gostoti stanj elektromagnetnega polja  $\rho(\omega)$  (enačba 5.6), pomnoženi z energijo fotona  $\hbar\omega$ . Videli bomo, da to ni slučajno in da sledi iz verjetnosti za prehod v kvantni elektrodinamiki (poglavlje 5.10). Pozoren bralec je lahko tudi opazil, da je z enačbo (5.33), ki smo jo dobili le z uporabo kanonične porazdelitve za atome, že določena oblika Planckove formule, ne da bi karkoli rekli o fotonih.

## 5.4 Absorpcijski koeficient

V prejšnjem razdelku smo napovedali, da lahko velik del pojavov pri interakciji svetlobe s snovjo opišemo z Einsteinovimi koeficienti. Poskusimo zdaj koeficiente  $A_{21}$  in  $B_{21}$  povezati z makroskopskim absorpcijskim koeficientom plina atomov.

Naj na izbran volumen plina vpada snop svetlobe s frekvenco  $\omega$ , ki je blizu frekvence atomskega prehoda  $\omega_0$ . Gostota vpadnega energijskega toka je  $j_\omega = w_\omega c$  (enačba 1.33), pri čemer je  $w_\omega$  gostota energije. Obravnavajmo primer, ko je spekter vpadnega snopa ozek v primerjavi s širino atomskega prehoda (slika 5.3 b). V tej obliki zapisane enačbe bodo bolj priročne pozneje pri obravnavi laserja. Privzemimo še, da je stanje stacionarno.

Ko svetloba vpade na plast plina debeline  $dz$ , se gostota energijskega toka zmanjša zaradi absorpcije in hkrati poveča zaradi stimulirane emisije (slika 5.4). Spontano sevanje, ki je seveda tudi prisotno, lahko zanemarimo, saj bo izsevano na vse strani enakomerno in ga bo le zelo



Slika 5.4: K absorpciji snopa svetlobe v plasti atomov

majhen del v smeri snopa. Spremembra energije snopa na enoto časa je enaka razlike med številom absorpcij in stimuliranih prehodov na enoto časa, pomnoženih z energijo fotona. To popišemo z enačbo

$$dP = S dj = (N_2 - N_1) \frac{S dz}{V} \hbar \omega r_{12} = (N_2 - N_1) \frac{S dz}{V} \hbar \omega B_{21} g(\omega) w_\omega, \quad (5.35)$$

pri čemer smo verjetnost z prehod izrazili iz enačbe (5.24). S  $S$  smo označili presek snopa, z  $V$  pa volumen plina. Tako dobimo enačbo za spremenjanje gostote toka

$$dj = \frac{1}{V} (N_2 - N_1) B_{21} g(\omega) \frac{\hbar \omega}{c} j_\omega dz \quad (5.36)$$

Priročno je vpeljati še presek za absorpcijo ali stimulirano sevanje

$$\sigma(\omega) = \frac{B_{21} g(\omega) \hbar \omega}{c}. \quad (5.37)$$

Z njim se izraz (5.36) poenostavi v

$$\frac{dj}{dz} = \frac{N_2 - N_1}{V} \sigma(\omega) j. \quad (5.38)$$

Navadno imamo opravka s plinom, ki je blizu termičnega ravnotesja, zato je  $N_2 < N_1$  in je  $dj/dz$  negativen. V tem primeru pride do absorpcije z absorpcijskim koeficientom

$$\mu(\omega) = \frac{N_1 - N_2}{V} B_{21} g(\omega) \frac{\hbar \omega}{c} = \frac{N_1 - N_2}{V} \sigma(\omega), \quad (5.39)$$

za gostoto energijskega toka pa velja enačba

$$\frac{dj}{j} = -\mu dz. \quad (5.40)$$

Energija se pri absorpciji na našem plinu dvonivojskih atomov seveda ne izgublja, temveč le siplje. Atom, ki je prešel v vzbujeno stanje, se s spontano emisijo vrne nazaj v osnovno, svetloba pa se izseva na vse strani – se siplje.

## 5.5 Nasičenje absorpcije

Čeprav je na prvi pogled enačba (5.40) za zmanjševanje gostote svetlobnega toka pri prehodu skozi absorbirajoči plin preprosta, je ni mogoče enostavno integrirati, saj je  $\mu$  odvisen od gostote

energijskega toka. Pri dovolj veliki gostoti svetlobnega toka namreč z absorpcijo znaten delež atomov preide v višje stanje, zaradi česar se zmanjša razlika  $N_1 - N_2$ , posledično se pa zmanjša tudi absorpcijski koeficient – absorpcija se nasiti. Zato temu pojavi pravimo nasičenje absorpcije. Obravnavajmo ga še matematično.

Obravnavajmo snop monokromatske svetlobe, ki vpada na plin. Atomi v plinu prehajajo med nivoji zaradi absorpcije, spontane in stimulirane emisije. Podobno kot smo zapisali enačbo (5.30) za termično ravnovesje v primeru širokega spektra, zapišemo stacionarno enačbo za naš primer kot

$$A_{21}N_2 + B_{21}g(\omega)(N_2 - N_1)\frac{j}{c} = 0, \quad (5.41)$$

pri čemer smo za verjetnost za prehod namesto enačbe (5.23) vzeli enačbo (5.24). Zasedenosť višjega stanja  $N_2$  lahko izrazimo s celotnim številom atomov  $N$  in razliko zasedenosťi

$$N_2 = \frac{1}{2}N + \frac{1}{2}(N_2 - N_1). \quad (5.42)$$

S tem lahko izračunamo razliko zasedenosťi

$$N_2 - N_1 = -\frac{N}{1 + 2\frac{B_{21}g(\omega)}{cA}j}. \quad (5.43)$$

Pri majhni gostoti toka  $j$  so praktično vsi atomi v osnovnem stanju in prispevajo k absorpciji. Pri velikih gostotah toka pa imenovalec gornjega izraza močno naraste, razlika zasedenosťi gre proti nič in absorpcija se zmanjšuje. Ko drugi člen v imenovalcu enačbe (5.43) doseže vrednost 1, pravimo, da gostota energijskega toka doseže vrednost saturacijske gostote. Zapišemo jo kot

$$j_s(\omega) = \frac{cA_{21}}{2B_{21}g(\omega)} = \frac{\hbar\omega^3}{2\pi^2 c^2 g(\omega)}, \quad (5.44)$$

pri čemer smo upoštevali zvezo (5.34) med koeficientoma  $A_{21}$  in  $B_{21}$ . Kot vidimo, je saturacijska gostota odvisna le od frekvence vpadnega valovanja in širine atomskega prehoda. Za črto z valovno dolžino okoli 600 nm in širino črte  $10^8 \text{ s}^{-1}$  znaša saturacijska gostota svetlobnega toka okoli  $20 \text{ mW/cm}^2$ . Tako gostoto toka v ozek frekvenčni interval je z običajnimi svetili, na primer plinsko razelektritveno cevjo, praktično nemogoče doseči, medtem ko jo iz laserjev dobimo z lahkoto. Izraz za razliko zasedenosťi stanj zdaj zapišemo v pregledni obliki

$$N_2 - N_1 = -\frac{N}{1 + \frac{j}{j_s(\omega)}}. \quad (5.45)$$

Vstavimo gornji izraz v enačbo za zmanjševanje gostote toka (enačba 5.38) in dobimo

$$dj = -\frac{\mu_0}{1 + \frac{j}{j_s}} j dz, \quad (5.46)$$

kjer smo z  $\mu_0 = NB_{21}g(\omega)\hbar\omega/Vc$  označili absorpcijski koeficient pri majhnih gostotah vpadnega toka. Enačbo brez težav integriramo in dobimo

$$\ln \frac{j}{j_0} + \frac{1}{j_s}(j - j_0) = -\mu_0 z, \quad (5.47)$$

kjer smo z  $j_0$  označili začetno gostoto toka. Kadar je ta dosti manjša od  $j_s$ , lahko drugi člen v



Slika 5.5: Pojemanje gostote svetlobnega toka v absorbirajočem plinu

gornji enačbi zanemarimo in dobimo navadno eksponentno pojemanje

$$j = j_0 e^{-\mu_0 z}. \quad (5.48)$$

Pri zelo velikih vpadnih gostotah pa lahko zanemarimo prvi člen in dobimo, da je pojemanje zgolj linearno

$$j = j_0 - \mu_0 j_s z = j_0 - \frac{N}{2V} A \hbar \omega z. \quad (5.49)$$

V primeru močnega vpadnega toka je zasedenost spodnjega in zgornjega nivoja skoraj enaka in je absorpcija omejena s tem, kako hitro se atomi vračajo v osnovno stanje preko spontanega sevanja, kar je razvidno tudi iz zadnje oblike izraza (5.49).

## 5.6 Optično ojačevanje

V prejšnjih razdelkih smo obravnavali prehod svetlobe skozi dvonivojski plin. V primeru termičnega ravnovesja je zgornji nivo manj zaseden od spodnjega in v plinu pride do absorpcije svetlobe. Če pa nekako dosežemo primer, da je  $N_2 > N_1$ , se bo snop svetlobe pri prehodu skozi tako pripravljen plin ojačeval. Takemu primeru pravimo stanje obrnjene zasedenosti. Tako stanje seveda ni v termičnem ravnovesju in ga je treba vzdrževati z dovajanjem energije plinu. Dovajjanju energije pravimo tudi optično črpanje. Načinov, kako dosežemo obrnjeno zasedenost z optičnim črpanjem je veliko. Oglejmo si nekaj primerov.

V plinih je najpogosteji način vzbujanja z električnim tokom. Elektroni, ki so glavni nosilci toka, se zaletavajo v atome ali ione in jih vzbujajo na višje nivoje, pri čemer lahko pride do obrnjene zasedenosti med nekim parom nivojev. Pogost proces v plinih je tudi prenos energije med atomi s trki. Vzemimo mešanico dveh plinov, pri katerih se nek nivo enih atomov ujema po energiji s stanjem drugih atomov. Vzbujen atom prve vrste lahko pri trku predstavi energijo brez sevanja atomu druge vrste, ki iz osnovnega stanja preide v ustrezni višji nivo. Če je pod tem nivojem še drugo vzbujeno stanje, bomo med njima dobili obrnjeno zasedenost, kadar je življenski čas gornjega nivoja daljši od spodnjega.

V trdnih neprevodnih kristalih sta v optičnem področju absorpcija in sevanje pri določeni valovni dolžini navadno posledica primesi. Obrnjeno zasedenost para nivojev primesi največkrat dobimo tako, da kristal obsevamo s svetlobo s frekvenco, ki ustreza prehodu na nek nivo nad izbranim parom. Tak način optičnega črpanja deluje tudi v organskih barvilih.

V polprevodnikih dosežemo obrnjeno zasedenost med prevodnim in valenčnim pasom z vbrizgavanjem elektronov in vrzeli v območje p-n spoja z električnim tokom v prevodni smeri. Možen mehanizem vzbujanja so tudi kemične reakcije. Po reakciji lahko produkti ostanejo v vzbujenem stanju in lahko dobimo obrnjeno zasedenost med paroma stanj.

Nekoliko bolj podrobno si bomo nekaj teh mehanizmov ogledali v nadaljevanju na konkretnih laserjih. Zaenkrat si kot primer oglejmo le model optičnega črpanja plina atomov s tremi stanji.

## 5.7 Optično črpanje trinivojskega sistema

Naj imajo atomi poleg osnovnega stanja z energijo  $E_0$ , označimo ga  $|0\rangle$ , še dve vzbujeni stanji z energijo  $E_1$  (stanje  $|1\rangle$ ) in energijo  $E_2 > E_1$  (stanje  $|2\rangle$ ). Na plin svetimo s svetlobo, ki vzbuja atome iz stanja  $|0\rangle$  v stanje  $|2\rangle$ , pri čemer je lahko spektralna gostota  $u_p$  črpalne svetlobe široka. Poleg tega naj se po plinu širi še monokromatska svetloba s frekvenco  $\omega$  blizu frekvence prehoda  $\omega_0$  med stanjema  $|1\rangle$  in  $|2\rangle$  in z gostoto energije  $w$ . Ugotoviti želimo, pri kakšnih pogojih lahko dosežemo obrnjeno zasedenost med stanjema  $|1\rangle$  in  $|2\rangle$  in s tem ojačevanje svetlobe okoli frekvence  $\omega_0$ .



Slika 5.6: Shema energijskih nivojev trinivojskega sistema in prehodov med njimi (a). V plinskih laserjih imamo navadno stanje obrnjene zasedenosti med drugim in prvim vzbujenim stanjem (b), v navadni trdninskih laserjih (npr. rubinskem) pa med prvim vzbujenim in osnovnim stanjem (c).

Zapišimo enačbe za spremjanje zasedenosti posameznih stanj. Osnovno stanje se prazni zaradi absorpcije črpalne svetlobe in polni zaradi spontanih prehodov iz stanj  $|1\rangle$  in  $|2\rangle$ , stimulirane prehode iz stanja  $|2\rangle$  pa bomo zanemarili. Zasedenost stanja  $|2\rangle$  se povečuje zaradi absorpcije s spodnjih nivojev in zmanjšuje zaradi spontanega in stimuliranega sevanja. Srednje stanje se polni s stimuliranimi in spontanimi prehodi iz stanja  $|2\rangle$  in prazni zaradi absorpcije v  $|2\rangle$  in spontanih prehodov v  $|0\rangle$ . Pri tem velja, da je vsota vseh zasedenosti enaka številu vseh atomov:  $N_0 + N_1 + N_2 = N$ . Zasedbene enačbe so torej

$$\frac{dN_0}{dt} = -rN + A_{20}N_2 + A_{10}N_1 \quad (5.50)$$

$$\frac{dN_1}{dt} = -A_{10}N_1 + B_{21}g(\omega)w(N_2 - N_1) + A_{21}N_2 \quad (5.51)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = rN_0 - A_{20}N_2 - A_{21}N_2 + B_{21}g(\omega)w(N_1 - N_2), \quad (5.52)$$

pri čemer predpostavili, da je  $N_0 \approx N \gg N_1, N_2$  in zato lahko črpanje  $B_{20}u_p(N_0 - N_2)$ , ki je praktično konstantno, zapisali s koeficientom  $r$ . Mehanizem črpanja smo tako skrili v  $r$  in prav ni pomembno, na kakšen način poteka.

Zanima nas stacionarno stanje, ko so vsi trije časovni odvodi enaki nič. Brez škode lahko tudi zanemarimo spontano sevanje iz stanja  $|2\rangle$  v osnovno stanje. Tako iz druge enačbe sistema (5.51) dobimo

$$B_{21}g(\omega)wN_2 + A_{21}N_2 = B_{21}g(\omega)wN_1 + A_{10}N_1 \quad (5.53)$$

in

$$N_2 = \frac{B_{21}g(\omega)w + A_{10}}{B_{21}g(\omega)w + A_{21}}N_1. \quad (5.54)$$

Ob upoštevanju zveze, ki jo dobimo iz prve enačbe sistema (5.50)

$$N_1 = \frac{rN}{A_{10}}, \quad (5.55)$$

zapišemo razliko zasedenosti kot

$$N_2 - N_1 = \left( \frac{N_2}{N_1} - 1 \right) N_1 = \frac{A_{10} - A_{21}}{A_{21} + B_{21}g(\omega)w} \frac{rN}{A_{10}}. \quad (5.56)$$

Iz gornje enačbe sledi, da dobimo obrnjeno zasedenost, če je  $A_{10} > A_{21}$ , torej kadar je razpadni čas stanja  $|1\rangle$  kraši kot razpadni čas stanja  $|2\rangle$ . Tak rezultat smo seveda lahko pričakovali.

V praktični primerih navadno velja  $A_{10} \gg A_{21}$ . Ob upoštevanju zveze  $j = wc$  povežemo razliko zasedenosti z gostoto vpadnega svetlobnega toka

$$N_2 - N_1 = \frac{rN}{A_{21}} \frac{1}{1 + \frac{B_{21}g(\omega)j}{cA_{21}}} = \frac{rN}{A_{21}} \frac{1}{1 + j/j_s}. \quad (5.57)$$

Konstante  $cA_{21}/B_{21}g(\omega)$  smo pospravili v  $j_s$ , ki ga bomo imenovali saturacijska gostota svetlobnega toka. Vidimo, da je dobljen izraz zelo podoben saturacijski gostoti za dvonivojski sistem (enačba 5.44), razlika je le v faktorju 2. Do te razlike pride zaradi različnega števila stanj in pogoj  $N_1 + N_2 = N$  ne velja več.

---

**Naloga 5.7.1** Pokaži, da je saturacijska gostota toka  $j_s$  odvisna le od frekvence valovanja in širine atomske črte  $\delta\omega$ .

---

Poglejmo zdaj, kaj se ob vpodu na plast trinivojskega plina zgodi s svetlobo s frekvenco  $\omega$  in gostoto svetlobnega toka  $j = wc$ . Račun je zelo podoben računu pri absorpciji (enačba 5.36). Zapišemo spremembo gostote toka na debelini  $dz$

$$dj = \frac{1}{V} (N_2 - N_1) B_{21}g(\omega) \frac{\hbar\omega}{c} j dz, \quad (5.58)$$

pri čemer gostota toka  $j = wc$  nastopa tudi v izrazu za razliko zasedenosti (enačba 5.57). Če to upoštevamo, dobimo diferencialno enačbo za gostoto toka

$$\frac{1}{j} \left( 1 + \frac{j}{j_s} \right) dj = G dz \quad (5.59)$$

oziroma

$$dj = \frac{G}{1 + \frac{j}{j_s}} j dz, \quad (5.60)$$

ki je spet zelo podobna enačbi za absorpcijo (enačba 5.46). Z  $G$  smo označili t.i. koeficient ojačanja pri majhnih vpadnih gostotah toka. Podan je z

$$G = \frac{rNB_{21}\hbar\omega g(\omega)}{VcA_{21}}. \quad (5.61)$$

Rešitev diferencialne enačbe je prikazana na sliki (5.7).



Slika 5.7: Naraščanje gostote svetlobnega toka pri optičnem ojačanju

Obnašanje gostote svetlobnega toka ima, tako kot pri absorpciji, dva režima. Pri majhnih gostotah toka  $j \ll j_s$  je naraščanje eksponentno

$$j(z) = j_0 e^{Gz}. \quad (5.62)$$

Pri velikih gostotah toka pride do nasičenja in gostota svetlobnega toka se ojačuje linearno z razdaljo

$$j(z) = \tilde{j}_0 + j_s G z = \tilde{j}_0 + \frac{rN}{V} \hbar \omega z. \quad (5.63)$$

V tem primeru je gostota toka dovolj velika, da vsi atomi, ki jih s črpanjem spravimo v najvišje stanje, preidejo v stanje  $|1\rangle$  s stimuliranim sevanjem. Pri konstantnem črpanju je tedaj linearno naraščanje gostote toka razumljivo.

## 5.8 Homogena in nehomogena razširitev spektralne črte

Doslej smo predpostavili, da svetijo vsi atomi obravnavane snovi pri isti frekvenci  $\omega_0$  in z isto spektralno širino, ki smo jo popisali s funkcijo  $g(\omega)$ , z vrhom pri  $\omega_0$ . Če to drži, pravimo, da je razširitev spektralne črte homogena. Primera homogene razširitve sta naravna širina in razširitev zaradi trkov med atomi. Funkcija  $g(\omega)$  je v tem primeru Lorentzove oblike

$$g(\omega) = \frac{1}{\pi} \frac{\gamma}{(\omega - \omega_0)^2 + \gamma^2} \quad (5.64)$$

s širino črte  $\gamma$ .

Spektralna črta je lahko razširjena tudi zato, ker vsi atomi ne svetijo pri povsem enaki frekvenci. Tedaj govorimo o nehomogeni razširitvi. Najpomembnejši primer nehomogene razširitve je

Dopplerjeva razširitev v plinu. Atomi plina vedno sevajo pri praktično isti frekvenci, vendar jih zaradi gibanja opazovalec v mirujočem (laboratorijskem) sistemu v skladu z Dopplerjevim pojavom zazna pri različnih frekvencah. Tako so frekvence  $\omega$  posameznih atomov odvisne od hitrosti  $v$  atoma glede na smer opazovanja. Zapišemo jih kot

$$\omega = \omega_0 - \frac{v}{c} \omega_0 = \omega_0 - k_0 v. \quad (5.65)$$

Označimo z  $\mathcal{N}(v)$  porazdelitev gostote atomov po hitrostih v smeri opazovanja. V termičnem ravnovesju je  $\mathcal{N}(v)$  Maxwellova porazdelitev

$$\mathcal{N}(v) = \frac{N}{V} \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} e^{-\frac{mv^2}{2k_B T}}. \quad (5.66)$$

Porazdelitev atomov po frekvencah dobimo tako, da hitrost izrazimo iz enačbe (5.65), pri čemer dobljeno funkcijo  $g_D(\omega)$  normiramo tako. Dobimo

$$g_D(\omega) = \frac{c}{\omega_0} \left( \frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{1/2} e^{-\frac{mc^2}{2k_B T} \frac{(\omega-\omega_0)^2}{\omega_0}}. \quad (5.67)$$

Dopplerjeva razširitev v plinu je torej Gaussove oblike. Njena širina pri polovični višini<sup>4</sup> je

$$\Delta\omega_D = 2\sqrt{\frac{2k_B T \ln 2}{mc^2}} \omega_0. \quad (5.68)$$

**Naloga 5.8.1** Izpelji obliko nehomogeno razširjene črte za Dopplerjevo razširitev (enačba 5.67) in pokaži, da je njena širina podana z enačbo (5.68).

Izračunajmo Dopplerjevo razširitev na primeru He-Ne laserja. Za prehod atoma neonja pri 632,8 nm in temperaturi 300 K dobimo  $\Delta\omega_D = 8 \times 10^9$  Hz. Nehomogena Dopplerjeva razširitev v redkem plinu je navadno nekaj redov velikosti večja od homogene naravne širine in razširitve zaradi trkov.

## 5.9 \*Nasičenje nehomogeno razširjene absorpcijske črte

V razdelku (5.5) smo obravnavali nasičenje absorpcije pri homogeno razširjenem prehodu. Pri nasičenju absorpcije, kadar prevladuje nehomogena razširitev, nastopijo pomembni novi pojavi, zato si to podrobnejše oglejmo.

Naj na plin vpada močan snop monokromatske svetlobe s frekvenco  $\omega$ , ki je blizu osrednje frekvence  $\omega_0$  Dopplerjevo razširjene črte. S svetlobo lahko sodeluje le skupina atomov, pri kateri se Dopplerjevo premaknjena frekvanca od  $\omega$  ne razlikuje več kot za homogeno širino, ki jo opisuje funkcija  $g(\omega)$ . Zato ne moremo zapisati zasedbenih enačb za vse atome hkrati, ampak le za tiste, ki imajo hitrost med  $v$  in  $v + dv$  in ki absorbirajo pri frekvenci  $\omega_0 - kv$ .

Naj sta  $\mathcal{N}_1(v)$  in  $\mathcal{N}_2(v)$  hitrostni porazdelitvi atomov v spodnjem in v zgornjem stanju. Enačba za spremenjanje gostote  $\mathcal{N}_2(v)$  je analogna enačbi (5.28) za celotno zasedenost v homogenem primeru

$$\frac{d\mathcal{N}_2(v)}{dt} = -A\mathcal{N}_2(v) - Bg(\omega - \omega_0 + kv) \frac{j_\omega}{c} [\mathcal{N}_2(v) - \mathcal{N}_1(v)], \quad (5.69)$$

<sup>4</sup>To širino imenujemo FWHM – Full width at half maximum.

kjer je  $j_\omega$  gostota vpadnega svetlobnega toka. Upoštevali smo, da je zaradi Dopplerjevega pojava prehod premaknjen k frekvenci  $\omega_0 - kv$ . Velja tudi

$$\mathcal{N}_1(v) + \mathcal{N}_2(v) = \mathcal{N}(v) \quad \text{in} \quad \frac{d\mathcal{N}_2(v)}{dt} = -\frac{d\mathcal{N}_1(v)}{dt}. \quad (5.70)$$

Vpeljimo  $\mathcal{Z}(v) = \mathcal{N}_2(v) - \mathcal{N}_1(v)$ . Podobno kot v enačbi (5.42) zapišemo

$$\mathcal{N}_2(v) = 1/2\mathcal{N}(v) + 1/2\mathcal{Z}(v) \quad (5.71)$$

in dobimo

$$\dot{\mathcal{Z}}(v) = -A\mathcal{Z}(v) - A\mathcal{N}(v) - 2Bg(\omega - \omega_0 + kv)\frac{j_\omega}{c}\mathcal{Z}(v). \quad (5.72)$$

V stacionarnem stanju je

$$\mathcal{Z}(v) = \frac{\mathcal{N}(v)}{1 + \frac{2B}{Ac}g(\omega - \omega_0 + kv)j_\omega}. \quad (5.73)$$

Če je nasičenje majhno, lahko imenovalec v gornji enačbi razvijemo

$$\mathcal{Z}(v) \simeq \mathcal{N}(v)[1 - \frac{2B}{Ac}g(\omega - \omega_0 + kv)j_\omega]. \quad (5.74)$$

Porazdelitev  $\mathcal{Z}(v)$  je podobna nemoteni porazdelitvi atomov po hitrosti  $\mathcal{N}(v)$ , le da je pri hitrosti  $v = (\omega_0 - \omega)/k$  zmanjšana zaradi vpliva vpadne svetlobe, ki jo atomi s to hitrostjo lahko absorbirajo in s tem prehajajo v gornje stanje. V porazdelitvi atomov v spodnjem stanju tako nastane vdolbina, pravijo ji tudi Bennetova vdolbina, v gornjem stanju, ki je bilo na začetku prazno, pa dobimo ustrezni ozek vrh (Slika ??). Širina vdolbine je določena s homogeno širino prehoda, to je s funkcijo  $g(\omega - \omega_0 + kv)$ , globina pa z gostoto vpadnega toka.

Zapišimo sedaj absorpcijski koeficient pri neki frekvenci  $\omega'$ , ki ga izmerimo tako, da na plin posvetimo z dodatnim, šibkim testnim snopom. Upoštevati moramo, da k absorpciji prispevajo vsi atomi, katerih hitrost je taka, da je prehod dovolj blizu  $\omega'$ . Zato dobimo absorpcijski koeficient s seštevanjem po porazdelitvi  $\mathcal{Z}(v)$

$$\mu(\omega') = \frac{\hbar\omega'}{c} \int \mathcal{Z}(v)Bg(\omega' - \omega_0 + k'v)dv \quad (5.75)$$

Homogena razširitev je navadno dosti manjša od Dopplerjeve širine. V prvem približku vzemimo, da lahko  $g(\omega)$  nadomestimo kar z  $\delta(\omega)$ , pri čemer to ne smemo narediti tudi v imenovalcu izraza za  $\mathcal{Z}(v)$ . Tako dobimo V drugi vrstici smo uporabili približek 5.74. Odvisnost  $\mu(\omega')$ , ki jo izmerimo tako, da spremojmo frekvenco testnega snopa  $\omega'$ , je Gaussove oblike z vdolbino pri  $\omega$  in je podobna porazdelitvi  $\mathcal{Z}(v)$ , kot jo kaže slika ???. Vdolbina ima obliko homogeno razširjene črte. Merjenje nasičenja absorpcije s testnim žarkom torej omogoča dobiti obliko homogene črte kljub mnogo večji nehomogeni Dopplerjevi razširitvi in je zato v moderni spektroskopiji velikega pomena.

Absorpcijski koeficient za prvi, močan vpadni snop dobimo s tem, da v gornjem izrazu postavimo  $\omega' = \omega$ .  $\mathcal{N}((\omega - \omega')/k)$  opisuje običajno Gaussovo obliko Dopplerjevo razširjene črte, izraz v oglatem oklepaju pa da zmanjšanje absorpcije zaradi nasičenja, ki je odvisno le od vrednosti  $g(0)$  in zato enako pri vseh  $\omega$ . Z enim samim snopom izmerjena črta je kljub nasičenju še vedno Gaussove oblike. Vdolbina, ki jo izzge svetloba v hitrostni porazdelitvi atomov, s takim preprostim opazovanjem ne moremo zaznati.

Namesto z dvema različima snopoma, od katerih lahko enemu spremojmo frekvenco, lahko vdolbino v porazdelitvi zaznamo tudi z enim snopom spremenljive frekvence, ki se po prvem prehodu skozi plin odbije od ogledala in vrne v nasprotni smeri. S tem se v porazdelitvi atomov v spodnjem stanju simetrično pri hitrostih  $\pm(\omega_0 - \omega)/k$  pojavit dve vdolbini. Kadar je  $\omega$  blizu  $\omega_0$ , se začneta obe vdolbini prekrivati, stopnja nasičenja se poveča in s tem se celotna absorpcija po dveh prehodih zmanjša (Slika ??).

Zapišimo še enačbe za ta primer. Snop povzroči spremembo zasedenosti pri prehodu skozi plin v obeh smereh, zato je sedaj

$$\mathcal{Z}(v) \simeq \mathcal{N}(v) \left\{ 1 - \frac{2B}{Ac} j_\omega [g(\omega - \omega_0 + kv) + g(\omega - \omega_0 - kv)] \right\}. \quad (5.76)$$

Enako kot prej je absorpcijski koeficient za širjenje svetlobe v pozitivni smeri

$$\begin{aligned} \mu_+(\omega) &= \frac{\hbar\omega}{c} B \int \mathcal{Z}(v) g(\omega - \omega_0 + kv) dv \\ &\simeq \hbar B \mathcal{N} \left( \frac{\omega - \omega_0}{k} \right) \left\{ 1 - \frac{2B}{Ac} [g(0) + g(2(\omega - \omega_0))] j_\omega \right\}. \end{aligned} \quad (5.77)$$

Ker je  $\mathcal{Z}(v) = \mathcal{Z}(-v)$ , je izraz za absorpcijo v negativni smeri enak. Pri  $\omega = \omega_0$  je nasičenje večje in absorpcija se zato zmanjša. Izmerjeni absorpcijski profil ima na sredini vdolbino, ki je zopet podobna homogeno razširjeni črti. Faktor 2 v argumentu funkcije  $g(2(\omega - \omega_0))$  je posledica našega grobega približka, ko smo v integraciji  $g(\omega - \omega_0 + kv)$  nadomestili kar z  $\delta$  funkcijo. Natančnejši račun pokaže, da je vrh pri  $\omega_0$  kar oblike  $g(\omega - \omega_0)$  (Naloga).

## 5.10 Izpeljava verjetnosti za prehod

Verjetnosti za prehod atoma iz enega stanja v drugo s sevanjem, ki smo jih opisali s fenomenološkimi Einsteinovimi koeficienti  $A_{21}$  in  $B_{21}$  (razdelek 5.3), je mogoče izpeljati tudi drugače. Pri tem se poslužimo kvantne elektrodinamike, kar pomeni kvantno obravnavo tako atoma kot elektromagnetnega polja. Povsem strog račun je zahteven in presega okvir te knjige, zato si na kratko oglejmo le, kako pridemo do rezultata s perturbacijsko metodo.

Postavimo dvonivojski atom v votlino z elektromagnetskim poljem. Izračunajmo verjetnost, da zaradi interakcije s poljem atom preide iz stanja  $|2\rangle$  v stanje  $|1\rangle$ , pri čemer se število fotonov v izbranem stanju elektromagnetnega polja  $\alpha$  poveča z  $n_\alpha$  na  $n_\alpha + 1$ . V vseh ostalih stanjih polja naj bo število fotonov enako nič.

Med atomom in poljem privzemimo električno dipolno interakcijo

$$\hat{H}_i = -e\hat{E}(\mathbf{r}, t)\hat{x}, \quad (5.78)$$

kjer je  $\hat{x}$  operator koordinate elektrona v atomu. Privzeli smo, da je nihajoče polje polarizirano v smeri osi  $x$ . Stanja celotnega sistema, to je atoma in polja, zapišimo v obliki produkta atomskih stanj in stanja elektromagnetnega polja, pri čemer moramo navesti število fotonov v vsakem nihanju votline  $\alpha$

$$|i, \{n_\alpha\}\rangle \equiv |i\rangle |\{n_\alpha\}\rangle. \quad (5.79)$$

Začetno stanje celotnega sistema naj bo tako  $|2, n_\alpha\rangle$ , kar pomeni, da je atom v gornjem stanju, polje pa ima  $n_\alpha$  fotonov v enem samem stanju  $\alpha$ . Ustrezno končno stanje je  $|1, n_\alpha + 1\rangle$ .

V prvem redu teorije motenj je verjetnost za prehod iz začetnega v končno stanje na časovno enoto enaka

$$w_{21} = \frac{2\pi}{\hbar} |\langle 1, n_\alpha + 1 | \hat{H}_i | 2, n_\alpha \rangle|^2 \delta(E_2 - E_1 - \hbar\omega_\alpha). \quad (5.80)$$

Z delta funkcijo izberemo le prehoda, pri katerih se ohranja energija.

Operator elektromagnetnega polja lahko po enačbi (5.9) razvijemo po lastnih nihanjih votline

$$\hat{E}(\mathbf{r}, t) = -\frac{1}{\sqrt{V\varepsilon_0}} \sum_\alpha \hat{p}_\alpha(t) E_\alpha(\mathbf{r}), \quad (5.81)$$

kjer je  $\hat{p}_\alpha$  operator impulza nihanja  $\alpha$ ,  $E_\alpha$  pa funkcija, ki popisuje krajevno odvisnost polja. Vemo, da se vsako elektromagnetno nihanje votline obnaša kot harmonski oscilator. Zato lahko vpeljemo kreacijske in anihilacijske operatorje

$$\hat{a}_\alpha^\dagger = \frac{1}{\sqrt{2\hbar\omega_\alpha}} (\omega_\alpha \hat{q}_\alpha - i\hat{p}_\alpha) \quad (5.82)$$

$$\hat{a}_\alpha = \frac{1}{\sqrt{2\hbar\omega_\alpha}} (\omega_\alpha \hat{q}_\alpha + i\hat{p}_\alpha). \quad (5.83)$$

Kreacijski operatorji povečujejo, anihilacijski pa znižujejo število fotonov v danem stanju

$$\hat{a}_\alpha^\dagger |n_\alpha\rangle = \sqrt{n_\alpha + 1} |n_\alpha + 1\rangle \quad \text{in} \quad (5.84)$$

$$\hat{a}_\alpha |n_\alpha\rangle = \sqrt{n_\alpha} |n_\alpha - 1\rangle. \quad (5.85)$$

Edini od nič različni matrični elementi so tako oblike

$$\begin{aligned} \langle n_\alpha + 1 | \hat{a}_\alpha^\dagger | n_\alpha \rangle &= \sqrt{n_\alpha + 1} && \text{in} \\ \langle n_\alpha - 1 | \hat{a}_\alpha | n_\alpha \rangle &= \sqrt{n_\alpha}. \end{aligned} \quad (5.86)$$

Operatorje  $\hat{p}_\alpha$  zdaj lahko izrazimo s kreacijskimi in anihilacijskimi operatorji in jih vstavimo v razvoj električnega polja (enačba 5.81). Dobimo

$$\hat{E}(\mathbf{r}, t) = -i \sum_\alpha \sqrt{\frac{\hbar\omega_\alpha}{2V\varepsilon_0}} (\hat{a}_\alpha^\dagger - \hat{a}_\alpha) E_\alpha(\mathbf{r}). \quad (5.87)$$

Nadaljujemo z izračunom potrebnega matričnega elementa. Operator koordinate  $\hat{x}$  deluje le na atomski del stanja,  $\hat{E}$  pa le na elektromagnetno polje, zato velja

$$\langle 1, n_\alpha + 1 | \hat{H}_i | 2, n_\alpha \rangle = -e \langle 1, n_\alpha + 1 | \hat{E} \hat{x} | 2, n_\alpha \rangle \quad (5.88)$$

$$= -e \langle 1 | \hat{x} | 2 \rangle \langle n_\alpha + 1 | \hat{E} | n_\alpha \rangle. \quad (5.89)$$

Vstavimo polje, ki smo ga izrazili s kreacijskimi in anihilacijskimi operatorji (enačba 5.87), upoštevamo zvezi (5.86) in dobimo

$$\begin{aligned} \langle n_\alpha + 1 | \hat{E} | n_\alpha \rangle &= -i \sum_\beta \sqrt{\frac{\hbar\omega_\beta}{2V\varepsilon_0}} \langle n_\alpha + 1 | \hat{a}_\beta^\dagger - \hat{a}_\beta | n_\alpha \rangle E_\beta(\mathbf{r}) \\ &= -i \sqrt{\frac{\hbar\omega_\alpha}{2V\varepsilon_0}} \sqrt{n_\alpha + 1} E_\alpha(\mathbf{r}). \end{aligned} \quad (5.90)$$

Od vseh operatorjev v razvoju polja dobimo namreč od nič različen matrični element le za kreacijski operator za stanje  $\alpha$ .

Vpeljimo še simbol za matrični element koordinate med atomskimi stanji  $\langle 1|\hat{x}|2\rangle = x_{12}$ . Iskana verjetnost za prehod iz začetnega stanja, v katerem smo imeli vzbujen atom in  $n_\alpha$  fotonov, v končno stanje z atomom v osnovnem stanju in  $n_\alpha + 1$  fotonov v stanju  $\alpha$  je tako

$$w_{21} = \frac{\pi e^2 \omega_\alpha x_{12}^2}{V \epsilon_0} (n_\alpha + 1) E_\alpha^2(\mathbf{r}) \delta(E_2 - E_1 - \hbar\omega_\alpha). \quad (5.91)$$

Verjetnost za prehod je sorazmerna z  $n_\alpha + 1$  in je od nič različna, tudi če je število kvantov polja enako nič. Tedaj imamo seveda spontano sevanje. Prispevek, ki je sorazmeren s številom že prisotnih fotonov, pa predstavlja stimulirano sevanje. Prehodna verjetnost vsebuje še kvadrat prostorske odvisnosti polja  $E_\alpha^2(\mathbf{r})$ . Če ne poznamo natančnega položaja atoma ali če imamo plin atomov, ki je enakomerno porazdeljen po votlini, lahko ta člen nadomestimo kar s povprečno vrednostjo. Kadar imamo stoječe valovanje, je to  $1/2$ .

Spontana emisija je možna v vsa elektromagnetna nihanja votline s pravo frekvenco. Celotno verjetnost za prehod atoma iz vzbujenega v osnovno stanje dobimo, če seštejemo verjetnosti za prehod z izsevanim fotonom v določenem stanju. Spomnimo se, da je ta verjetnost ravno enaka Einsteinovem koeficientu  $A_{21}$  (enačba 5.34)

$$A_{21} = \sum_\alpha w_{21} = \sum_\alpha \frac{\pi e^2 \omega_\alpha x_{12}^2}{2V \epsilon_0} \delta(E_2 - E_1 - \hbar\omega_\alpha). \quad (5.92)$$

Za prostorsko odvisnost polja  $E^2(\mathbf{r})$  smo vzeli povprečje  $1/2$ . Vsoto po nihanjih lahko z uporabo enačbe (5.7) spremenimo v integral in upoštevamo enačbo (5.6). Dobimo

$$A_{21} = \frac{\pi e^2 x_{12}^2}{2\hbar\epsilon_0} \int \rho(\omega_\alpha) \omega_\alpha \delta(\omega_0 - \omega_\alpha) d\omega_\alpha = \frac{e^2 \omega_0^3 x_{12}^2}{2\pi\epsilon_0\hbar c^3}. \quad (5.93)$$

Z  $\omega_0 = (E_2 - E_1)/\hbar$  smo označili frekvenco prehoda. S tem smo izpeljali vrednost Einsteinovega koeficiente  $A_{21}$ .

Zaradi spontanega sevanja vzbujeno atomske stanje ne more biti popolnoma stacionarno. Poleg tega energija stanja s končnim razpadnim časom ni natančno določeno. Zato moramo verjetnost za stimulirano sevanje (enačba 5.91) malo popraviti. Delta funkcijo energije nadomestimo s končno široko funkcijo  $g(\omega)$ , ki ima vrh pri  $\omega_0$  in je njen integral enak 1. Pri tem dobimo zaradi spremembe integracijske spremenljivke še en dodaten faktor  $1/\hbar$ . Tako imamo

$$w_{21} = \frac{\pi e^2 \omega_\alpha x_{12}^2}{2V \epsilon_0 \hbar} (n_\alpha + 1) g(\omega_\alpha). \quad (5.94)$$

Einsteinov koeficient za stimulirano sevanje lahko izrazimo iz enačbe (5.24), če upoštevamo, da je gostota energije polja  $n_\alpha \hbar \omega_\alpha / V$

$$B_{21} g(\omega_\alpha) = \frac{V w_{21}}{n_\alpha \hbar \omega_\alpha g(\omega_\alpha)} = \frac{\pi e^2 x_{12}^2}{2 \epsilon_0 \hbar^2}. \quad (5.95)$$

Poglejmo še razmerje izračunanih Einsteinovih koeficientov iz enačb (5.93) in (5.95). Vidimo, da se ujema z razmerjem, ki smo ga izpeljali z uporabo Planckove formule (enačba 5.34). Prehodena pot jasno kaže zvezo med spontanim in stimuliranim sevanjem ter gostoto stanj elektromagnetnega polja.



## 6. Laser

- 6.1 Zasedbene enačbe
- 6.2 Spektralna širina enega laserskega nihanja
- 6.3 Primerjava laserjev in običajnih svetil
- 6.4 Mnogofrekvenčni laser
- 6.5 Relaksacijske oscilacije
- 6.6 Delovanje v sunkih s preklopom dobrote
- 6.7 Uklepanje faz
- 6.8 Stabilizacija frekvence laserja na nasičeno absorpcijo
- 6.9 Absolutna meritev frekvence laserja in definicija metra



## 7. Primeri laserjev

- 7.1 Nd:YAG laser
- 7.2 He-Ne laser
- 7.3 Argonski ionski laser
- 7.4 Laser na ogljikov dioksid
- 7.5 Ekscimerski laser
- 7.6 Laserji na organska barvila
- 7.7 Titan-safirni laser
- 7.8 Polvodniški laser

# 8. Nelinearna optika

Pri obravnavi svetlobnega valovanja v snovi smo doslej vedno privzeli linearo zvezo med polarizacijo in jakostjo električnega polja. To je seveda približek, ki je dovolj dober le pri razmeroma majhnih jakostih polja. Kadar doseže jakost polja velike vrednosti – in v laserskih snopih jih nedvomno lahko doseže – je treba upoštevati tudi višje člene v razvoju. Takrat govorimo o nelinearni optiki, saj zveza med polarizacijo in električnim poljem ni linearna. V tem poglavju bomo spoznali zanimive pojave, ki jih povzroči nelinearni del polarizacije, med drugim optično podvajanje frekvenc, optično usmerjanje, samozbiranje laserskega snopa, optične solitone in optično fazno konjugacijo.

## 8.1 Nelinearna susceptibilnost

V linearinem približku odziva snovi velja, da je polarizacija snovi  $\mathbf{P}$  linearna funkcija električne poljske jakosti svetlobe  $\mathbf{E}$ . Takrat zapišemo (enačba 1.7)

$$\mathbf{P} = \mathbf{D} - \epsilon_0 \underline{\epsilon} \cdot \mathbf{E} = \epsilon_0 \underline{\epsilon} \cdot \mathbf{E} - \epsilon_0 \mathbf{E} = \epsilon_0 (\underline{\epsilon} - 1) \cdot \mathbf{E}. \quad (8.1)$$

Če uvedemo tenzor linearne susceptibilnosti

$$\chi^{(1)} = \underline{\epsilon} - 1, \quad (8.2)$$

lahko linearni odziv snovi zapišemo strnjeno kot

$$\mathbf{P}_L = \epsilon_0 \chi^{(1)} \cdot \mathbf{E}. \quad (8.3)$$

Ta približek je dober za majhne jakosti električnega polja. Pri večjih poljih postanejo pomembni tudi členi višjega reda v razvoju polarizacije po  $\mathbf{E}$

$$\mathbf{P} = \mathbf{P}_L + \mathbf{P}_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(2)} : \mathbf{E} \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} : : \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E} + \dots \quad (8.4)$$

Vpeljali smo nelinearni susceptibilnosti  $\chi^{(2)}$  in  $\chi^{(3)}$ , ki sta tenzorja tretjega in četrtega ranga. Za bolj nazorno predstavo izpišimo nelinearna dela še po komponentah

$$(\mathbf{P}_{NL,2})_i = \epsilon_0 \chi_{ijk}^{(2)} E_j E_k \quad (8.5)$$

in

$$(\mathbf{P}_{NL,3})_i = \epsilon_0 \chi_{ijkl}^{(3)} E_j E_k E_l, \quad (8.6)$$

pri čemer smo uporabili Einsteinov zapis seštevanja po indeksih. Značilne vrednosti susceptibilnosti v trdnih snoveh so  $\chi^{(1)} \sim 1$ ,  $\chi^{(2)} \sim 10^{-12} \text{ m/V}$  in  $\chi^{(3)} \sim 10^{-22} \text{ m}^2/\text{V}^2$ . Obravnavali bomo samo snovi, v katerih ni izgub in so susceptibilnosti realne.

**Naloga 8.1.1** Pokaži, da so gostote svetlobnega toka, pri katerih dosežemo znaten nelinearen prispevek k polarizaciji

$$\frac{P_{NL}}{P_L} \sim 10^{-6},$$

velikostnega reda  $1 \text{ MW/cm}^2$ . Ker so take vrednosti z navadnim svetilom povsem nedosegljive, je bilo mogoče nelinearne optične pojave opazovati šele po iznajdbi laserjev.

Tenzor  $\chi^{(2)}$  je od nič različen le v snoveh, ki nimajo centra inverzije. Ker lahko v produktu (enačba 8.5) vrstni red  $E_j E_k$  zamenjamo, mora biti tenzor invarianten na to zamenjavo

$$\chi_{ijk} = \chi_{ikj}. \quad (8.7)$$

Vpeljemo poenostavljen zapis, pri katerem prvi indeks prepišemo ( $x = 1, y = 2, z = 3$ ), zadnja dva indeksa pa združimo. Dogovorjene oznake so  $xx = 1, yy = 2, zz = 3, yz = zy = 4, xz = zx = 5, xy = yx = 6$ . Tako na primer  $\chi_{xxz}$  zapišemo kot  $\chi_{15}$ . Namesto splošnega tenzorja tretjega ranga smo torej uvedli matriko velikosti  $3 \times 6$ . Vendar koeficienti matrike niso poljubni. Zaradi simetrijskih lastnosti kristala se matrika poenostavi in navadno je le nekaj komponent različnih od nič. Kadar je v snovi absorpcija pri vseh treh frekvencah dovolj majhna, lahko matriko poenostavimo z dodatnim približkom, tako imenovano Kleinmanovo domnevo<sup>1</sup>. Ta pravi, da je

$$\chi_{ijk} = \chi_{ikj} = \chi_{kij} = \chi_{kji} = \chi_{jik} = \chi_{jki}. \quad (8.8)$$

Kristal	Grupa	Neničelne komponente tenzorja $\chi$	Vrednosti ( $10^{-12} \text{ m/V}$ )
BaTiO <sub>3</sub>	4mm	$\chi_{xxz} = \chi_{yyz} = \chi_{xzx} = \chi_{yzy} = \chi_{15} = \chi_{24}$ $\chi_{zxx} = \chi_{zyy} = \chi_{31} = \chi_{32}$ $\chi_{zzz} = \chi_{33}$	$\chi_{15} = 42,6$ $\chi_{31} = 45,2$ $\chi_{33} = 16,0$
KDP	$\bar{4}2m$	$\chi_{xyz} = \chi_{yxz} = \chi_{xzy} = \chi_{yzx} = \chi_{14} = \chi_{25}$ $\chi_{zxy} = \chi_{zyx} = \chi_{36}$	$\chi_{14} = 0,88$ $\chi_{36} = 1,12$
Telur	32	$\chi_{xxx} = -\chi_{xyy} = -\chi_{yyx} = -\chi_{yxy} =$ $= \chi_{11} = -\chi_{12} = -\chi_{26}$ $\chi_{xyz} = \chi_{xzy} = -\chi_{yxz} = -\chi_{yzx} = \chi_{14} = -\chi_{25}$	$\chi_{11} = 1300$ $\chi_{14} \approx 0$
LiNbO <sub>3</sub>	3m	$\chi_{xxz} = \chi_{yyz} = \chi_{xzx} = \chi_{yzy} = \chi_{15} = \chi_{24}$ $\chi_{zxx} = \chi_{zyy} = \chi_{31} = \chi_{32}$ $\chi_{zzz} = \chi_{33}$ $-\chi_{xxy} = -\chi_{xyx} = \chi_{yyy} = -\chi_{yxx} =$ $= -\chi_{16} = \chi_{22} = -\chi_{21}$	$\chi_{15} \approx \chi_{31}$ $\chi_{31} = -11,9$ $\chi_{33} = 68,8$ $\chi_{22} = 5,52$

Tabela 8.1: Koeficienti nelinearne susceptibilnosti za nekaj izbranih snovi

<sup>1</sup>D. A. Kleinman, Phys. Rev. 126, 1977 (1962).

Poglejmo primer. Vzemimo barijev titanat ( $\text{BaTiO}_3$ ) s točkovno grupo 4mm. To pomeni, da ima 4-števno os simetrije in dve zrcalni ravnini, od katerih ena preslika  $x \rightarrow -x$  ali  $y \rightarrow -y$ , druga pa  $x \rightarrow y$  in  $y \rightarrow x$ . Od nič različni elementi susceptibilnosti so tako samo:

$$\chi_{xxz} = \chi_{xzx} = \chi_{yyz} = \chi_{yzx}; \quad \chi_{zzz}; \quad \chi_{zxx} = \chi_{zyy}. \quad (8.9)$$

Z upoštevanjem Kleinmanove domneve se število različnih členov še zmanjša in ostaneta le dva

$$\chi_{xxz} = \chi_{xzx} = \chi_{yyz} = \chi_{yzx} = \chi_{zxx} = \chi_{zyy} \quad \text{in} \quad \chi_{zzz}. \quad (8.10)$$

V tabeli (8.1)<sup>2</sup> so navedene izmerjene vrednosti in vidimo, da Kleinmanova domnega ni povsem točna, ampak zgolj dober približek.

## 8.2 Nelinearni optični pojavi drugega reda

Vzemimo optično nelinearni kristal s  $\chi^{(2)} \neq 0$ . V smeri pravokotno glede na njegovo mejno ploskev naj vpadata dve valovanji s frekvencama  $\omega_1$  in  $\omega_2$ . Zaradi nelinearne sklopitve nastajajo v snovi nova valovanja z različnimi kombinacijami frekvenc (glej sliko 8.1).



Slika 8.1: Shematski prikaz nastanka valovanj pri nelinearnih optičnih pojavih drugega reda in spekter izhodne svetlobe

Nastanku valovanja pri podvojeni frekvenci pravimo tudi SHG (*Second harmonic generation*), nastanku valovanja pri vsoti frekvenc SFG (*Sum frequency generation*), nastanku valovanja pri razliki frekvenc DFG (*Difference frequency generation*) in pojavu statičnega polja pri  $\omega = 0$  optično usmerjanje (*Optical rectification*). Oglejmo si nekaj teh pojavov podrobnejše.

Pri močnih vpadnih valovanjih navadna valovna enačba ne zadošča. pride do pojava nelinearne polarizacije in valovanje opišemo z nelinearno valovno enačbo

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{\epsilon}{c_0^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}_{\text{NL}}}{\partial t^2}. \quad (8.11)$$

**Naloga 8.2.1** Iz Maxwellovih enačb (1.1 do 1.4) izpelji nelinearno valovno enačbo (8.11), pri čemer upoštevaj zvezo (8.4). Pri tem si pomagaj z identiteto

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}.$$

<sup>2</sup>Izmerjene vrednosti, ki jih najdemo v literaturi, se med seboj pogosto znatno razlikujejo.

Nehomogene valovne enačbe v splošnem ne znamo rešiti in se moramo zateči k približkom. Prva poenostavitev, ki jo bomo naredili, je omejitev na vzporedna vpadna žarka, ki se širita v smeri osi  $z$ . Poleg tega se bomo omejili na izračun samo enega nastalega valovanja in privzeli, da je neodvisno od drugih nastalih valovanj. Ta omejitev ni huda. Dokler sta namreč amplitudi valovanj pri vsoti in razlikri frekvenc majhni, ju lahko obravnavamo vsako posebej. Ni sicer nujno, da sta obe nastali amplitudi vedno majhni, vendar je lahko, kot bomo videli kasneje, le eno valovanje naenkrat po jakosti primerljivo z vpadnim.

V snovi so tako prisotna tri valovanja: dve vpadni in tretje, novo nastalo

$$\begin{aligned}\mathbf{E}_1 &= \frac{\mathbf{e}_1}{2} \left[ A_1(z) e^{i(k_1 z - \omega_1 t)} + A_1^*(z) e^{-i(k_1 z - \omega_1 t)} \right] \\ \mathbf{E}_2 &= \frac{\mathbf{e}_2}{2} \left[ A_2(z) e^{i(k_2 z - \omega_2 t)} + A_2^*(z) e^{-i(k_2 z - \omega_2 t)} \right] \\ \mathbf{E}_3 &= \frac{\mathbf{e}_3}{2} \left[ A_3(z) e^{i(k_3 z - \omega_3 t)} + A_3^*(z) e^{-i(k_3 z - \omega_3 t)} \right].\end{aligned}\quad (8.12)$$

Polja smo zapisali v realni obliki, to je s kompleksno konjugiranimi deli, saj valovna enačba (8.11) ni linearna. Upoštevali smo tudi, da so zaradi nelinearnih pojavov amplitude funkcije kraja, za katere pa lahko privzamemo, da se le počasi spreminja. Njihova kompleksna vrednost dopušča pojav dodatnega faznega zamika. Za valovna števila velja  $k_n^2 = \epsilon_n \omega_n^2 / c_0^2$ , pri čemer je  $\epsilon_n$  dielektrična konstanta pri frekvenci  $\omega_n$  in polarizaciji  $\mathbf{e}_n$ , indeks  $n = 1 \dots 3$  pa označuje valovanje. S tem vsako od treh valovanj pri konstantni amplitudi reši linearni del valovne enačbe.

Naša naloga je ugotoviti, kako se zaradi nelinearnosti spreminjajo amplitude posameznih valovanj. Nastavek za polje, ki bo rešil nelinearno valovno enačbo, je tako

$$\mathbf{E}(z, t) = \sum_{n=1}^3 \frac{\mathbf{e}_n}{2} \left[ A_n(z) e^{i(k_n z - \omega_n t)} + A_n^*(z) e^{-i(k_n z - \omega_n t)} \right]. \quad (8.13)$$

Izračunajmo najprej

$$\nabla^2 \mathbf{E} = - \sum_{n=1}^3 \frac{\mathbf{e}_n}{2} \left[ k_n^2 A_n(z) - 2ik_n \frac{dA_n(z)}{dz} \right] e^{i(k_n z - \omega_n t)} + \text{k. k.} \quad (8.14)$$

S k. k. smo označili kompleksno konjugirani del. Upoštevali smo, da se amplituda  $A_n(z)$  le počasi spreminja s krajem in smo zato njen drugi odvod zanemarili. Izračunamo še drugi odvod po času

$$\frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \sum_{n=1}^3 \frac{\mathbf{e}_n}{2} (-\omega_n^2) \left[ A_n(z) e^{i(k_n z - \omega_n t)} + \text{k. k.} \right]. \quad (8.15)$$

Nelinearna polarizacija vsebuje produkte polj, ki nihajo z vsemi možnimi vsotami in razlikami parov frekvenc  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  in  $\omega_3$

$$\begin{aligned}\mathbf{P}_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(2)} : \mathbf{E} \mathbf{E} &= \epsilon_0 \sum_{n=1}^3 \sum_{m=1}^3 \left( \frac{1}{4} \chi^{(2)} : \mathbf{e}_n \mathbf{e}_m \right) A_n(z) A_m(z) e^{i(k_n + k_m)z - i(\omega_n + \omega_m)t} + \\ &\quad \left( \frac{1}{4} \chi^{(2)} : \mathbf{e}_n \mathbf{e}_m \right) A_n(z) A_m^*(z) e^{i(k_n - k_m)z - i(\omega_n - \omega_m)t} + \text{k.k.}\end{aligned}\quad (8.16)$$

Če želimo, da je valovna enačba (8.11) izpolnjena ob vsakem času  $t$ , se morajo ujemati izrazi pri istih časovnih odvisnostih, to je pri istih frekvencah. Izberimo najprej člene pri  $\omega_n = \omega_3$  in  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ . Dobimo

$$ik_3 \mathbf{e}_3 \frac{dA_3}{dz} e^{ik_3 z} = -\frac{\mu_0 \epsilon_0 \omega_3^2}{4} \chi : \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2 A_1 A_2 e^{i(k_1 + k_2)z}. \quad (8.17)$$

Množimo še obe strani skalarno z  $\mathbf{e}_3$ , upoštevajmo zvezo med  $k_3$  in  $\omega_3$  in ravnajmo podobno še za drugi dve valovanji. Tako dobimo sistem sklopljenih enačb za amplitudo valovanj v optično nelinearnem sredstvu

$$\frac{dA_3}{dz} = \frac{i\omega_3\chi_{ef}}{4c_0n_3} A_1 A_2 e^{-i\Delta kz} \quad (8.18)$$

$$\frac{dA_2}{dz} = \frac{i\omega_2\chi_{ef}}{4c_0n_2} A_1^* A_3 e^{i\Delta kz} \quad (8.19)$$

$$\frac{dA_1}{dz} = \frac{i\omega_1\chi_{ef}}{4c_0n_1} A_2^* A_3 e^{i\Delta kz}. \quad (8.20)$$

Pri tem je

$$\chi_{ef} = \mathbf{e}_3 \cdot \boldsymbol{\chi} : \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2 = \sum_{ijk} \chi_{ijk} e_{3i} e_{1j} e_{2k}. \quad (8.21)$$

Ker ni nujno, da so polarizacijski vektorji vzporedni s koordinatnimi osmi, tudi  $\chi_{ef}$  niso čiste kartezične komponente tenzorja nelinearne susceptibilnosti.

Z  $\Delta k$  smo označili razliko valovnih vektorjev

$$\Delta k = k_3 - k_1 - k_2. \quad (8.22)$$

Čeprav je  $\omega_3 - \omega_2 - \omega_1 = 0$ , je  $\Delta k$  navadno različen od nič zaradi frekvenčne disperzije lomnega količnika. Videli bomo, da je to ključnega pomena za vrsto nelinearnih optičnih pojavov. Dobljeni sistem sklopljenih diferencialnih enačb opisuje več pojavov, odvisno od začetnih pogojev in relativnih intenzitet valovanj. Mi si bomo ogledali le nekaj najpomembnejših primerov.

**Naloga 8.2.2** Pokaži, da nastavek za polje v nelinearni snovi (enačba 8.13) reši nelinearno valovno enačbo (8.11), in pokaži, da spremjanje amplitude posameznih valovanj ustreza enačbam (8.18-8.20).

### 8.3 Optično podvajanje frekvenc

Obravnavajmo optično nelinearno sredstvo, na katerega vpadata valovanji  $E_1$  in  $E_2$ . Naj bosta frekvenci vpadnih valovanj enaki  $\omega_1 = \omega_2 = \omega$ , valovanji pa razlikujemo zaradi možnosti dveh različnih polarizacij. Takrat je  $\omega_3 = 2\omega$  in govorimo o najpreprostejšem in tudi najpomembnejšem optičnem nelinearnem pojavu – podvajaju frekvence. Pogosto ga uporabljamo za pridobivanje laserskih snopov pri krajsih valovnih dolžinah, na primer pri Nd:YAG laserju, ko infrardeče izhodno valovanje (1064 nm) pretvorimo v vidno svetlobo zelene barve (532 nm).

Zanima nas, kako se  $A_3(z) = A_{2\omega}(z)$  spreminja vzdolž nelinearnega kristala pri začetnem pogoju  $A_{2\omega}(0) = 0$ . Privzemimo še, da se pretvorí le manjši del vpadnega energijskega toka, tako da sta amplitudi  $A_1 = A_2 = A_0$  približno konstantni. Tedaj lahko enačbo za  $A_3(z)$  (enačba 8.18) brez težav integriramo do dolžine kristala  $L$  in zapišemo

$$A_{2\omega}(L) = \frac{i\omega\chi_{ef}A_0^2}{2c_0n_2\omega} e^{-i\Delta kL/2} \frac{\sin(\frac{\Delta kL}{2})}{\frac{\Delta kL}{2}} L, \quad (8.23)$$

kjer smo z  $n_{2\omega}$  označili lomni količnik pri dvojni frekvenci. Iz tega izraza izračunamo izhodno gostoto svetlobnega toka pri dvojni frekvenci

$$j_{2\omega}(L) = \frac{1}{2} \epsilon_0 n_{2\omega} c_0 |A_3|^2 = \frac{\omega^2 \chi_{ef}^2}{2n_{2\omega} n_\omega^2 c_0^3 \epsilon_0} j_\omega^2 L^2 \left( \frac{\sin(\frac{\Delta k L}{2})}{\frac{\Delta k L}{2}} \right)^2. \quad (8.24)$$

Gostota energijskega toka frekvenčno podvojene svetlobe torej narašča s kvadratom intenzitete vpadne svetlobe. Naj bo  $S$  presek snopa. Potem je razmerje med energijskim tokom pri podvojeni in osnovni frekvenci oziroma izkoristek pretvorbe

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = \frac{\omega^2 \chi_{ef}^2}{2S n_{2\omega} n_\omega^2 c_0^3 \epsilon_0} P_\omega L^2 \left( \frac{\sin(\frac{\Delta k L}{2})}{\frac{\Delta k L}{2}} \right)^2. \quad (8.25)$$

 Pri izpeljavi frekvenčnega podvajanja iz enačb za nelinearne pojave drugega reda (enačbe 8.18-8.20) moramo biti pazljivi. Tukaj smo uporabili splošne enačbe in tako privzeli, da je vpadno valovanje sestavljeno iz dveh ločenih valovanj s frekvenco  $\omega$  z intenziteto  $j_\omega$ . Lahko pa frekvenčno podvajanje obravnavamo z enim vpadnim valovanjem s frekvenco  $\omega$  in intenziteto  $2j_\omega$ , ki nelinearno interagira samo s sabo. Takrat je zapis enačb za predfaktor drugačen, končen rezultat pa seveda enak.

V izrazih (8.24) in (8.25) nastopa faktor  $\sin^2(\Delta k L/2)/(\Delta k L/2)^2$  (slika 8.2). Zaradi njega je na poti, ki je daljša od  $\pi/\Delta k$ , stopnja pretvorbe zelo majhna.



Slika 8.2: Izkoristek pretvorbe v frekvenčno podvojeno valovanje je sorazmeren s funkcijo  $(\sin(x)/x)^2$ , pri čemer je  $x = \Delta k L/2$ .

Poglejmo primer. Faktor  $\Delta k$  je različen od nič zaradi odvisnosti lomnih količnikov od frekvence. V  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  je redni lomni količnik pri 1000 nm 1,496, pri 500 nm pa 1,514. Vrednost, pri kateri pade intenziteta frekvenčno podvojenega valovanja na nič  $L_c = \pi/\Delta k$ , je tako le okoli 30 mikrometrov. Na večjih dolžinah postane stopnja pretvorbe zanemarljivo majhna.

Za visok izkoristek pretvorbe v frekvenčno podvojeno valovanje je torej pomembno, da se faze čim bolj ujemajo in da je  $\Delta k = 0$ . Takrat je vrednost faktorja  $\sin(\Delta k L/2)/(\Delta k L/2)$  največja in izkoristek pretvorbe narašča sorazmerno s kvadratom dolžine

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = \frac{\omega^2 \chi_{ef}^2}{2S n_{2\omega} n_\omega^2 c_0^3 \epsilon_0} P_\omega L^2. \quad (8.26)$$

Za uporabno pretvorbo v frekvenčno podvojeno valovanje je torej treba doseči fazno ujemanje valovnih vektorjev pri osnovni in podvojeni frekvenci. Kako to naredimo, bomo spoznali v prihodnjem razdelku.

**Naloga 8.3.1** Vemo, da intenziteta frekvenčno podvojenega valovanja narašča sorazmerno s kvadratom dolžine kristala. Takšna odvisnost velja le, če je intenziteta valovanja pri podvojeni frekvenci bistveno manjša od intenziteti vpadnega valovanja, oziroma  $A_3 \ll A_1, A_2$ . Pokaži, da v nasprotnem primeru intenziteta frekvenčno podvojenega valovanja  $j_{2\omega}(L)$  narašča kot

$$j_{2\omega}(L) = j_0 \tanh^2 \left( \chi_{ef} \omega \sqrt{\frac{j_0}{2n_3 n_1^2 c_0^3 \epsilon_0}} L \right), \quad (8.27)$$

pri čemer je  $j_0$  vpadna intenziteta valovanja pri osnovni frekvenci. Namig: upoštevaj, da se celotna energija ohranja.



Slika 8.3: Izkoristek pretvorbe v frekvenčno podvojeno valovanje. Če privzamemo, da se intenziteta osnovnega žarka ne zmanjšuje, je odvisnost parabolična (rdeča krivulja), kar je dober približek le za majhne intenzitete. Bolj natančen izračun pokaže, da je izkoristek pretvorbe sorazmeren s  $\tanh^2(\kappa L)$ .

Poglejmo še, kaj se zgodi, kadar pogoj ujemanja faz ni izpolnjen in  $\Delta k \neq 0$ . Takrat dolžino kristala  $L$  v izrazu (8.25) pokrajšamo in izkoristek pretvorbe z naraščajočim  $L$  sinusno niha med nič in neko največjo vrednostjo. Tak pojav lahko opazimo, če uporabimo klinast vzorec, ki se mu debelina spreminja, ali pa če vzorec sučemo in na ta način spremojamo razliko faz. Ta pojav, imenujemo ga Makerjeve oscilacije<sup>3</sup>, uporabljammo za določanje nelinearne susceptibilnosti kristalov.

### Ujemanje faz

Poglejmo, kako lahko dosežemo ujemanje faz, ki je nujno za učinkovito optično podvajanje frekvenc. Spomnimo se, da je pogoj za ujemanje faz

$$\Delta k = k_3 - k_1 - k_2 = k_3^\omega - k_1^\omega - k_2^\omega = \frac{2\omega}{c_0} n_3 - \frac{\omega}{c_0} n_1 - \frac{\omega}{c_0} n_2 = 0. \quad (8.28)$$

Iz tega sledi pogoj za ujemanje faz

$$n_1^\omega + n_2^\omega = 2n_3^{2\omega}. \quad (8.29)$$

<sup>3</sup>P. D. Maker et al., Phys. Rev. Lett. 8, 21 (1962).

Da lahko zadostimo gornjemu pogoju, izkoristimo dvojni lom v anizotropnih kristalih (glej poglavje 1.8), pri čemer se zaradi enostavnosti omejimo le na optično enoosne kristale. Obravnavajmo samo kristale brez absorpcije in z normalno disperzijo, to pomeni, da oba lomna količnika naraščata s frekvenco.

Za razumevanje je najbolj nazoren grafični prikaz (slika 8.4). Podrobnejše poglejmo primer s slike (a). Na njem so narisani lomni količniki za pozitivno anizotropni ( $n_e > n_o$ ) enoosni kristal pri enojni in dvojni frekvenci v odvisnosti od kota glede na optično os. Rdeča barva nakazuje lomne količnike pri vpadni frekvenci, modra pa pri podvojeni. Ekscentričnost elipse za izredni lomni količnik in frekvenčna disperzija sta zaradi večje nazornosti močno pretirani. Opazimo, da je pri nekem kotu  $\vartheta$  med smerjo širjenja svetlobe  $\mathbf{k}$  in optično osjo  $z$  redni lomni količnik pri dvojni frekvenci enak izrednemu količniku pri osnovni frekvenci. Če torej izberemo izredno polarizacijo vpadnega valovanja (tako, ki leži v ravnini optične osi in smeri širjenja), bo za podvojeno valovanje z redno polarizacijo (to je pravokotno na optično os) pri kotu  $\vartheta_m$  izpolnjen pogoj ujemanja faz (enačba 8.29). Zapišimo to še z enačbo.



Slika 8.4: Štirje primeri, pri katerih je izpolnjen pogoj za ujemanje faz. (a) Ujemanje faz prvega reda za pozitivno anizotropno snov, (b) ujemanje faz prvega reda za negativno anizotropno snov ter ujemanje faz drugega reda za pozitivno (c) in negativno (d) anizotropno snov.

Lomni količnik za redno polarizirano valovanje pri podvojeni frekvenci mora biti enak lomnemu količniku za izredno polarizirano valovanje pri osnovni frekvenci. Pri tem je lomni količnik za izredno valovanje odvisen od kota

$$\frac{1}{(n_o^{2\omega})^2} = \frac{1}{(n^\omega(\vartheta))^2} = \frac{\cos^2 \vartheta}{(n_o^\omega)^2} + \frac{\sin^2 \vartheta}{(n_e^\omega)^2}. \quad (8.30)$$

Tako dobimo izraz

$$\cos^2 \vartheta_m = \frac{(n_o^{2\omega})^{-2} - (n_e^{2\omega})^{-2}}{(n_o^{2\omega})^{-2} + (n_e^{2\omega})^{-2}}, \quad (8.31)$$

iz katerega lahko izračunamo kot  $\vartheta_m$ , pri katerem pride do ujemanja faz.

**Naloga 8.3.2** Pokaži, da v primeru negativne anizotropije pogoj za ujemanje faz zapišemo kot

$$\cos^2 \vartheta_m = \frac{(n_o^{2\omega})^{-2} - (n_e^{2\omega})^{-2}}{(n_o^{2\omega})^{-2} + (n_e^{2\omega})^{-2}}. \quad (8.32)$$

S slike (8.4 c in d) lahko razberemo, da obstaja še en primer, pri katerem je izpolnjen pogoj za ujemanje faz. Poglejmo primer (c), pri katerem sta v vpadnem valovanju prisotni obe polarizaciji, redna in izredna, podvojeno valovanje pa je redno polarizirano. Tedaj mora biti za ujemanje faz vsota rednega in izrednega lomčnika pri osnovni frekvenci enaka dvakratniku rednega lomčnika pri dvojni frekvenci. Povedano drugače: lomni količnik pri dvojni frekvenci mora biti enak povprečju rednega in izrednega lomčnika pri osnovni frekvenci. Za praktično uporabo je ta izbira, kadar obstaja, celo ugodnejša, ker je pri njej kot ujemanja faz bliže  $\pi/2$ . Ujemanje faz je zato manj občutljivo na majhna odstopanja v kotu ali na temperaturne spremembe lomnih količnikov. Račun kota  $\vartheta_m$  za ta primer je bolj zahteven, saj je treba rešiti enačbo četrte stopnje.

### Efektivna susceptibilnost

Na izhodno moč frekvenčno podvojenega snopa poleg faznega faktorja bistveno vpliva tudi efektivna susceptibilnost  $\chi_{ef}$ , ki jo moramo izračunati za vsak primer posebej. V optično enoosnem kristalu je kriterij ujemanja faz izpolnjen na stožcu okoli optične osi, pri čemer je stožec določen z izračunanim kotom  $\vartheta_m$  (enačbi 8.31 in 8.32). Drugi kot, ki določa smer širjenja v ravnini, ki je pravokotna na optično os, pa izberemo tako, da izkoristimo največje komponente nelinearne susceptibilnosti.

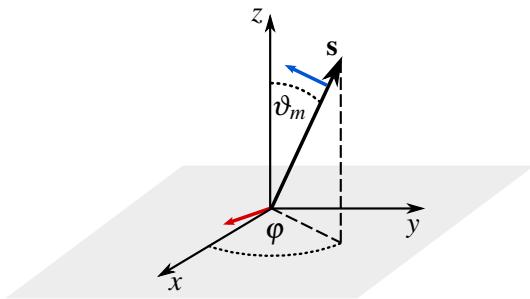
Oglejmo si kot primer spet  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ , ki je negativno anizotropen z vrednostmi  $n_o^\omega = 1,4942$ ,  $n_e^\omega = 1,4603$ ,  $n_o^{2\omega} = 1,5129$  in  $n_e^{2\omega} = 1,4709$  (slika 8.4 b). Valovna dolžina osnovnega snopa naj bo 1064 nm. Po podatkih, navedenih zgoraj, izračunamo po enačbi (8.32) za kot ujemanja faz  $\vartheta_m = 41,25^\circ$ . Nelinearna susceptibilnost ima v tetragonalni simetriji  $\bar{4}2m$  od nič različne komponente  $\chi_{xyz}$ ,  $\chi_{xzy}$ ,  $\chi_{zxy}$ ,  $\chi_{zyx}$ ,  $\chi_{yzx}$  in  $\chi_{yxz}$  (glej tabelo 8.1). Zaradi poenostavitev privzamemo, da so njihove vrednosti enake.

Naj se osnovno in frekvenčno podvojeno valovanje širita v smeri  $\mathbf{s}$ . Pri zapisu vektorja si pomagamo s sliko (8.5)

$$\mathbf{s} = (\cos \varphi \sin \vartheta_m, \sin \varphi \sin \vartheta_m, \cos \vartheta_m), \quad (8.33)$$

kjer je  $\varphi$  kot med osjo  $x$  in projekcijo  $\mathbf{s}$  na ravino  $xy$ . Naša naloga je poiskati vrednost kota  $\varphi$ , pri kateri je moč frekvenčno podvojenega valovanja največja. Iz pogoja za ujemanje faz vidimo, da mora biti vpadna svetloba redno polarizirana, izhodna frekvenčno podvojena pa izredno polarizirana. Redna polarizacija je pravokotna na os  $z$  (optično os) in hkrati pravokotna na smer vektorja  $\mathbf{s}$ . Zapišemo jo kot

$$\mathbf{e}_o = (\sin \varphi, -\cos \varphi, 0). \quad (8.34)$$



Slika 8.5: K izračunu efektivne susceptibilnosti. Rdeč vektor označuje polarizacijo vhodnega valovanja, moder pa polarizacijo frekvenčno podvojenega valovanja.

Izredna polarizacija leži v ravnini, ki jo tvori vektor  $\mathbf{s}$  z osjo  $z$ , hkrati pa je pravokotna na vektor  $\mathbf{s}$ , tako da jo zapišemo kot

$$\mathbf{e}_e = (-\cos \varphi \cos \vartheta_m, -\sin \varphi \cos \vartheta_m, \sin \vartheta_m). \quad (8.35)$$

Spomnimo se, da efektivno susceptibilnost izračunamo kot (enačba 8.21)

$$\chi_{ef} = \sum_{ijk} \chi_{ijk} e_{3i} e_{1j} e_{2k} = \sum_{ijk} \chi_{ijk} e_{ei} e_{oj} e_{ok}. \quad (8.36)$$

Krajši račun pokaže, da je zaradi oblike tenzorja nelinearne susceptibilnosti v izbranem primeru od nič različna le  $z$  komponenta nelinearne polarizacije. Zapišemo

$$\chi_{ef} = \chi_{zxy} e_{ez} e_{ox} e_{oy} + \chi_{zyx} e_{ez} e_{oy} e_{ox} \quad (8.37)$$

in

$$\begin{aligned} P_z^{2\omega} &= -2\epsilon_0 \chi_{zxy} E_0^2 \cos \varphi \sin \varphi \sin \vartheta_m \\ &= -\epsilon_0 \chi_{zxy} E_0^2 \sin(2\varphi) \sin \vartheta_m. \end{aligned} \quad (8.38)$$

Nelinearna polarizacija je največja, kadar je  $\varphi = \pi/4$ . Največji efektivni koeficient  $\chi_{ef}$ , ki nastopa v izrazih za amplitudo in moč podvojene svetlobe (enačbi 8.24 in 8.25), je torej v izbranem primeru

$$\chi_{ef} = \sin \vartheta_m \chi_{zxy} \approx 0,66 \chi_{zxy} \approx 0,74 \text{ pm/V}. \quad (8.39)$$

---

**Naloga 8.3.3** Izračunaj efektivno nelinearno susceptibilnost za frekvenčno podvajanje svetlobe z valovno dolžino  $10 \mu\text{m}$  v kristalu telurja s simetrijsko grupo 32 (glej tabelo 8.1). Lomni količniki:  $n_o^\omega = 4,7969$ ,  $n_e^\omega = 6,2455$ ,  $n_o^{2\omega} = 4,8657$  in  $n_e^{2\omega} = 6,3152$ .

---

## 8.4 Frekvenčno podvajanje Gaussovih snopov

Doslej smo vpadni in frekvenčno podvojeni snop obravnavali kot ravni valovanji, ki sta bili razsežni v prečni smeri. Izračunali smo, da v primeru ujemanja faz ( $\Delta k = 0$ ) moč frekvenčno podvojene svetlobe narašča s kvadratom dolžine poti po nelinearnem sredstvu. Pretvorba v frekvenčno podvojeno svetlobo je po enačbi (8.25) tem učinkovitejša, čim večja je gostota svetlobnega toka pri osnovni frekvenci. Zato v praksi vpadno svetlobo vselej fokusiramo in tako povečamo gostoto toka.

Poglejmo, kako se enačbe spremenijo, če je vpadni snop pri osnovni frekvenci Gaussove oblike. Rezultat lahko ocenimo, če vzamemo, da je efektivna dolžina za pretvorbo  $L$  kar dolžina grla; izven grla je gostota toka znatno manjša kot v grlu, s tem pa tudi izkoristek pretvorbe v frekvenčno podvojeni snop. Dolžina grla je

$$L = 2z_0 = \frac{2n\pi w_0^2}{\lambda} = \frac{n w_0^2 \omega}{c_0}. \quad (8.40)$$

Tako je presek vpadnega snopa

$$S = \pi w_0^2 = \frac{\pi c_0 L}{n \omega}. \quad (8.41)$$

Daljše ko je grlo in večja dolžina  $L$ , na kateri pride do frekvenčnega podvajanja, večji je tudi presek snopa  $S$  in zato manjša intenziteta svetlobe, kar zmanjša učinek pretvorbe v frekvenčno podvojeno valovanje. Vstavimo  $S$  v enačbo (8.25), upoštevamo ujemanje faz in dobimo

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = \frac{\omega^3 \chi_{ef}^2}{2\pi n_{2\omega} n_\omega c_0^4 \epsilon_0} P_\omega L. \quad (8.42)$$

Ob optimalnem fokusiranju je torej izkoristek pretvorbe sorazmeren z dolžino kristala in ne z njenim kvadratom.

**Naloga 8.4.1** Imamo 1 cm dolg kristal KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>. Valovna dolžina vpadne svetlobe je 1,06 μm, vhodna moč  $P_\omega = 10$  kW, efektivna nelinearna susceptibilnost  $\chi_{ef} = 7 \cdot 10^{-13}$  m/V,  $\Delta k = 0$  in  $n = 1,5$ . Pokaži, da je faktor pretvorbe v frekvenčno podvojeno svetlobo okoli 20 %.

Da je dolžina grla  $2z_0 = 1$  cm, mora biti polmer grla okoli 40 μm. Gostota svetlobnega toka v kristalu je pri tem  $2 \cdot 10^8$  W/cm<sup>2</sup>, kar je že blizu praga za poškodbe, predvsem na vstopni ali izstopni površini. Zato je pri podvajjanju frekvenc zelo pomembna odpornost nelinearnega kristala proti poškodbam zaradi velike gostote svetlobnega toka. To in možnost izpolnitve kriterija ujemanja faz sta poglavitna kriterija pri izbiri snovi za frekvenčno podvajanje.

## 8.5 \*Račun podvajanja Gaussovih snopov

V prejšnjem razdelku smo na hitro grobo ocenili vpliv oblike Gaussovih snopov na frekvenčno podvajanje. Naredimo zdaj še natančnejši izračun. Vrnimo se k valovni enačbi (8.11), vpadna snopa naj bosta pri frekvencah  $\omega_1$  in  $\omega_2$ , nastajajoč snop pa pri frekvenci  $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$ . Podobno kot prej naj ima vsako od polj obliko

$$\mathbf{E}_i = \frac{\mathbf{e}_i}{2} \left[ \tilde{A}_i(r, z) e^{i(k_i z - \omega_i t)} + \tilde{A}_i^*(r, z) e^{-i(k_i z - \omega_i t)} \right], \quad (8.43)$$

pri čemer je  $\tilde{A}(r, z)$  zdaj funkcija tako vzdolžne kot tudi prečne koordinate. Privzeli bomo, da se vzdolž  $z$  le počasi spreminja. Zaradi poenostavljenega zapisa vpeljimo novo spremenljivko

$$\psi_i = \sqrt{\frac{n_i}{\omega_i}} \tilde{A}_i. \quad (8.44)$$

Tako je nastavek za električno poljsko jakost

$$\mathbf{E}_i = \frac{\mathbf{e}_i}{2} \sqrt{\frac{\omega_i}{n_i}} \psi_i(r, z) e^{i(k_i z - \omega_i t)} + \text{k. k.} \quad (8.45)$$

Vstavimo nastavek (8.45) v valovno enačbo (8.11) in ločimo na levi in desni člene z enako frekvenco. Zaradi počasnega spremnjanja vzdolž smeri  $z$  lahko zanemarimo tudi druge odvode  $\psi$  po  $z$ . Od tod sledi sklopljen sistem obosnih enačb

$$\nabla_{\perp}^2 \psi_1 + 2ik_1 \psi'_1 = -\frac{k_1}{2} \kappa \psi_2^* \psi_3 e^{-i\Delta kz} \quad (8.46)$$

$$\nabla_{\perp}^2 \psi_2 + 2ik_2 \psi'_2 = -\frac{k_2}{2} \kappa \psi_1^* \psi_3 e^{-i\Delta kz} \quad (8.47)$$

$$\nabla_{\perp}^2 \psi_3 + 2ik_3 \psi'_3 = -\frac{k_3}{2} \kappa \psi_1 \psi_2 e^{i\Delta kz} \quad (8.48)$$

s pripadajočim sistemom konjugiranih enačb. Pri tem je

$$\kappa = \frac{\chi_{ef}}{c_0} \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_2 \omega_3}{n_1 n_2 n_3}}. \quad (8.49)$$

S črtico smo označili odvajanje po  $z$ . Gornji sistem enačb je očitno posplošitev sistema enačb (8.18 do 8.20) za primer, ko je valovanje odvisno tudi od prečne koordinate. Reševanje tega nelinearnega sistema parcialnih diferencialnih enačb je v splošnem zelo zapleteno.

Poglejmo le najenostavnnejši primer frekvenčnega podvajanja, ko je  $\omega_3 = 2\omega_1 = 2\omega$ . Vpadna snopa naj bosta enaka in Gaussove oblike (enačba 3.27), njuna amplituda pa naj bo enaka  $A_1$

$$\psi_1 = \psi_2 = A_1 \frac{1}{1 + iz/z_1} \exp\left(-\frac{r^2}{w_1^2(z)} + \frac{ik_1 r^2}{2R_1(z)}\right). \quad (8.50)$$

Privzemimo še, da je izpolnjen pogoj za ujemanje faz,  $\Delta k = 0$ , in da je  $\psi_3$  dovolj majhen, da nam zmanjševanja  $\psi_1$  ni treba upoštevati. Tudi za podvojeni snop privzemimo Gaussovo obliko, njegova amplituda  $A_3$  pa naj le počasi narašča. Zapišemo ga kot

$$\psi_3 = A_3(z) \psi_{3H}(z, r) = A_3(z) \frac{1}{1 + iz/z_3} \exp\left(-\frac{r^2}{w_3^2(z)} + \frac{ik_3 r^2}{2R_3(z)}\right), \quad (8.51)$$

pri čemer  $\psi_{3H}$  reši homogeno obosno valovno enačbo (3.5). Ko izraza za  $\psi_1$  in  $\psi_3$  vstavimo v tretjo enačbo sistema sklopljenih enačb (8.48), ostane na levi le člen oblike  $2ik_3 A'_3(z) \psi_{3H}$ . Tako dobimo pogoj

$$A'_3(z) \frac{1}{1 + iz/z_3} \exp\left(-\frac{r^2}{w_3^2(z)} + \frac{ik_3 r^2}{2R_3(z)}\right) = \frac{i\kappa}{4} A_1^2 \frac{1}{(1 + iz/z_1)^2} \exp\left(-\frac{2r^2}{w_1^2(z)} + \frac{ik_1 r^2}{R_1(z)}\right). \quad (8.52)$$

Poiščimo rešitev te enačbe v obliki, za katero velja  $w_{30}^2 = w_{10}^2/2$ . Tedaj je

$$z_3 = \frac{k_3 w_{30}^2}{2} = \frac{2k_1 w_{10}^2}{4} = z_1 \quad (8.53)$$

in je tudi  $w_3^2(z) = w_1^2(z)/2$ . Poleg tega je  $R_3(z) = R_1(z)$  in lahko na obeh straneh pokrajšamo eksponentna faktorja. Ostane

$$A'_3(z) = \frac{i\kappa}{4} A_1^2 \frac{1}{1 + iz/z_1}. \quad (8.54)$$

Gornjo enačbo seveda brez težav integriramo. Naj bo grlo vpadnega snopa ravno na sredini nelinearnega sredstva, tako da integriramo od  $-L/2$  do  $L/2$

$$\begin{aligned} A_3(L) &= \frac{i\kappa}{4} A_1^2 \int_{-L/2}^{L/2} \frac{dz}{1 + iz/z_1} = \frac{\kappa}{4} A_1^2 z_1 \ln \frac{1 + i\frac{L}{2z_1}}{1 - i\frac{L}{2z_1}} = \\ &= \frac{\kappa}{2} A_1^2 z_1 \arctan \frac{L}{2z_1}. \end{aligned} \quad (8.55)$$

Moč Gaussovega snopa je

$$P_i = \pi w_{i0}^2 \frac{1}{2} c_0 n_i \epsilon_0 E_{i0}^2 = \frac{\pi}{2} w_{i0}^2 \epsilon_0 c_0 \omega_i A_i^2, \quad (8.56)$$

tako da je izkoristek pri frekvenčnem podvajjanju Gaussovega snopa

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = \frac{A_3^2}{A_1^2} = \frac{\chi_{ef}^2 \omega^3 P_\omega z_1}{2\pi c_0^4 \epsilon_0 n_1 n_3} \arctan^2 \left( \frac{L}{2z_1} \right) = \frac{\chi_{ef}^2 \omega^3 P_\omega}{2\pi c_0^4 \epsilon_0 n_1 n_3} \frac{L}{2} \arctan^2 \left( \frac{L}{2z_1} \right) \frac{1}{L/2z_1}. \quad (8.57)$$

Funkcija  $(\arctan^2 x)/x$  zavzame največjo vrednost 0,64 pri  $x = L/2z_1 = 1,39$ . Pri dani dolžini nelinearnega sredstva  $L$  je torej izkoristek največji, kadar je  $z_1 = 0,36L$ , kar je malo manj kot pri preprosti oceni  $z_1 = 0,5L$  (enačba 8.40). Največji izkoristek frekvenčnega podvajanja Gaussovih snopov je tako

$$\frac{P_{2\omega}}{P_\omega} = 0,32 \frac{\chi_{ef}^2 \omega^3}{2\pi c_0^4 \epsilon_0 n_1 n_3} P_\omega L. \quad (8.58)$$

To je malo manj od preproste ocene, ki smo jo naredili v prejšnjem razdelku (enačba 8.42), v obeh primerih pa izkoristek narašča linearno z dolžino kristala.

## 8.6 Optično parametrično ojačevanje

Oglejmo si še en zelo uporaben primer mešanja treh valovanj, ki ga opisujejo enačbe (8.18) do (8.20). Gre za optično parametrično ojačevanje, pri katerem nelinearne optične pojave izkoristimo za ojačevanje optičnih signalov. Imejmo vhodni signal pri frekvenci  $\omega_1$ , ki ga želimo ojačati, in močno črpalno valovanje pri frekvenci  $\omega_3 > \omega_1$ . Zaradi nelinearnosti v snovi se intenziteta valovanja pri  $\omega_1$  povečuje, intenziteta valovanja pri  $\omega_3$  zmanjšuje, hkrati pa zaradi ohranitve energije nastaja dodatno valovanje pri razliki frekvenc  $\omega_2 = \omega_3 - \omega_1$ . Proses parametričnega ojačevanja si torej lahko predstavljamo kot pretvorbo enega fotona pri frekvenci  $\omega_3$  v dva fotona pri  $\omega_1$  in  $\omega_2$ . Parametrično ojačevanje pogosto uporabljam za ojačevanje šibkih signalov v infrardečem območju.



Slika 8.6: Shematski prikaz nastanka valovanj pri optičnem parametričnem ojačevanju

Izhajamo iz splošnih enačb za nelinearne optične pojave drugega reda (enačbe 8.18 do 8.20).

$$\frac{dA_3}{dz} = \frac{i\omega_3 \chi_{ef}}{4c_0 n_3} A_1 A_2 e^{-i\Delta kz} \quad (8.59)$$

$$\frac{dA_2}{dz} = \frac{i\omega_2 \chi_{ef}}{4c_0 n_2} A_1^* A_3 e^{i\Delta kz} \quad (8.60)$$

$$\frac{dA_1}{dz} = \frac{i\omega_1 \chi_{ef}}{4c_0 n_1} A_2^* A_3 e^{i\Delta kz}. \quad (8.61)$$

Privzemimo, da je črpalno valovanje vselej dosti močnejše od drugih dveh ( $A_3 \gg A_1, A_2$ ) in njegova jakost približno konstantna  $A_3 = A_{30}$ . Poskrbimo še, da je izpolnjen pogoj za ujemanje faz,  $\Delta k = 0$ , začetna pogoja pa zapišemo kot  $A_1(z=0) = A_{10}$  in  $A_2(z=0) = 0$ . Ko vse to upoštevamo, dobimo dve sklopljeni enačbi

$$\frac{dA_1}{dz} = \frac{i\omega_1\chi_{ef}}{4c_0n_1} A_2^* A_{30} \quad \text{in} \quad (8.62)$$

$$\frac{dA_2^*}{dz} = -\frac{i\omega_2\chi_{ef}}{4c_0n_2} A_1 A_{30}^*. \quad (8.63)$$

Enačbi lahko rešimo, tako da prvo odvajamo po  $z$  in vanjo vstavimo drugo enačbo. Sledi

$$\frac{d^2A_1}{dz^2} = \frac{\omega_1\omega_2\chi_{ef}^2|A_{30}|^2}{16c_0^2n_1n_2} A_1 = \kappa^2 A_1 \quad (8.64)$$

in podobno za  $A_2$

$$\frac{d^2A_2}{dz^2} = \frac{\omega_1\omega_2\chi_{ef}^2|A_{30}|^2}{16c_0^2n_1n_2} A_2 = \kappa^2 A_2. \quad (8.65)$$

Ob upoštevanju začetnih pogojev izračunamo rešitev za naraščanje amplitude signalnega žarka z začetno amplitudo  $A_{10}$

$$A_1 = A_{10} \cosh(\kappa L). \quad (8.66)$$

Hkrati z njim narašča tudi amplituda dodatnega nedejavnega (*idle*) žarka, ki nastane med procesom ojačanja

$$A_2 = A_{20} \sinh(\kappa L). \quad (8.67)$$

V gornjih enačbah je  $L$  dolžina nelinearnega sredstva,

$$\kappa^2 = \frac{\omega_1\omega_2\chi_{ef}^2|A_{30}|^2}{16c_0^2n_1n_2} \quad (8.68)$$

in

$$A_{20} = i\sqrt{\frac{\omega_2n_1}{\omega_1n_2}} A_{10}. \quad (8.69)$$

Na začetku intenziteti obeh valovanj naraščata približno eksponentno na račun črpalnega valovanja. Ko postane njuna intenziteta znatna in se začne  $A_3$  zmanjševati, je treba to seveda tudi upoštevati pri izračunu. V tem primeru je treba rešiti bolj zahteven sistem treh sklopljenih enačb, podobno – a še bolj zapleteno – kot v nalogi (8.3.1).

---

**Naloga 8.6.1** Pokaži, da sta izraza za amplitudi polji  $A_1$  in  $A_2$  (enačbi 8.66 in 8.67) rešitvi sklopljenih enačb (8.62) in (8.63) ob parametrih  $A_{20}$  in  $\kappa$ , kot sta zapisana v enačbah (8.68) in (8.69).

---

Do zdaj smo vedno privzeli, da je izpolnjen pogoj ujemanja faz in  $\Delta k = k_3 - k_1 - k_2 = 0$ . Ta pogoj lahko izpolnimo na enak način kot pri podvajaju frekvence: v dvolomnem kristalu izberemo ustrezno smer glede na optično os in ustrezne polarizacije, tako da velja  $\omega_3n_3 = \omega_1n_1 + \omega_2n_2$ .

Lahko na primer vzamemo izredno polarizacijo za črpalno valovanje in redni polarizaciji za obe ojačevani valovanji, podobno kot pri podvajjanju frekvence. Tedaj mora biti izpolnjen naslednji pogoj

$$\left[ \left( \frac{\cos \vartheta_m}{n_o^{\omega_3}} \right)^2 + \left( \frac{\sin \vartheta_m}{n_e^{\omega_3}} \right)^2 \right]^{-1/2} = \frac{\omega_1}{\omega_3} n_o^{\omega_1} + \frac{\omega_2}{\omega_3} n_o^{\omega_2}. \quad (8.70)$$



Slika 8.7: Normirani intenziteti ojačanega žarka in dodatnega žarka, ki nastane zaradi ohranitve energije. Naraščajoči funkciji sta seveda samo približek, ki velja, dokler je ojačanje majhno in se intenziteta črpalnega žarka ne zmanjšuje znantno.

**Naloga 8.6.2** Obravnavali smo optično parametrično ojačevanje, ko je bil izpolnjen kriterij za ujemanje faz. Pokaži, v primeru neujemanja faz  $\Delta k \neq 0$  amplitudi ojačevanega in dodatnega žarka naraščata kot

$$A_1 = A_{10} \left( \cosh(\kappa z) - \frac{i\Delta k z}{2\kappa} \sinh(\kappa z) \right) e^{\frac{i\Delta k z}{2}}, \quad A_2 = A_{20} \sinh(\kappa z) e^{\frac{i\Delta k z}{2}}, \quad (8.71)$$

pri čemer sta

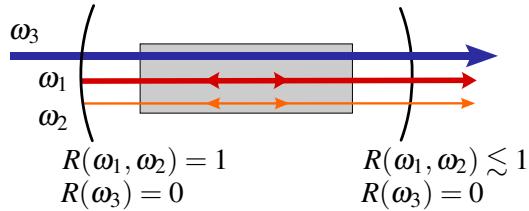
$$\kappa^2 = \frac{\omega_1 \omega_2 \chi_{ef}^2 |A_{30}|^2}{16 c_0^2 n_1 n_2} - \frac{\Delta k^2}{4} \quad \text{in} \quad A_{20} = i \sqrt{\frac{\omega_2 n_1}{\omega_1 n_2}} \sqrt{1 + \frac{\Delta k^2}{4\kappa^2}} A_{10}. \quad (8.72)$$

Hitro uvidimo, da so gornje enačbe v limitnem primeru  $\Delta k = 0$  enake enačbam (8.66, 8.67 in 8.68).

Za konec ocenimo koeficient ojačanja v nelinearnem kristalu LiNbO<sub>3</sub>, v katerem želimo ojačati svetlobo z valovno dolžino  $\lambda = 1 \mu\text{m}$ . Črpajmo z laserjem z valovno dolžino okoli 500 nm in gostoto svetlobnega toka  $5 \text{ MW/cm}^2$ . Lomni količnik snovi je  $n = 2,2$ ,  $\chi_{ef} = 5 \text{ pm/V}$ . Vstavimo podatke v enačbo (8.68) in dobimo vrednost  $\kappa \sim 0,15/\text{cm}$ . Faktor ojačanja vpadne intenzitete svetlobe v 1 cm dolgem kristalu je tako le približno 2 %.

### Optični parametrični oscilator (OPO)

Gornji izračun kaže, da optično parametrično ojačevanje pri prehodu skozi kristal ni prav veliko kljub dokaj močnemu črpальнemu žarku. Zato je smiselno, da svetloba skozi ojačevalno sredstvo preide večkrat in se postopoma ojačuje. To naredimo tako, da optično ojačevalno sredstvo zapremo v optični resonator in signal se ob vsakem obhodu ojača. Sestavili smo t. i. optični parametrični oscilator.



Slika 8.8: Shematski prikaz tipičnega optičnega parametričnega oscilatorja. Ojačevalno sredstvo zapremo med resonatorja, da se signalni žarek ( $\omega_1$ ) ob vsakem preletu ojači.

V optičnemu resonatorju je odbojnosc zrcal za črpalni žarek ( $\omega_3$ ) zelo majhna, odbojnosc za ojačani žarek pa blizu ena. Valovanje pri  $\omega_1$ , ki se v parametričnem oscilatorju ojačuje, nastane spontano, prav tako valovanje pri  $\omega_2 = \omega_3 - \omega_1$ . Njuni frekvenci sta dodatno določeni s pogojem za ujemanje faz  $k_3 - k_1 - k_2 = 0$ , hkrati pa mora ojačevano nihanje sovpadati z lastnim nihanjem resonatorja. S sukanjem ojačevalnega kristala lahko na ta način spremenimo ojačano frekvenco in naredili smo nastavljiv izvor svetlobe, navadno infrardeče.

Za delovanje oscilatorja biti jakost črpalnega žarka tako velika, da je parametrično ojačevanje na obhod večje od izgub. Izračunajmo za primer prag simetričnega oscilatorja. Signal z močjo  $P_0$  se ob prehodu skozi ojačevalno sredstvo ojača (enačba 8.66)

$$P_1 = P_0 \cosh^2(\kappa L), \quad (8.73)$$

hkrati pa se zaradi delno prepustnih zrcal z odbojnoscjo  $R$  intenziteta žarka zmanjšuje. Pri tem ne pozabimo, da je pogoj ujemanja faz izpolnjen le v eni smeri in se svetloba ojačuje le enkrat na celoten obhod. Ob preletu v drugo smer je namreč  $\Delta k \neq 0$  in žarek se ne ojačuje. Moč žarka po obhodu  $P_2$  je enaka začetni moči  $P_0$ , saj je pri pragu ojačanje ravno enako izgubam

$$P_2 = R^2 P_1 = R^2 P_0 \cosh^2(\kappa L) = P_0 \quad (8.74)$$

ozziroma

$$R^2 \cosh^2(\kappa L) = 1. \quad (8.75)$$

Iz gornjega pogoja določimo parameter  $\kappa$ , po enačbi (8.68) pa mejno amplitudo in intenziteto črpalnega žarka. Nadalujmo še prejšnji primer ojačanja svetlobe v 1 cm dolgem kristalu LiNbO<sub>3</sub>. Če je odbojnosc zrcal  $R = 0,9$  in prečni presek žarka  $10 \mu\text{m}^2$ , je moč praga  $P_{\omega_3} = 5 \text{ W}$ .



Optični parametrični oscilator torej oddaja svetlobo, podobno kot laser. Tudi sicer sta si do neke mere podobna: oba sistema potrebujejo močen črpalni mehanizem, oba sistema sta sestavljena iz resonatorja, v katerem se žarek velikokrat odbije in postopoma ojača, in oba oddajata koherentno svetlobo pri točno določeni valovni dolžini. Vendar je med parametričnim oscilatorjem in laserjem velika razlika. Pri laserju pride do ojačanja svetlobe zaradi obrnjene zasedenosti stanj, pri oscilatorju pa zaradi nelinearnega optičnega pojava. Ker pri oscilatorju energija ni shranjena v snovi, ampak se ojača sproti, je zelo pomembno, da sunek črpalnega laserja vpade na kristal istočasno kot ojačevan žarek. Velika prednost oscilatorjev pred laserji je zvezno nastavljiva frekvanca delovanja v zelo širokem frekvenčnem območju.

## 8.7 Optično usmerjanje in teraherčno valovanje

Ko smo obravnavali nelinearne optične pojave drugega reda, smo zapisali različne frekvence, ki so vsebovane v izhodnem signalu (slika 8.1). Eno izmed izhodnih valovanj ima tudi frekvenco enako nič, kar pomeni, da je to statično električno polje. Iz analogije z elektronskimi vezji, kjer izmenično napetost z usmernikom spremenimo v enosmerno napetost, pojavi imenujemo optično usmerjanje, saj iz svetlobnega valovanja nastane statično polje. Tako statično polje navadno ni veliko, saj sunek svetlobe z vršno močjo nekaj MW tipično povzroči nekaj deset mV napetosti v smeri prečno na smer potovanja svetlobe.

**Naloga 8.7.1** Pokaži, da je napetost, ki se pojavi pri optičnem usmerjanju, približno enaka

$$U = \frac{\chi P_0}{n^3 \epsilon_0 c_0 a}, \quad (8.76)$$

pri čemer je  $P_0$  moč vpadne svetlobe,  $n$  lomni količnik snovi in  $a$  širina kristala. Namig: nelinearen kristal obravnavaj kot ploščati kondenzator. Oceni še napetost, če je  $\chi = 3 \text{ pV/m}$ ,  $P_0 = 1 \text{ MW}$ ,  $n = 2,2$  in  $a = 5 \text{ mm}$ .

Precej bolj uporaben je pojav, ko na nelinearen kristal posvetimo z ultrakratkimi sunki svetlobe, tipično okoli ps ali krajsimi. Spomnimo se, da je povsem monokromatsko valovanje lahko samo tako, ki ima neskončen koherenčni čas in je časovno neomejeno (2.18). Če je valovanje časovno omejeno, je njegov spekter končno širok, pri čemer imajo krajsi sunki svetlobe širši spekter valovanja. Ko z ultrakratkim sunkom osvetlimo optično nelinearen kristal, v kristal vstopajo vse frekvence z danega intervala  $\omega \pm \Delta\omega$ . Optično usmerjanje ni več popolno, saj se frekvence ne odštejejo povsem, ampak se namesto statičnega polja pojavi valovanje pri frekvencah, ki so podobne širini spektra. Ocenimo jih.



Slika 8.9: Shematski prikaz nastanka teraherčnega valovanja v optično nelinearnem sredstvu

S sunkom, ki je dolg 1 ps, tako dobimo

$$\Delta\omega = \frac{1}{\tau} = \frac{1}{10^{-12} \text{ Hz}} = 1 \text{ THz}. \quad (8.77)$$

Valovanje, ki nastane pri takem kvazi optičnem usmerjanju, ima torej frekvence v teraherčnem področju in naredili smo izvor teraherčnega valovanja. Teraherčno valovanje, to je elektromagnetsko valovanje s frekvencami v območju od 0,3 do 3 THz oziroma z valovnimi dolžinami med 0,1 in 1 mm, se uporablja za neinvazivno slikanje in preiskave tkiv in materialov. Kristali, ki se najpogosteje uporabljajo za nastanek teraherčnega valovanja, so ZnTe, GaP, GaSe in GaAs.

## 8.8 Nelinearni pojavi tretjega reda

Doslej smo obravnavali najnižji red nelinearnosti, katerega glavni učinek je mešanje treh frekvenc, na primer podvajanje frekvence ali parametrično ojačevanje. Ti pojavi so možni le v kristalih brez centra inverzije. Naslednji člen razvoja nelinearne polarizacije po električnem polju obstaja v vsaki snovi. V njem nastopa polje v tretji potenci

$$\mathbf{P}_{NL,3} = \epsilon_0 \chi^{(3)} : \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E} \quad (8.78)$$

oziroma izpisano po komponentah

$$(\mathbf{P}_{NL,3})_i = \epsilon_0 \chi_{ijkl}^{(3)} E_j E_k E_l. \quad (8.79)$$

Pri tem je  $\chi^{(3)}$  tenzor četrtega ranga, tipična velikost pa je okoli  $10^{-22} \text{ m}^2/\text{V}^2$ . V splošnem ima 81 različnih neodvisnih komponent, to število pa se lahko zelo zmanjša zaradi simetrije snovi. V izotropni snovi je tako 21 neničelnih elementov, od katerih so le trije neodvisni.

Če vsebuje vpadno polje le eno frekvenco, se zaradi nelinearnosti tretjega reda pojavi polarizacija pri  $3\omega$  in  $\omega$ . Pri dveh vpadnih frekvencah  $\omega_1$  in  $\omega_2$  so možne kombinacije  $2\omega_1 \pm \omega_2$  in  $\omega_1 \pm 2\omega_2$ , pri treh vpadnih frekvencah pa vse možne vsote in razlike frekvenc, to so  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, 3\omega_1, 3\omega_2, 3\omega_3, \omega_1 + \omega_2 + \omega_3, \omega_1 + \omega_2 - \omega_3, \omega_1 - \omega_2 + \omega_3, -\omega_1 + \omega_2 + \omega_3, 2\omega_1 \pm \omega_2, 2\omega_1 \pm \omega_3, 2\omega_2 \pm \omega_1, 2\omega_2 \pm \omega_3, 2\omega_3 \pm \omega_1, 2\omega_3 \pm \omega_2$ . Možnosti je torej precej več kot pri nelinearnosti drugega reda in računi so zato v splošnem precej zapletenejši.

Obravnava nastanka valovanja pri kombinaciji frekvenc je zelo podobna obravnavi podvajanja frekvence in parametričnemu ojačevanju. V enačbah za nastanek novega valovanja ali ojačevanje katerega od vpadnih snopov spet nastopi fazni faktor, ki vsebuje razliko vseh valovnih vektorjev  $\Delta\mathbf{k}$ . Da bo nastajanje novega valovanja znatno, mora biti  $\Delta kL \simeq 0$ , spet mora biti torej izpolnjen pogoj ujemanja faz. Ker v tem primeru nastopajo v splošnem štirje valovni vektorji, je seveda tudi pri izbiri geometrije in polarizacij za ujemanje faz precej več možnosti.

Vrnimo se k najpreprostejšemu primeru, ko ima vpadno valovanje le eno frekvenco. Takrat se pojavi valovanje pri potrojeni frekvenci, pa tudi pri frekvenci, ki je enaka vpadni. Pojavi se torej polarizacija pri vpadni frekvenci, ki spremeni obnašanje osnovnega žarka, in žarek vpliva sam nase. Ti pojavi, ki jih poimenujemo s predpono *samo-*, kot na primer samozbiranje, so značilni za nelinearne pojave tretjega reda.

## 8.9 Optični Kerrov pojav

Naj valovanje vpada na nelinearno snov, za katero velja  $\chi^{(2)} = 0$ . Polarizacija je potem enaka vsoti linearne in nelinearne dela tretjega reda (enačba 8.4)

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} : \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E}. \quad (8.80)$$

Ker obravnavamo nelinearne pojave, moramo tudi v tem primeru zapisati realna električna polja. To naredimo z vsoto dveh kompleksno konjugiranih členov

$$\mathbf{E} = \frac{\mathbf{e}}{2} (A e^{i(kz-\omega t)} + A^* e^{-i(kz-\omega t)}). \quad (8.81)$$

Podobno zapišemo tudi za polarizacijo, pri čemer nas bodo zanimali samo členi, ki nihajo s frekvenco  $\omega$

$$\mathbf{P} = \frac{1}{2} (\mathbf{P}_\omega e^{i(kz-\omega t)} + \mathbf{P}_\omega^* e^{-i(kz-\omega t)}). \quad (8.82)$$

Ti členi nastopijo v primeru, da v izrazu  $\mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E}$  vzamemo dvakrat nekonjugirani del, enkrat pa konjugiranega. To lahko naredimo na tri možne načine in dobimo tri enake člene. Sledi

$$\frac{1}{2} \mathbf{P}_{\omega, \text{NL}} = 3 \frac{1}{8} A A^* \left( \epsilon_0 \chi^{(3)} : \mathbf{e} \mathbf{e} \right) \mathbf{A}. \quad (8.83)$$

Celotna polarizacija je

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi^{(1)} \cdot \mathbf{E} + \frac{3}{4} |A|^2 \left( \epsilon_0 \chi^{(3)} : \mathbf{e} \mathbf{e} \right) \mathbf{E}. \quad (8.84)$$

Z upoštevanjem zveze med amplitudo polja in povprečno gostoto energijskega toka (enačba 1.31) zapišemo

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \left( \chi^{(1)} + \frac{3}{4} \frac{2j}{\epsilon_0 \tilde{n} c_0} \chi^{(3)} : \mathbf{e} \mathbf{e} \right) \mathbf{E}. \quad (8.85)$$

Z  $\tilde{n}$  smo označili lomni količnik pri frekvenci  $\omega$ . Faktor v oklepaju ni nič drugega kot efektivna susceptibilnost, ki je neposredno povezana z lomnim količnikom snovi  $\chi_{ef} = \epsilon - 1 = n^2 - 1$ . Gornja enačba torej opisuje pojav, pri katerem vpadna svetloba vpliva na lomni količnik snovi. Gre za podoben učinek kot pri Kerrovem pojavu (enačba 9.5), pri katerem se lomni količnik spremeni pod vplivom zunanjega električnega polja, zato imenujemo opisan pojav optični Kerrov pojav<sup>4</sup>.

Poglejmo pojav podrobnejše na primeru izotropne snovi. Na snov naj vpada valovanje, ki je polarizirano v smeri  $x$ , tako da ima nelinearna polarizacija le komponento

$$P_{\text{NL},x} = \epsilon_0 \left( \chi_{xx} + \frac{3}{4} \chi_{xxxx} \frac{2j}{\epsilon_0 \tilde{n} c_0} \right) E = \epsilon_0 \chi_{ef} E = \epsilon_0 (n^2 - 1) E. \quad (8.86)$$

Ko izrazimo lomni količnik, dobimo

$$n \approx \tilde{n} + \frac{3\chi_{xxxx}}{4\epsilon_0 c_0 \tilde{n}^2} j. \quad (8.87)$$

Efektivni lomni količnik v snovi lahko torej zapišemo kot

$$n = \tilde{n} + n_2 j, \quad (8.88)$$

pri čemer smo vpeljali nelinearni lomni količnik

$$n_2 = \frac{3\chi_{xxxx}}{4\epsilon_0 c_0 \tilde{n}^2}. \quad (8.89)$$

Efektivni lomni količnik snovi je torej odvisen od intenzitete svetlobe, ki vpada nanjo. Tipične vrednosti nelinearnega lomnega količnika za vidno svetlobo so  $10^{-20} \text{ m}^2/\text{W}$ . V tekočini  $\text{CS}_2$  je  $n_2 = 3.2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ , v nekaterih drugih snoveh (npr. polprevodnikih) je lahko vrednost  $n_2$  večja še za več velikostnih redov,  $n_2$  pa je lahko tudi negativen.

Zanimivi posledici lomnega količnika, odvisnega od intenzitete svetlobe, sta samozbiranje svetlobnega snopa in širjenje solitonov po vodnikih, kar si bomo pogledali v naslednjih razdelkih.



Ničesar nismo povedali o ujemanju faz, ki je sicer nujno potrebno za učinkovite nelinearne optične pojave. V tem primeru vpada na snov en sam laserski žarek in pogoj ujemanja faz je vedno izpolnjen.

<sup>4</sup>Škotski fizik John Kerr, 1824–1907.

Snov	$\chi^{(3)}$ ( $\text{m}^2/\text{V}^2$ )	$n_2$ ( $\text{m}^2/\text{W}$ )
steklo BK7	$2,8 \times 10^{-22}$	$3,2 \times 10^{-20}$
voda	$2,5 \times 10^{-22}$	$4,1 \times 10^{-20}$
GaAs	$1,4 \times 10^{-18}$	$3,3 \times 10^{-17}$
ZnSe	$6,2 \times 10^{-20}$	$3,0 \times 10^{-18}$
CS <sub>2</sub>	$3,1 \times 10^{-20}$	$3,2 \times 10^{-18}$
polimer 4BCMU	$-1,2 \times 10^{-19}$	$-1,5 \times 10^{-17}$

Tabela 8.2: Susceptibilnost tretjega reda in nelinearni lomni količnik za nekaj izbranih snovi

## 8.10 Samozbiranje

Za začetek si oglejmo pojav samozbiranja svetlobe. Osnovni Gaussov snop (enačba 3.27) naj vpada na sredstvo, v katerem je lomni količnik odvisen od intenzitete po enačbi (8.88). Vzemimo, da je  $n_2 > 0$ , tako da je lomni količnik v sredini snopa večji od nemotenega lomnega količnika na robu. V osi snopa se optična pot zaradi optično gostejšega sredstva podaljša in valovna fronta začne v osi zaostajati glede na fronte na robu snopa. Če je zaostajanje dovolj veliko, lahko krivinski radij valovne fronte postane negativen in snop se ne širi, temveč oži (slika 8.10). Temu pojavu pravimo samozbiranje. Samozbiranje je pri dovolj veliki moči snopa lahko tako veliko, da pride do katastrofične zožitve snopa in s tem do tolikšnega povečanja gostote svetlobnega toka, da nastanejo poškodbe v snovi.



Slika 8.10: V Gaussovem snopu je intenziteta valovanja odvisna od prečne lege, zato je tudi lomni količnik nelinearnega sredstva odvisen od nje. To vodi do samozbiranja svetlobe. Na sliki so fronte Gaussovega snopa narisane kot ravni valovi.

**Naloga 8.10.1** Gaussov snop svetlobe z močjo  $P$  in polmerom  $w$  naj pravokotno vpada na ploščico kristala debeline  $d$ . Pokaži, da ploščica deluje na snop kot leča z goriščno razdaljo

$$f = \frac{\pi w^4}{8n_2 d P}, \quad (8.90)$$

pri čemer je  $n_2$  nelinearni lomni količnik.



Eksperimentalna metoda, s katero merimo nelinearni lomni količnik, je tako imenovana metoda vzdolžnega premika (*Z-scan*). Optično nelinearno sredstvo (naj ima  $n_2 > 0$ ) postavimo v zožan laserski snop (slika 8.11). Zaradi samozbiranja deluje vzorec kot leča, njena goriščna razdalja pa je odvisna od intenzitete snopa in od nelinearnega lomnega količnika. Ko vzorec premikamo vzdolž snopa, se skupna efektivna goriščna razdalja leče in nelinearne snovi spreminja in žarek na detektorju je enkrat bolj zbran, drugič manj. Za lege vzorca desno od prvotnega gorišča ( $z > 0$ ), je skupna goriščna razdalja daljša od goriščne razdalje leče, snop je bolj zbran (pikčasta črta) in signal na detektorju ( $D$ ) naraste. Za lege vzorca levo od prvotnega gorišča ( $z < 0$ ) je ravno obratno, snop se razširi (črtkana črta) in signal na detektorju se zmanjša. Za snovi z negativnim nelinearnim lomnim količnikom je odziv ravno nasprotnega predznaka. Pri določanju nelinearnega lomnega količnika je ključno, da smo uporabili zaslonko ( $Z$ ), s katero smo omejili velikost vpadnega snopa. Če zaslonko odstranimo in merimo odvisnost celotne vpadne intenzitete od lege vzorca, nelinearnega lomnega količnika ne moremo meriti, lahko pa določimo nelinearni absorpcijski koeficient.



Slika 8.11: Shema metode vzdolžnega premika

Zaradi uklona se Gaussov snop navadno širi, pojav samozbiranja pa ima nasprotni učinek. Zato je pri določeni moči snopa možno doseči, da se oba pojava po velikosti ravno izenačita in snop ima v snovi konstanten polmer, valovne fronte pa so ravne. Snop na ta način samemu sebi ustvarja valovni vodnik, kjer je v sredi lomni količnik večji kot na robu, in nastane t. i. krajevni soliton.

Ocenimo, kolikšna mora biti vpadna moč svetlobe, da pride do pojava krajevnih solitonov. Vzemimo, da je na izbranem mestu valovna fronta ravna. Lahko si mislimo, da je tam grlo Gaussovega snopa. Brez samozbiranja bi bil na razdalji dolžine grla  $z_0$  krivinski radij valovne fronte (enačba 3.23)

$$R(z_0) = z_0 \left( 1 + \left( \frac{z_0}{z_0} \right)^2 \right) = 2z_0. \quad (8.91)$$

V bližini osi lahko Gaussovo funkcijo, ki opisuje prečno odvisnost amplitude polja v snopu, razvijemo po prečni koordinati  $r$  do drugega reda. Po enačbi (8.88) je odvisnost lomnega količnika približno

$$n(r) = \tilde{n} + n_2 j_0 e^{-2r^2/w_0^2} \approx \tilde{n} + n_2 j_0 \left( 1 - 2 \frac{r^2}{w_0^2} \right). \quad (8.92)$$

Razlika med lomnim količnikom na osi in pri  $w_0$  od osi je  $\Delta n = 2j_0 n_2$ . Zaradi tega je razlika optičnih poti za žarek na osi in za  $w_0$  od osi  $\Delta n z_0 = 2n_2 j_0 z_0$ . Valovna fronta bi se na razdalji  $z_0$  torej ukrivila na nek krivinski radij  $-R$ . Iz preproste geometrije velja zveza

$$\Delta n z_0 = R - R \sqrt{1 - \frac{w_0^2}{R^2}} \approx \frac{w_0^2}{2R} \quad (8.93)$$

Da valovna fronta ostale ravna, morata biti krivinska radija v enačbah (8.91) in (8.93) enaka. Od tod sledi

$$\Delta n = \frac{w_0^2}{4z_0^2}. \quad (8.94)$$

Moč snopa s stacionarnim polmerom je potem

$$P_s = \frac{1}{2}\pi w_0^2 j_0 = \frac{1}{2}\pi w_0^2 \frac{\Delta n}{2n_2} = \frac{1}{2}\pi w_0^2 \frac{w_0^2}{4z_0^2} \frac{1}{2n_2} = \frac{\lambda^2}{16\pi n_2}, \quad (8.95)$$

pri čemer smo upoštevali zvezo med  $z_0$  in  $w_0$  (enačba 3.20).

Zanimivo je, da kritična moč, pri kateri se pojavijo soliton, ni odvisna od začetnega polmera snopa. Pri moči, ki je manjša od kritične, se vpadli Gaussov snop širi, čeprav nekoliko počasneje kot v sredstvu s konstantnim lomnim količnikom, če pa je moč znatno večja od kritične moči, pa lahko pride do katastrofičnega samozbiranja in porušitve snovi.

**Naloge 8.10.2** Nariši skico k enačbi (8.93) in izpelji izraz za moč, pri kateri pride do pojava solitonov (enačba 8.95).

Izračunaj še kritično moč za pojav solitonov v  $\text{CS}_2$ , če je valovna dolžina vpadnega valovanja  $1 \mu\text{m}$ , nelinearni lomni količnik te tekočine pa je  $n_2 = 3,2 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2/\text{W}$ .

## 8.11 \*Izpeljava krajevnih solitonov

Za podrobnejšo obravnavo krajevnih solitonov moramo rešiti valovno enačbo v obosnem približku. Začnimo s krajevnim delom valovne enačbe za monokromatsko valovanje v skalarni obliku (enačba 1.23)

$$\nabla^2 E + n^2 \frac{\omega^2}{c_0^2} E = 0 \quad (8.96)$$

Polje zapišimo v obliku počasi spreminjačoče se amplitudo in faznega faktorja, podobno kot smo to naredili pri izpeljavi Gaussovega snopa (enačba 3.4)

$$E = \psi(\mathbf{r}, z) e^{ik_0 z} \quad (8.97)$$

kjer je  $k_0 = \tilde{n}\omega/c_0$  valovno število brez upoštevanja nelinearnosti. Funkcija  $\psi(\mathbf{r}, z)$  naj se v smeri osi  $z$  le počasi spreminja, tako da lahko drugi odvod po  $z$  zanemarimo in dobimo

$$\nabla_{\perp}^2 \psi + \frac{\omega^2}{c_0^2} (n^2 - \tilde{n}^2) \psi + 2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0. \quad (8.98)$$

Upoštevajmo odvisnost lomnega količnika od intenzitete, pri čemer zanemarimo člen z  $n_2^2$ , ker je gotovo majhen, in dobimo

$$\nabla_{\perp}^2 \psi + 2k_0^2 \frac{n_2}{\tilde{n}} j \psi + 2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0. \quad (8.99)$$

Izrazimo še gostoto svetlobnega toka z amplitudo električne poljske jakosti

$$\nabla_{\perp}^2 \psi + k_0^2 n_2 \epsilon_0 c_0 |\psi|^2 \psi + 2ik_0 \frac{\partial \psi}{\partial z} = 0. \quad (8.100)$$

Preden se lotimo reševanja gornje enačbe, vpeljimo še

$$\kappa = k_0^2 n_2 \epsilon_0 c_0 \quad (8.101)$$

in novo spremenljivko vzdolž osi  $z$

$$\zeta = \frac{z}{2k_0}. \quad (8.102)$$

S tem preide enačba (8.100) v standardno obliko nelinearne Schrödingerjeve enačbe, le da namesto odvoda po času tukaj nastopa odvod po koordinati  $\zeta$ . Sledi

$$i \frac{\partial \psi}{\partial \zeta} + \nabla_{\perp}^2 \psi + \kappa |\psi|^2 \psi = 0. \quad (8.103)$$

V treh dimenzijah je reševanje enačbe (8.103) težavno in analitične rešitve niso znane. V dveh dimenzijah pa stacionarno rešitev znamo poiskati. Stacionarni rešitvi se vzdolž  $\zeta$  lahko spreminja le faza, zato rešitev iščemo v obliki

$$\psi = e^{i\eta^2 \zeta} u(x), \quad (8.104)$$

kjer je  $\eta$  konstanta, katere pomen bomo videli v nadaljevanju, funkcija  $u(x)$  pa naj bo realna. Uporabimo gornji nastavek v enačbi (8.103) in dobimo

$$\frac{d^2 u}{dx^2} = \eta^2 u - \kappa u^3. \quad (8.105)$$

Z množenjem obeh strani z  $u'$  lahko enačbo enkrat integriramo

$$\left( \frac{du}{dx} \right)^2 = \eta^2 u^2 - \frac{1}{2} \kappa u^4. \quad (8.106)$$

Ločimo spremenljivki in zapišemo

$$\int_{\eta\sqrt{2/\kappa}}^u \frac{du}{\sqrt{\eta^2 u^2 - \frac{1}{2} \kappa u^4}} = x - x_0, \quad (8.107)$$

pri čemer smo uvedli integracijsko konstanto  $x_0$  in integracijsko mejo postavili tako, da so vrednosti pod korenom pozitivne. Integral brez težav izračunamo

$$\frac{1}{\eta} \ln \left( \sqrt{\frac{\kappa}{2}} \frac{u}{\eta + \sqrt{\eta^2 - \kappa u^2 / 2}} \right) = x - x_0 \quad (8.108)$$

in izrazimo iskano funkcijo  $u(x)$

$$u = \sqrt{\frac{2}{\kappa}} \frac{2\eta}{e^{\eta(x-x_0)} + e^{-\eta(x-x_0)}} = \sqrt{\frac{2}{\kappa}} \frac{\eta}{\cosh \eta(x-x_0)}. \quad (8.109)$$

Po enačbi (8.104) je rešitev

$$\psi(x, z) = \sqrt{\frac{2}{\kappa}} \eta \frac{e^{i\eta^2 \zeta}}{\cosh \eta(x-x_0)}. \quad (8.110)$$

Vidimo, da predstavlja spremenljivka  $1/\eta$  neko karakteristično širino snopa,  $x_0$  pa je le njegov prečni premik, ki ga lahko brez škode postavimo na  $x_0 = 0$ . Tako lahko zapišemo celotno polje stacionarnega snopa

$$E_s(x, z) = \sqrt{\frac{2}{\kappa}} \frac{\eta}{\cosh(\eta x)} \exp\left(ik_0 z \left(1 + \frac{\eta^2}{2k_0^2}\right)\right). \quad (8.111)$$

Intenziteta svetlobe je sorazmerna kvadratu amplitude polja, zato

$$j_s(x, z) = j_0 \frac{1}{\cosh^2(\eta x)}. \quad (8.112)$$



Slika 8.12: Prečni profil krajevnega solitona v 2D. Vzdolž koordinate  $z$  se profil ohranja.

Če se vrnemo k izrazu za električno poljsko jakost (enačba 8.111), vidimo, da je parameter  $\eta$  nastopa tudi v faznem faktorju. To pomeni, da je od njega odvisna tudi konstanta širjenja in s tem fazna hitrost

$$\nu_f = \frac{\omega}{k} = \frac{c}{\tilde{n} \left(1 + \frac{\eta^2}{2k_0^2}\right)}. \quad (8.113)$$

Fazna hitrost omejenih snopov oziroma solitonov je torej vedno manjša od fazne hitrosti ravnih valov. Bolj ko je snop omejen, manjša je fazna hitrost, za velike polmere snopa pa doseže limitno vrednost  $c_0/\tilde{n}$ .

Moč dvodimenzionalnega snopa je enaka integralu gostote svetlobnega toka (enačba 8.112) po  $x$ . Integriramo in zapišemo

$$P_S = \int j_s dx \propto \int |E_s|^2 dx = \frac{2}{\kappa} \eta^2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{\cosh^2 \eta x} = \frac{4\eta}{\kappa}. \quad (8.114)$$

Moč stacionarnega snopa – solitona – v dveh dimenzijah je torej obratno sorazmerna s širino snopa  $1/\eta$ . Zato tudi pri poljubno veliki moči obstaja stacionarna širina. To je bistvena razlika med obravnavanim dvo- in tridimenzionalnim primerom, kjer se snop z nadkritično močjo skrči v singularnost.

## 8.12 Optični solitoni

V prejšnjem razdelku smo ugotovili, da pojav samozbiranja svetlobnega snopa lahko izniči širjenje zaradi uklona, tako da ima pri ustreznih močih snop povsod konstantno širino in obliko. Takim snopom smo rekli krajevni solitoni. Povsem podoben pojav poznamo tudi v časovni domeni, kjer se pojavijo časovni ali optični solitoni.

Sunek svetlobe naj se širi po valovnem vodniku. Ker je lomni količnik odvisen od frekvence valovanja, se sunek svetlobe podaljšuje. Več o tem bomo spoznali pri obravnavi disperzije v optičnih vlaknih (poglavlje 10.6). Ob primernih pogojih lahko odvisnost lomnega količnika od intenzitete ravno izniči odvisnost lomnega količnika od valovne dolžine in sunek ohranja obliko. Sunkom svetlobe, ki potujejo po sredstvu brez spremembe oblike, pravimo optični soliton. Posebej so pomembni v optičnih vlaknih, kjer je disperzija izrazita in želimo njen vpliv zaradi učinkovitosti prenosa informacije čim bolj zmanjšati.

Pojava optičnih solitonov ni težko pojasniti. Naj na optično nelinearno sredstvo vpade sunek svetlobe, ki je Gaussove oblike (slika 8.13)

$$j(t) = j_0 e^{-t^2/\tau^2}. \quad (8.115)$$

Faza takega sunka je

$$\phi(t) = k_o nz - \omega_0 t = k_0(\tilde{n} + n_2 j)z - \omega_0 t = \phi_0 + k_0 n_2 z j - \omega_0 t, \quad (8.116)$$

frekvenca pa

$$\omega = -\frac{d\phi}{dt} = \omega_0 - k_0 n_2 z \frac{dj}{dt}. \quad (8.117)$$

Če vstavimo časovno obliko sunka svetlobe (enačba 8.115), vidimo, da se frekvenca takega sunka spreminja s časom

$$\omega = \omega_0 + \frac{2k_0 n_2 z j_0}{\tau^2} t e^{-t^2/\tau^2}. \quad (8.118)$$

Začetnemu delu sunka (pri  $t < 0$ ) se torej frekvenca zmanjša, zadnjemu delu sunka (pri  $t > 0$ ) pa se mu poveča (slika 8.13). Ta pojav spremenjanja frekvence znotraj kratkega sunka imenujemo čričkanje sunkov (*chirping*), po podobnosti z oglašanjem čričkov.



Slika 8.13: Zaradi nelinearnega lomnega količnika pride do frekvenčnega premika v sunku svetlobe.

Pri prehodu optičnega sunka z osnovno frekvenco  $\omega_0$  se torej različnim delom sunka frekvenca različno spremeni (slika 8.14 a), začetnemu delu se zmanjša, zadnjemu pa poveča. Po drugi strani pa v snoveh poznamo barvno disperzijo, kar pomeni, da veljajo za valovanja z različnimi frekvencami različni lomni količniki. Pojav disperzije je še bolj zapleten pri potovanju sunkov svetlobe, kar bomo podrobnejše obravnavali pri optičnih vlaknih (poglavlje 10.6). Zaenkrat povejmo le, da je pomemben parameter disperzija grupne hitrosti, ki je sorazmerna z drugim odvodom lomnega količnika po valovni dolžini

$$D = -\frac{\lambda}{c_0} \frac{d^2 n}{d\lambda^2}. \quad (8.119)$$

Pri določenih pogojih (izbrana snov in določeno frekvenčno območje) lahko dosežemo, da potuje del valovanja z večjo valovno dolžino hitreje kot del valovanja z manjšo valovno dolžino (slika 8.14 b). V tem primeru zadnji del sunka dohitava sprednjega in učinek disperzije ravno izniči učinek nelinearnosti. Nastane signal, ki ohranja svojo obliko – soliton.



Slika 8.14: Čričanje sunkov svetlobe zaradi nelinearnega pojava. Z ustrezno disperzijo lahko čričanje izničimo in nastane sunek svetlobe, ki oblike ne spreminja – soliton.

### 8.13 \*Izpeljava optičnih solitonov

Za matematični opis optičnih solitonov izhajamo iz nelinearne valovne enačbe (enačba 8.11), ki jo zapišemo v skalarni obliki

$$\nabla^2 E - \frac{n^2}{c_0^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 P_{NL}}{\partial t^2}, \quad (8.120)$$

pri čemer je  $P_{NL}$  nelinearna polarizacija tretjega reda (enačba 8.6). Namesto v časovni domeni je enačbo prikladnejše reševati v frekvenčni domeni, zato namesto  $E$  in  $P_{NL}$  vpeljemo Fourierovi transformiranki  $\tilde{E}$  in  $\tilde{P}$ . Sledi

$$\nabla^2 \tilde{E} + \frac{n^2}{c_0^2} \omega^2 \tilde{E} = -\mu_0 \omega^2 \tilde{P}. \quad (8.121)$$

Gornjo enačbo rešujemo z nastavkoma

$$\tilde{E} = \tilde{A}(z, \omega - \omega_0) e^{ik_0 z} \quad \text{in} \quad \tilde{P} = \tilde{B}(z, \omega - \omega_0) e^{ik_0 z}, \quad (8.122)$$

pri čemer je  $\omega_0$  osrednja frekvenca svetlobnega sunka in  $k_0 = \omega_0 n / c_0$ . Vpeljemo še  $\Omega = \omega - \omega_0$

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + k^2 \right) \tilde{A}(z, \Omega) e^{ik_0 z} = -\mu_0 \omega^2 \tilde{B}(z, \Omega) e^{ik_0 z}. \quad (8.123)$$

Da lahko rešimo to enačbo, naredimo nekaj približkov. Ker je  $\omega \approx \omega_0$ , na desni strani enačbe nadomestimo frekvenco z osrednjo frekvenco. Poleg tega upoštevamo, da se amplituda glede na valovno dolžino le počasi spreminja, zato drugi odvod zanemarimo in

$$2ik_0 \frac{\partial \tilde{A}}{\partial z} + (k^2 - k_0^2) \tilde{A} = -\mu_0 \omega_0^2 \tilde{B}. \quad (8.124)$$

Če je disperzija šibka, lahko zapišemo  $k^2 - k_0^2$  kot razliko kvadratov,  $k(\omega_0 + \Omega)$  pa razvijemo v Taylorjevo vrsto okoli osrednje frekvence  $\omega_0$  do tretjega člena. Sledi

$$k^2 - k_0^2 \approx 2k_0(k - k_0) \approx 2k_0(k' \Omega + \frac{1}{2}k'' \Omega^2), \quad (8.125)$$

pri čemer ' označuje odvod po frekvenci, in prepišemo enačbo v

$$2ik_0 \frac{\partial \tilde{A}}{\partial z} + 2k_0(k' \Omega + \frac{1}{2}k'' \Omega^2) \tilde{A} = -\mu_0 \omega_0^2 \tilde{B}. \quad (8.126)$$

Vrnimo se v časovno domeno, tako da naredimo inverzno Fourierovo transformacijo. Naj bo  $A(z, t)$  kompleksna amplituda električne poljske jakosti in inverzna transformiranka funkcije  $\tilde{A}(z, \Omega)$ , funkcija  $B(z, t)$  pa naj bo amplituda polarizacije in inverzna transformiranka funkcije  $\tilde{B}(z, \Omega)$ . Sledi

$$i\left(\frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t}\right) A - \frac{1}{2} \frac{d^2 k}{d \omega^2} \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = -\frac{\mu_0 \omega_0^2}{2k_0} B, \quad (8.127)$$

pri čemer smo z  $v_g = d\omega/dk = 1/k'$  označili grupno hitrost. Vpeljimo novo spremenljivko

$$\tau = t - \frac{z}{v_g}, \quad (8.128)$$

s katero opišemo obliko sunka  $A_S(z, \tau)$ , kot ga vidi opazovalec, ki se giblje z grupno hitrostjo skupaj s sunkom. Uporabimo pravilo verižnega odvajanja in dobimo

$$\frac{\partial A}{\partial z} = \frac{\partial A_S}{\partial z} + \frac{\partial A_S}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial z} = \frac{\partial A_S}{\partial z} - \frac{1}{v_g} \frac{\partial A_S}{\partial \tau}. \quad (8.129)$$

Podobno naredimo še za odvod po času  $\tau$ , ki pa se ne razlikuje od odvoda po času  $t$

$$\frac{\partial A}{\partial t} = \frac{\partial A_S}{\partial z} \frac{\partial z}{\partial \tau} + \frac{\partial A_S}{\partial \tau} \frac{\partial \tau}{\partial t} = \frac{\partial A_S}{\partial \tau} \quad \text{in} \quad \frac{\partial^2 A}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 A_S}{\partial \tau^2}. \quad (8.130)$$

Vstavimo še amplitudo nelinearne polarizacije (enačba 8.84)

$$B = \frac{3}{4} \epsilon_0 \chi |A|^2 A. \quad (8.131)$$

in enačba (8.127) dobi obliko

$$i \frac{\partial A_S}{\partial z} - \frac{1}{2} \frac{d^2 k}{d\omega^2} \frac{\partial^2 A_S}{\partial \tau^2} + \kappa |A_S|^2 A_S = 0, \quad (8.132)$$

pri čemer je

$$\kappa = \frac{3\omega_0\chi}{8c_0\tilde{n}} \quad (8.133)$$

sorazmeren nelinearnemu lomnemu količniku  $n_2$  (enačba 8.89). Enačba (8.132) ni nič drugega kot nelinearna Schrödingerjeva enačba, ki smo jo zapisali že pri izpeljavi krajevnih solitonov (enačba 8.103). Enačbi se razlikujeta v tem, da ima vlogo prečne koordinate  $x$  tukaj čas  $\tau$  in rešitve nimajo več konstantnega premera, ampak imajo konstantno dolžino sunka. Stacionarne rešitve obstajajo le v primeru, kadar je  $d^2 k/d\omega^2 < 0$  oziroma kadar ima drugi odvod nasprotni predznak od nelinearnega lomnega količnika  $n_2$ . Kot pri krajevnih solitonih tudi tukaj vpeljemo parameter  $\eta$ , ki je sorazmeren z energijo solitona (enačba 8.114). Sledi

$$A_S(z, \tau) = \sqrt{\frac{2}{\kappa}} \eta \frac{e^{i\eta^2 z}}{\cosh \left( \eta \tau \sqrt{2 \left| \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \right|^{-1}} \right)} \quad (8.134)$$

$$A(z, t) = \sqrt{\frac{2}{\kappa}} \eta \frac{e^{i\eta^2 z}}{\cosh \left( \eta \left( t - \frac{z}{v_g} \right) \sqrt{2 \left| \frac{d^2 \beta}{d\omega^2} \right|^{-1}} \right)}. \quad (8.135)$$

Zapisana je oblika solitona, ki potuje z grupno hitrostjo in pri tem ohranja obliko. Zaradi tega so solitoni izredno zanimivi za prenos velike gostote informacij na velike razdalje, saj se izognemo omejitvam zaradi disperzije.

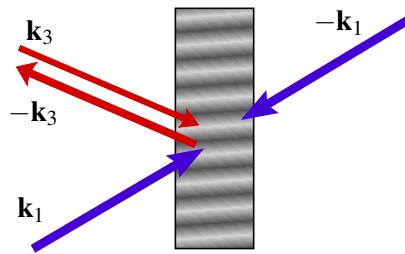


Ena izmed snovi, ki izpoljuje pogoj, da je  $k''$  nasprotnega predznaka kot  $n_2$ , so kvarčna optična vlakna. Pri valovnih dolžinah vidne svetlobe to sicer ne velja, velja pa za  $\lambda \gtrsim 1,3 \mu\text{m}$ . Pogoj je torej izpolnjen pri valovnih dolžinah okoli  $1,5 \mu\text{m}$ , ki se navadno uporablja pri prenosu signalov po optičnih vlaknih in signal lahko potuje brez podaljševanja.

## 8.14 Optična fazna konjugacija

Optična fazna konjugacija je zanimiv in danes tudi praktično pomemben pojav, pri katerem nastane iz danega valovanja novo valovanje, ki ima enake valovne fronte, vendar potuje v nasprotni smeri od prvotnega valovanja. Novo valovanje je torej tako, kot bi začetnemu valovanju obrnili predznak časa in ga "zavrteli nazaj".

Vzemimo optično nelinearno snov, na katero posvetimo z dvema močnima ravnima snopoma v nasprotnih smereh. To sta črpalna snopa in njuna valovna vektorja naj bosta  $\mathbf{k}_1$  in  $\mathbf{k}_2 = -\mathbf{k}_1$ . Poleg njiju naj na snov vpada še tretji, signalni snop, ki ni nujno raven val (slika 8.15). Signalni snop interferira s prvim črpalnim valom in s tem zaradi nelinearnosti tretjega reda povzroči modulacijo lomnega količnika, ki je skoraj periodična, če je signalni val podoben ravnemu valu. Na tej periodični modulaciji se drugo črpalno valovanje uklanja, pri čemer je uklonjeno valovanje enake oblike kot signalno, le potuje v nasprotni smeri, ker ima drugo črpalno valovanje nasprotno smer od prvega. Črpalni valovanji sta seveda enakovredni in ni mogoče ločiti, s katerim je signalno valovanje interferiralo in katero se uklanja.



Slika 8.15: Optična fazna konjugacija. Dva močna črpalna žarka (modra) vpadata na optično nelinearno snov v nasprotnih smereh, vpadni signal (rdeč) pa se odbije v smer, iz katere vpada.

 Pozoren bralec je ugotovil, da je optična fazna konjugacija zelo podobna holografiji, le da pri holografiji najprej zapišemo predmetni snop, ki ga kasneje reproduciramo, pri fazni konjugaciji pa zapis začetnega valovanja in njegova reprodukcija potekata sočasno.

Naj se signalno valovanje razširja v smeri  $z$ . Potem ga zapišemo kot

$$E_3 = \operatorname{Re} \left( A_3(z) e^{i(kz-\omega t)} \right). \quad (8.136)$$

V nadaljevanju bomo pokazali, da je novonastalo valovanje sorazmerno

$$E_4 \propto \operatorname{Re} \left( A_3^*(z) e^{i(-kz-\omega t)} \right). \quad (8.137)$$

Zaradi nasprotnega predznaka  $k$  potuje nastalo valovanje v obratni smeri od signalnega valovanja. Poleg tega je kompleksno konjugirana tudi njegova amplituda. To seveda ne vpliva na obliko valovnih front, saj so te popolnoma enake kot pri signalnem valovanju. Zaradi lastnosti, da lahko novo valovanje iz signalnega nastane tako, da krajevni del kompleksno konjugiramo, nastalemu valovanju pravimo fazno konjugirano valovanje.



Slika 8.16: Primerjava odbojev na navadnem zrcalu (levo) in faznem konjugatorju (desno): odboj ravnega vala (a), odboj krogelnega valovanja (b) in odboj popačenega vala (c).

Uporabna posledica fazne konjugacije je prikazana na sliki (8.16). Najpreprostejši primer je vpad ravnega vala (a), ki se ne odbije po lomnem zakonu (slika levo), ampak se odbije v smer, iz katere je vpadel na snov (desno). Drugi primer je krogelni val ali v približku tudi Gaussov snop (b). Ko vpade na navadno zrcalo (levo), se njegova divergenca ohranja in se žarek še naprej razširja. Na fazno konjugiranem zrcalu se kroglast val spet zbere v izvoru (desno). Tretji primer je poljubno sredstvo, ki valovanju doda naključno fazo, zato po prehodu valovne fronte niso več gladke (c). Ta popačen snop v faznem konjugatorju generira fazno konjugiran snop, ki potuje v nasprotni smeri in ima enako nepravilne valovne fronte kot vpadni val. Po prehodu skozi nepravilno sredstvo se neravnosti valovne fronte izničijo in nastanejo enake gladke valovne fronte ravnega vala, kot smo jih imeli na začetku. To lastnost popravljanja valovne fronte je mogoče koristni uporabiti, na primer namesto enega zrcala v laserskem resonatorju.

### 8.15 \*Izpeljava optične fazne konjugacije

Poglejmo podrobneje, kako v nelinearnem sredstvu nastane fazno konjugiran val. Kot kaže slika (8.15), je celotno polje v nelinearnem sredstvu vsota štirih valovanj, dveh močnih črpalnih, signalnega in odbitega

$$E = \frac{1}{2}A_1 e^{i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - i\omega t} + \frac{1}{2}A_2 e^{-i\mathbf{k}_1 \cdot \mathbf{r} - i\omega t} + \frac{1}{2}A_3(z) e^{ikz - i\omega t} + \frac{1}{2}A_4(z) e^{-ikz - i\omega t} + \text{k.k.} \quad (8.138)$$

S k.k. smo spet označili kompleksno konjugirane člene. Vsa valovanja naj imajo enako frekvenco, zaradi enostavnosti še privzemimo, da so enake tudi vse polarizacije. Račun poenostavimo še s privzetkom, da sta črpalna vala  $E_1$  in  $E_2$  dosti močnejša od  $E_3$  in  $E_4$ , tako da sta njuni amplitudi konstantni,  $A_3(z)$  in  $A_4(z)$  pa se le počasi spremojata.

Vstavimo  $E$  v valovno enačbo z nelinearno polarizacijo (enačba 8.11), pri čemer smo časovni odvod že izvrednotili

$$\nabla^2 E + \epsilon \frac{\omega^2}{c_0^2} E = \mu_0 \frac{\partial^2 P_{NL}}{\partial t^2}. \quad (8.139)$$

Pri tem je  $\epsilon \omega^2 / c_0^2 = k^2$ ,  $P_{NL}$  pa je po enačbi (8.78) enak  $P_{NL} = \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3$ , kjer je  $\chi^{(3)} = \chi$  efektivna nelinearna susceptibilnost za izbrano polarizacijo vseh polj.

Ker je  $E$  zapisan kot vsota osmih različnih členov (enačba 8.138), vsebuje produkt  $E^3$  kar 512 členov. Vendar se njihovo število znatno zmanjša, če upoštevamo le tiste z enako časovno odvisnostjo oziroma enako frekvenco. Poleg tega nas ne zanimajo različne kombinacije valovnih vektorjev, ampak k enačbi za  $E_3$  prispevajo le tisti členi s krajevnim faznim faktorjem  $\exp(ikz)$ , k enačbi za  $E_4$  pa tisti z  $\exp(-ikz)$ . Sledi

$$\begin{aligned} P_{NL3,4} &= \frac{1}{8} \epsilon_0 \chi (6A_1 A_2 A_4^* + 6A_1 A_1^* A_3 + 6A_2 A_2^* A_3 + 3A_3 A_3^* A_3 + 6A_4 A_4^* A_3^*) e^{ikz - i\omega t} \\ &+ (6A_1 A_2 A_3^* + 6A_1 A_1^* A_4 + 6A_2 A_2^* A_4 + 6A_3 A_3^* A_4 + 3A_4 A_4 A_4^*) e^{-ikz - i\omega t}. \end{aligned} \quad (8.140)$$

Če zanemarimo še člene, v katerih nastopata  $A_3$  in  $A_4$  v višjih potencah, dobimo

$$\begin{aligned} P_{NL3,4} &= \frac{3}{4} \epsilon_0 \chi (A_1 A_2 A_4^* + |A_1|^2 A_3 + |A_2|^2 A_3) e^{ikz - i\omega t} \\ &+ (A_1 A_2 A_3^* + |A_1|^2 A_4 + |A_2|^2 A_4) e^{-ikz - i\omega t}. \end{aligned} \quad (8.141)$$

Vstavimo gornji izraz v valovno enačbo (enačba 8.139) in upoštevamo, da se  $A_i(z)$  le počasi spreminja (kar pomeni, da zanemarimo drugi odvod po  $z$ ). Dobimo enačbi

$$ik \frac{dA_3}{dz} = -\frac{3}{4} \mu_0 \epsilon_0 \chi \omega^2 (A_1 A_2 A_4^* + (|A_1|^2 + |A_2|^2) A_3) \quad (8.142)$$

in

$$-ik \frac{dA_4}{dz} = -\frac{3}{4} \mu_0 \epsilon_0 \chi \omega^2 (A_1 A_2 A_3^* + (|A_1|^2 + |A_2|^2) A_4). \quad (8.143)$$

Drugi člen na desni že poznamo: opisuje odvisnost lomnega količnika od intenzitete črpalnih valov, torej optični Kerrov pojav, in je zato le dodaten prispevek k fazi. Vpeljimo novi amplitudi, ki se od prejšnjih razlikujeta zgolj v faznem faktorju.

$$\tilde{A}_3 = A_3 \exp \left( -i \frac{3\chi\omega}{4c_0n} (|A_1|^2 + |A_2|^2) z \right) \quad (8.144)$$

in

$$\tilde{A}_4 = A_4 \exp \left( i \frac{3\chi\omega}{4c_0n} (|A_1|^2 + |A_2|^2) z \right). \quad (8.145)$$

Ko novi amplitudi vstavimo v diferencialni enačbi (enačbi 8.142 in 8.143), se Kerrov prispevek k fazi ravno odšteje in

$$\frac{d\tilde{A}_3}{dz} = i \frac{3\chi\omega}{4c_0n} A_1 A_2 \tilde{A}_4^* \quad (8.146)$$

in

$$\frac{d\tilde{A}_4}{dz} = -i \frac{3\chi\omega}{4c_0n} A_1 A_2 \tilde{A}_3^*. \quad (8.147)$$

Z vpeljavo sklopljene konstante

$$\kappa = \frac{3\chi\omega}{4c_0n} A_1 A_2 \quad (8.148)$$

se enačbi poenostavita v

$$\frac{d\tilde{A}_3}{dz} = i\kappa \tilde{A}_4^* \quad \text{ozioroma} \quad \frac{d\tilde{A}_4^*}{dz} = -i\kappa^* \tilde{A}_4 \quad (8.149)$$

in

$$\frac{d\tilde{A}_4}{dz} = -i\kappa \tilde{A}_3^*. \quad (8.150)$$

Tako smo zelo težaven problem nelinearne valovne enačbe prevedli na linearen sistem dveh preprostih sklopljenih enačb za amplitudi signalnega in odbitega vala. Splošni rešitvi sistema enačb (8.149) in (8.150) sta

$$\tilde{A}_3^*(z) = C_1 \cos(|\kappa|z) + C_2 \sin(|\kappa|z) \quad (8.151)$$

$$\tilde{A}_4(z) = D_1 \cos(|\kappa|z) + D_2 \sin(|\kappa|z). \quad (8.152)$$

Z upoštevanjem zveze, ki izhaja neposredno iz diferencialne enačbe (enačba 8.149), zapišemo

$$C_1 = \frac{i\kappa^*}{|\kappa|} D_2 \quad \text{in} \quad C_2 = -\frac{i\kappa^*}{|\kappa|} D_1. \quad (8.153)$$

Potrebujemo še robne pogoje za obe valovanji. Z leve, pri  $z = 0$ , poznamo  $\tilde{A}_3^*(0)$ , pri  $z = L$  pa ne more biti odbitega vala in je zato  $\tilde{A}_4(L) = 0$ . S tem lahko določimo konstanti  $D_1$  in  $D_2$

$$D_2 = -\frac{i|\kappa|}{\kappa^*} \tilde{A}_3^*(0) \quad \text{in} \quad D_1 = -D_2 \tan(|\kappa|L). \quad (8.154)$$

Gornje enačbe združimo in lahko zapišemo amplitudi znotraj nelinearne snovi

$$\begin{aligned}\tilde{A}_3(z) &= \tilde{A}_3(0) \frac{\cos(|\kappa|(L-z))}{\cos(|\kappa|L)} \\ \tilde{A}_4(z) &= \tilde{A}_3^*(0) \frac{i\kappa}{|\kappa|} \frac{\sin(|\kappa|(L-z))}{\cos(|\kappa|L)}\end{aligned}\quad (8.155)$$

Izračunajmo še amplitudi odbitega in prepuščenega vala. Amplituda odbitega vala pri  $z = 0$  je

$$\tilde{A}_4(0) = \tilde{A}_3^*(0) \frac{i\kappa}{|\kappa|} \tan(|\kappa|L), \quad (8.156)$$

amplituda prepuščenega pri  $z = L$  pa

$$\tilde{A}_3(L) = \frac{\tilde{A}_3^*(0)}{\cos(|\kappa|L)}. \quad (8.157)$$

Oglejmo si gornja rezultata podrobnejše. Vidimo, da je odbiti val sorazmeren kompleksno konjugirani amplitudi vpadnega vala, kar smo omenili že v prejšnjem razdelku. Poleg konjugirane amplitudo ima tudi natanko nasproten valovni vektor, zato tudi ime fazno konjugiran val. Zanimiva je tudi njegova velikost. Ker je lahko  $\tan(|\kappa|L) > 1$ , je odbit val lahko močnejši od vpadnega. To ojačanje odbitega vala gre seveda na račun moči črpalnih valov. V našem računu bi lahko amplituda odbite svetlobe narasla proti neskončnosti, vendar ne smemo pozabiti, da zapisane enačbe takrat niso več veljavne, ker smo privzeli, da sta signalni in odbiti žarek precej šibkejša od črpalnih.

Poglejmo še prepuščeni žarek. Ker je  $\cos(x) \leq 1$ , je amplituda prepuščenega žarka vedno večja od amplitude vpadnega. To pomeni, da smo na račun črpalnih žarkov dobili prepustnost, ki je vedno večja od 100 %, in odbojnost, ki je lahko večja od 100 %.

Doslej smo predpostavili, da je vpadni signal ravni val. Če je njegova amplituda odvisna še od prečne koordinate, ga lahko razvijemo po ravnih valovih in zgoraj izpeljana enačba (8.156) velja za vsako komponento posebej. Odbite komponente so sorazmerne s konjugiranimi komponentami signalnega valovanja z nasprotnim valovnim vektorjem in dajo skupaj valovno fronto enake oblike kot pri signalnem valovanju, le giblje se v nasprotni smeri, kot smo opisali že na začetku razdelka.



Omenili smo že, da se fazno konjugirana zrcala lahko uporabljo v laserjih, da izničimo popačenje Gaussovega snopa. Drug primer uporabe je pri optični astronomiji ali optičnih komunikacijah skozi atmosfero. Naključne spremembe gostote v atmosferi signalu dodajo naključni fazni premik, ki signal popači. Če se signal odbije od zrcala nazaj proti izvoru, bo torej dvakratno popačen. Če pa se odbije od fazno konjugiranega zrcala, se bo vpliv nehomogenosti atmosfere ravno izničil in na prenos signala ne bo vplival, poleg tega pa bo šibek signal še dodatno ojačan.



## 9. Modulacija svetlobe



V optičnih napravah pogosto želimo spremenjati lastnosti svetlobnega valovanja. Tak primer smo že spoznali pri obravnavi laserja, kjer za preklop dobrote potrebujemo element, ki hitro spreminja prepustnost. Še pomembnejša je modulacija valovanja pri optičnem prenosu informacij.

Svetlobno valovanje lahko moduliramo na več načinov. Z ustreznim moduliranjem lomnega količnika lahko valovanju spremiščamo amplitudo ali frekvenco oziroma fazo .



Slika 9.1: Amplitudno (levo) in fazno oziroma frekvenčno moduliran signal (desno)

Delovanje optičnih modulatorjev temelji na različnih pojavih. V tem poglavju bomo podrobneje spoznali dva načina, to sta elektro-optični in elasto- oziroma akusto-optični pojav. Pri prvem pride do spremembe lomnega količnika snovi pod vplivom zunanjega električnega polja, pri drugem pa zaradi mehanske deformacije. Kadar mehansko deformacijo povzroči zvočno valovanje, takim modulatorjem pravimo akusto-optični. Na koncu bomo spoznali poseben zelo pomemben primer elektro-optičnih modulatorjev na osnovi tekočih kristalov.

### 9.1 Elektro-optični pojav

Elektro-optični pojav opisuje spremembe optičnih lastnosti snovi (dielektričnosti in lomnega količnika) pod vplivom zunanjega električnega polja. Omejimo se na statično zunanje polje oziroma na polje, katerega frekvenca je bistveno manjša od optične frekvence. Omejitev na nizko frekvenco je potrebna zato, da optično polje še lahko obravnavamo linearno. Kako je v nasprotnem primeru, ko je frekvenca polja primerljiva z optično frekvenco, smo na široko obravnavali v poglavju o nelinearni optiki (poglavlje 8).

Namesto dielektričnega tenzorja navadno vpeljemo inverzni dielektrični tenzor

$$\underline{b} = \underline{\epsilon}^{-1}. \quad (9.1)$$

Izračunajmo zvezo med spremembami inverznega tenzorja  $\delta b_{ij}$  in spremembami dielektričnega tenzorja  $\delta \epsilon_{ij}$ . Če so spremembe majhne, velja

$$\underline{\epsilon} = \underline{\tilde{\epsilon}} + \delta \underline{\epsilon} = (\underline{b} + \delta \underline{b})^{-1} = (\underline{b}(1 + \underline{b}^{-1} \delta \underline{b}))^{-1} = (1 + \underline{b}^{-1} \delta \underline{b})^{-1} \underline{b}^{-1} \approx \underline{b}^{-1} - \underline{b}^{-1} \delta \underline{b} \underline{b}^{-1}. \quad (9.2)$$

Sprememba dielektričnega tenzorja je tako

$$\delta \underline{\epsilon} = -\underline{b}^{-1} \delta \underline{b} \underline{b}^{-1} = -\tilde{\epsilon} \delta \underline{b} \tilde{\epsilon}. \quad (9.3)$$

Če je nemoten dielektrični tenzor  $\tilde{\epsilon}$  diagonalen, velja

$$\delta \epsilon_{ij} = -\tilde{\epsilon}_{ik} \delta b_{kl} \tilde{\epsilon}_{lj} = -\tilde{\epsilon}_{ii} \tilde{\epsilon}_{jj} \delta b_{ij}. \quad (9.4)$$

Pri elektro-optičnem pojavu so spremembe tenzorja dielektričnosti zaradi vpliva zunanjega polja razmeroma majhne. Spremembo komponente  $\delta b_{ij}$  lahko zato zapišemo kot potenčno vrsto zunanjega polja  $E$ , pri čemer upoštevajmo zgolj prva dva člena v razvoju

$$\delta b_{ij} = r_{ijk} E_k + q_{ijkl} E_k E_l. \quad (9.5)$$

Prvi člen, linearne sorazmeren zunanjemu polju, opisuje linearne elektro-optični ali Pockelsov pojav<sup>1</sup>. Tenzor tretjega ranga  $r_{ijk}$ , ki je lastnost snovi, imenujemo elektro-optični tenzor ali tudi Pockelsov tenzor. Pockelsov tenzor je različen od nič v snoveh brez centra inverzije, značilne vrednosti Pockelsovega tenzorja pa so okoli  $r \sim 10^{-12} - 10^{-10}$  m/V,

Kvadratnemu elektro-optičnemu pojavu pravimo Kerrov pojav<sup>2</sup>, tenzorju  $q_{ijkl}$  pa Kerrov tenzor. Kerrov pojav je praviloma precej šibkejši od Pockelsovega, vendar je različen od nič v vseh snoveh, ne glede na njihove simetrijske lastnosti, torej tudi v tekočinah. Značilna vrednost Kerrovega tenzorja je  $q \sim 10^{-24}$  m<sup>2</sup>/V<sup>2</sup>. Navadno ločimo dva primera Kerrovega pojava: Kerrov elektro-optični pojav pri zunanjih poljih z nizko frekvenco, in optični Kerrov pojav, ki smo ga podrobnejše spoznali pri obravnavi nelinearnih optičnih pojavov (poglavlje 8.9).

Za uporabo trdnih kristalov je pomemben predvsem linearni člen, zato se bomo osredotočili le nanj in zapisali

$$\delta b_{ij} = r_{ijk} E_k. \quad (9.6)$$

### Elektro-optični ali Pockelsov tenzor

Simetrija snovi pomembno vpliva na obliko tenzorjev, ki opisujojo njene lastnosti. Pockelsov tenzor  $r$  je tenzor tretjega ranga, zato je lahko različen od nič le v kristalih brez centra inverzije. Simetrija kristala tudi v primeru, ko ni centra inverzije, močno zmanjša število neodvisnih komponent  $r_{ijk}$ .

Ker je inverzni dielektrični tenzor  $b$  simetričen, je v prvih dveh indeksih simetričen tudi Pockelsov tenzor

$$r_{ijk} = r_{jik}. \quad (9.7)$$

V najmanj simetričnem primeru triklinskega kristala ima tako namesto 27 zgolj 18 neodvisnih komponent, v kristalih z višjo simetrijo pa še manj.

Podobno kot pri nelinearni susceptibilnosti (poglavlje 8.1) tudi elektro-optični tenzor pogosto zapišemo le z dvema komponentama. Prva dva indeksa, v katerih je  $r_{ijk}$  simetričen, združimo v enega z vrednostmi od 1 do 6 po dogovoru  $xx = 1, yy = 2, zz = 3, yz = 4, zx = 5$  in  $xy = 6$ . Tako postane  $r_{ijk}$  matrika velikosti  $6 \times 3$ , simetrični tenzor drugega ranga  $b_{ij}$  pa šestdimenzionalen vektor.

<sup>1</sup>Nemški fizik Friedrich Carl Alwin Pockels, 1865–1913.

<sup>2</sup>Škotski fizik John Kerr, 1824–1907.

**Naloga 9.1.1** Naj bo  $Q$  transformacijska matrika za dano simetrijsko operacijo. Potem za tenzorje tretjega ranga velja

$$r_{ijk} = Q_{ip}Q_{jq}Q_{kr}r_{pqr}. \quad (9.8)$$

Zapiši transformacijsko matriko  $Q$  za vrtenje okoli osi  $z$  za  $\pi/2$  in pokaži, da so v primeru štirištevne simetrije od nič različne le komponente  $r_{xxz} = r_{yyz}, r_{zzz}, r_{yzx} = -r_{xzy}$  in  $r_{xzx} = r_{yzy}$ . Razmisli in izračunaj, kakšen bi bil tenzor  $r$ , če bi štirištevni simetriji dodali še zrcaljenje čez ravnino  $xy$ .

Nekaj primerov Pockelsovih tenzorjev pri različnih kristalnih simetrijah je podanih v tabeli (9.1).

Kristal	Grupa	Neničelne komponente tenzorja $r$	Vrednost ( $10^{-12} \text{ m/V}$ )
BaTiO <sub>3</sub>	4mm	$r_{xzx} = r_{yzy} = r_{zxx} = r_{zyy} = r_{51} = r_{42}$ $r_{xxz} = r_{yyz} = r_{13} = r_{23}$ $r_{zzz} = r_{33}$	(pri $1,55 \mu\text{m}$ ) $r_{51} = 800$ $r_{13} = 8$ $r_{33} = 28$
KDP	$\bar{4}2\text{m}$	$r_{yzx} = r_{zyx} = r_{xzy} = r_{zxy} = r_{41} = r_{52}$ $r_{xyz} = r_{yxz} = r_{63}$	$r_{41} = 8,77$ $r_{63} = -10,3$
GaAs	$\bar{4}3\text{m}$	$r_{yzx} = r_{zyx} = r_{xzy} = r_{zxy} = r_{xyz} = r_{yxz}$	(pri $10,6 \mu\text{m}$ ) $r_{41} = 1,5$
ZnTe		$= r_{41} = r_{52} = r_{63}$	(pri $3,4 \mu\text{m}$ ) $r_{41} = 4,2$
LiNbO <sub>3</sub>	3m	$r_{xzx} = r_{zxx} = r_{yzy} = r_{zyy} = r_{51} = r_{42}$ $r_{xxz} = r_{yyz} = r_{13} = r_{23}$ $r_{zzz} = r_{33}$ $r_{yyy} = -r_{xxy} = -r_{xyx} = -r_{yxx} =$ $= r_{22} = -r_{12} = -r_{61}$	$r_{51} = 32,6$ $r_{13} = 9,6$ $r_{33} = 30,9$ $r_{22} = 6,8$

Tabela 9.1: Koeficienti Pockelsovega tenzorja za nekaj izbranih snovi. Če ni navedeno drugače, veljajo vrednosti pri valovni dolžini okoli 600 nm.



Komponente elektro-optičnega tenzorja zaradi nazornosti pogosto ponazarjamо grafično. V matriki  $6 \times 3$  s piko označimo komponente, ki so enake nič, s polnim krožcem neničelne komponente, povezava med komponentami pomeni njihovo enakost, prazen krožec in črtkana črta pa označujeta neničelno komponento nasprotnega predznaka. Kot primer sta podana prikaza tenzorjev za GaAs (levo) in LiNbO<sub>3</sub> (desno).

$$\begin{bmatrix} \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \cdot & \circ & \bullet \\ \cdot & \bullet & \bullet \\ \cdot & \bullet & \bullet \\ \bullet & \bullet & \bullet \\ \circ & \circ & \circ \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{bmatrix}$$

## 9.2 Longitudinalna modulacija

Poglejmo podrobneje, kako električno polje spremeni optične lastnosti elektro-optičnega kristala in kako to vpliva na svetlubo, ki potuje skozi tak kristal. Navadno se uporabljajo kristali, ki so dvolomni že brez zunanjega polja. Kot primer vzemimo kristal  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (KDP), ki ima tetragonalno simetrijo ( $\bar{4}2m$ ). Kot razberemo iz tabele (9.1) ima elektro-optični tenzor dve neodvisni komponenti:  $r_{41} = r_{52} = 8,77 \times 10^{-12} \text{ m/V}$  in  $r_{63} = -10,3 \times 10^{-12} \text{ m/V}$ .

Kristal naj bo odrezan po kristalografskih oseh, svetluba naj skozi kristal potuje v smeri optične osi, to je smeri  $z$ , v isti smeri pa na kristal priključimo polje  $E_z$ . Ker je smer električnega polja vzporedna s smerjo širjenja svetlobe, taki postavitevi pravimo longitudinalna in pojavu longitudinalna modulacija.



Slika 9.2: Shema longitudinalne modulacije signala. Ker je polje priključeno v smeri potovanja svetlobe, morata biti elektrodi transparentni. Z uporabo polarizatorja in analizatorja sestavimo amplitudni modulator (glej poglavje 9.4).

Inverzni tenzor dielektričnosti v odsotnosti zunanjega polja zapišemo kot

$$\tilde{b} = \begin{bmatrix} 1/n_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/n_o^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/n_e^2 \end{bmatrix}, \quad (9.9)$$

pri čemer sta  $n_o$  in  $n_e$  redni in izredni lomni količnik. Ko priključimo polje, se tenzor dielektričnosti spremeni zaradi Pockelsovega pojava. Sprememba inverznega tenzorja dielektričnosti je po enačbi (9.6)

$$\begin{aligned} \delta b_{xx} &= r_{xxx}E_x + r_{xxy}E_y + r_{xxz}E_z = 0, \\ \delta b_{xy} &= \delta b_{yx} = r_{xyx}E_x + r_{xyy}E_y + r_{xyz}E_z = r_{63}E_z, \\ \delta b_{xz} &= \delta b_{zx} = r_{xzz}E_z = 0, \\ \delta b_{yy} &= r_{yyz}E_z = 0, \\ \delta b_{yz} &= \delta b_{zy} = r_{yzz}E_z = 0, \\ \delta b_{zz} &= r_{zzz}E_z = 0. \end{aligned} \quad (9.10)$$

Vidimo, da je večina členov enaka nič, se pa zaradi zunanjega električnega polja v smeri  $z$  pojavi izvendiagonalna komponenta

$$b = \begin{bmatrix} 1/n_o^2 & 0 & 0 \\ 0 & 1/n_o^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/n_e^2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & r_{63}E_z & 0 \\ r_{63}E_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1/n_o^2 & r_{63}E_z & 0 \\ r_{63}E_z & 1/n_o^2 & 0 \\ 0 & 0 & 1/n_e^2 \end{bmatrix}. \quad (9.11)$$

Če želimo izračunati, kako se po kristalu pod napetostjo širi vpadni svetlobni snop, moramo gornji dielektrični tenzor diagonalizirati. Lastne vrednosti novega tenzorja in pripadajoče nove lastne osi so

$$\lambda_1 = \frac{1}{n_o^2} + r_{63}E_z \quad \text{in} \quad \mathbf{e}_1 = \frac{1}{\sqrt{2}}(1, 1, 0) \quad (9.12)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{n_o^2} - r_{63}E_z \quad \text{in} \quad \mathbf{e}_2 = \frac{1}{\sqrt{2}}(-1, 1, 0) \quad (9.13)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{n_e^2} \quad \text{in} \quad \mathbf{e}_3 = (0, 0, 1). \quad (9.14)$$

Vidimo, da so nove lastne osi zasukane za kot  $45^\circ$  glede na prvotne osi sistema. V novem koordinatnem sistemu je inverzni dielektrični tenzor diagonalen in enak

$$b = \begin{bmatrix} 1/n_o^2 + r_{63}E_z & 0 & 0 \\ 0 & 1/n_o^2 - r_{63}E_z & 0 \\ 0 & 0 & 1/n_e^2 \end{bmatrix}. \quad (9.15)$$



Slika 9.3: Optično enoosni kristal postane pod napetostjo dvoosen. Indikatrisa, ki je pravokotno na optično os brez polja krožnica, se pod vplivom napetosti spremeni v elipso.

Spomnimo se, da potuje svetloba skozi kristal vzdolž osi \$z\$. Brez zunanjega električnega polja je kristal enoosen z optično osjo v smeri \$z\$. Lomni količnik je torej neodvisen od polarizacije vpadnega valovanja in je enak \$n\_o\$. Ko priključimo polje, postane kristal optično dvoosen, saj so vse tri lastne vrednosti tenzorja dielektričnosti različne. Za žarek, ki potuje vzdolž osi \$z\$, torej obstajata dve lastni smeri \$x'\$ in \$y'\$ z ustreznima novima lastnima količnikoma, ki ju izrazimo kot

$$\frac{1}{n_{x'}^2} = \frac{1}{n_o^2} + r_{63}E_z \quad \text{in} \quad \frac{1}{n_{y'}^2} = \frac{1}{n_o^2} - r_{63}E_z. \quad (9.16)$$

Kadar polarizacija vpadnega valovanja ne Sovpada z novimi lastnimi osmi \$x'\$ ali \$y'\$, je svetloba po preletu kristala v splošnem eliptično polarizirana.

Za vsa eksperimentalno dosegljiva polja velja, da je  $rE \ll 1/n^2$ , zato lahko gornja izraza razvijemo za majhne popravke

$$n_{x'} = \sqrt{\frac{n_o^2}{1 + n_o^2 r_{63} E_z}} \approx n_o \sqrt{1 - n_o^2 r_{63} E_z} \quad (9.17)$$

Sledi

$$n_{x'} \approx n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E_z. \quad (9.18)$$

Podobno izpeljemo še za drugo lastno vrednost

$$n_{y'} \approx n_o + \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} E_z. \quad (9.19)$$

Različni lastni polarizaciji potujeta vzdolž osi  $z$  z različnima hitrostma. Ko prepotujeta dolžino kristala  $L$ , pride med njima do fazne razlike

$$\Delta\phi = k_0 n_{y'} L - k_0 n_{x'} L = \frac{\omega}{c_0} L n_o^3 r_{63} E_z. \quad (9.20)$$

Prelet kristala torej doda vpadnemu valovanju fazni zamik, ki je odvisen od električne poljske jakosti  $E_z$ .

Vpeljemo še karakteristično napetost  $U_\pi$ , pri kateri je dodatna fazna razlika enaka  $\pi$  in kristal deluje kot ploščica  $\lambda/2$

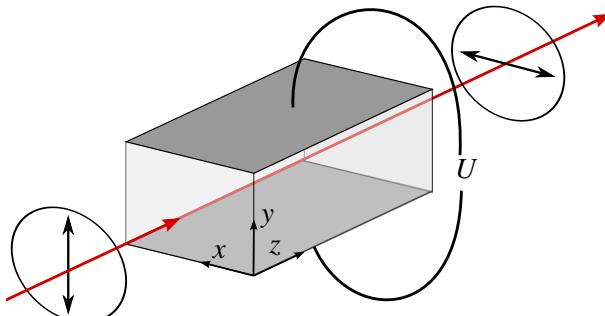
$$U_\pi = \frac{\pi c_o}{\omega n_o^3 r_{63}} = \frac{\lambda}{2 n_o^3 r_{63}}. \quad (9.21)$$

Za kristal KDP je  $\pi$ -vrednost napetosti pri valovni dolžini 633 nm okoli 9000 V. Izračunana napetost je precej velika. Velike delovne napetosti so značilne za kristalne elektro-optične modulatorje in so njihova glavna pomanjkljivost.

### 9.3 Transverzalna modulacija

Iz praktičnih razlogov je navadno preprosteje priključiti električno polje v smeri, ki je pravokotna na smer širjenja svetlobe. Taki postavitevi pravimo transverzalna in pojavu transverzalna modulacija.

Tudi to postavitev obravnavajmo na primeru. Za zgled vzemimo kristal LiNbO<sub>3</sub>, ki ima trigonalno simetrijo (3m) in po tabeli (9.1) štiri neodvisne komponente:  $r_{51} = r_{42}, r_{13} = r_{23}, r_{33}$  in  $r_{22} = -r_{12} = -r_{61}$ .



Slika 9.4: Shema transverzalne modulacije signala

Naj se svetloba širi vzdolž osi  $z$ , ki je hkrati tudi optična os, električno polje pa priključimo v smeri  $y$  (slika 9.4). Krajši račun pokaže, da je inverzni dielektrični tenzor pod vplivom polja enak

$$\underline{b} = \begin{bmatrix} 1/n_o^2 - r_{22}E_y & 0 & 0 \\ 0 & 1/n_o^2 + r_{22}E_y & r_{51}E_y \\ 0 & r_{51}E_y & 1/n_e^2 \end{bmatrix}. \quad (9.22)$$

Tudi v tem primeru tenzor diagonaliziramo in poiščemo nove lastne vrednosti. Ob privzetku, da je sprememba zaradi električnega polja majhna ( $rE \ll 1$ ), so nove lastne vrednosti enake

$$\lambda_1 \approx \frac{1}{n_o^2} - r_{22}E_y \quad (9.23)$$

$$\lambda_2 \approx \frac{1}{n_o^2} + r_{22}E_y \quad (9.24)$$

$$\lambda_3 \approx \frac{1}{n_e^2}, \quad (9.25)$$

kar ustreza lomnim količnikom

$$n_{x'} \approx n_o \left( 1 + \frac{1}{2} n_o^2 r_{22} E_y \right) \quad (9.26)$$

$$n_{y'} \approx n_o \left( 1 - \frac{1}{2} n_o^2 r_{22} E_y \right) \quad (9.27)$$

$$n_z' \approx n_e. \quad (9.28)$$

Kako pa je z novimi lastnimi osmi? Hitro ugotovimo, da se tudi pri priključenem polju os  $x$  ohranja. Pojavi se torej zasuk okoli osi  $x$ , ki ga označimo s kotom  $\vartheta$ . Račun pokaže, da je za smiselne vrednosti električnega polja ta kot zelo majhen ( $\vartheta \approx r_{51}E_y/(1/n_o^2 - 1/n_e^2) \sim 1$  mrad), tako da lahko v približku rečemo, da se lastne osi ohranjajo.

Če potuje svetloba vzdolž osi  $z$ , sta torej lomna količnika za polarizaciji v smeri  $x$  in  $y$  približno enaka  $n_{x'}$  in  $n_{y'}$ , fazna razlika med polarizacijama po preletu kristala z dolžino  $L$  pa je

$$\Delta\phi = k_0 n_{y'} L - k_0 n_{x'} L = \frac{\omega}{c_0} L n_o^3 r_{22} E_y. \quad (9.29)$$

Karakteristična  $\pi$ -napetost je tako

$$U_\pi = \frac{\lambda d}{2 L n_o^3 r_{22}}, \quad (9.30)$$

pri čemer moramo ločiti med  $L$ , ki je dolžina kristala v smeri  $z$ , in  $d$ , ki je širina v prečni smeri v kateri priključimo napetost. Za izbran kristal ( $d = 5$  mm,  $L = 1$  cm) je  $\pi$ -vrednost napetosti pri valovni dolžini 633 nm okoli 2000 V.



Transverzalno modulacijo lahko dosežemo tudi tako, da se žarek širi vzdolž osi  $y$ , električno polje pa priključimo vzdolž optične osi  $z$ . V tem primeru se lastne osi ohranijo in kristal ostane optično enoosen. Vendar pa ima tudi ta rešitev določene slabosti. Ker je kristal že sam po sebi dvolomen, povzroči zunanje polje le majhno dodatno fazno razliko, zato je najbolje, če je dolžina kristala taka, da velja  $k_0 L (n_o - n_e) = 2N\pi$ . Pri tem pa nastopi težava. Pogoj je lahko zaradi temperaturnega raztezanja in odvisnosti lomnih količnikov od temperature izpolnjen le pri eni temperaturi, poleg tega se mora svetloba širiti natančno v smeri  $y$ . Zato dvolomnost nemotenega kristala navadno kompenziramo, tako da postavimo dva enako dolga kristala zapored, pri čemer sta optični osi med seboj pravokotni, modulacijska napetost na drugem kristalu pa ima nasproten predznak. Tedaj se fazna razlika med obema polarizacijama zaradi naravne dvolomnosti odšteje, zaradi modulacijske napetosti pa sešteje.

## 9.4 Amplitudna modulacija

Poglejmo, kako lahko elektro-optični pojav izkoristimo za modulacijo amplitude svetlobnega snopa. Pod vplivom polja pride v kristalu do faznega zamika med polarizacijama, ki je sorazmeren napetosti (enačbi 9.20 in 9.29). Če za tak kristal postavimo analizator, lahko z napetostjo spremojamo prepuščeno moč svetlobe – amplitudno moduliramo signal.

Vrnimo se k longitudinalni modulaciji (slika 9.2). Naj bo vpadna električna poljska jakost  $E_0$  polarizirana v smeri  $y$ . Ko priključimo napetost, os  $y$  ni več lastna os, ampak sta lastni osi zasukani za kot  $45^\circ$  glede na prvotni lastni osi (slika 9.3). Vpadno valovanje razstavimo na komponenti  $x'$  in  $y'$

$$\mathbf{E}_0 = E_0 \mathbf{e}_y = \frac{E_0}{\sqrt{2}} (\mathbf{e}_{x'} + \mathbf{e}_{y'}) . \quad (9.31)$$

Po prehodu skozi kristal pride med njima do fazne razlike  $\Delta\phi$  (enačba 9.20), zato je polje  $\mathbf{E}_1$  ob izstopu iz kristala

$$\mathbf{E}_1 = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \left( e^{ik_0 n_{x'} L} \mathbf{e}_{x'} + e^{ik_0 n_{y'} L} \mathbf{e}_{y'} \right) = \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{ik_0 n_{x'} L} (\mathbf{e}_{x'} + e^{i\Delta\phi} \mathbf{e}_{y'}) . \quad (9.32)$$

Analizator na izhodni strani je obrnjen v smeri  $x$ , to je pravokotno na smer vpadne polarizacije, in prepusti le projekcijo obeh lastnih polarizacij na os  $x$

$$\mathbf{E}_2 = \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{e}_x = \frac{E_0}{\sqrt{2}} e^{ik_0 n_{x'} L} \left( \frac{1}{\sqrt{2}} - \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\Delta\phi} \right) \mathbf{e}_{x'} . \quad (9.33)$$

Gostota prepuščenega svetlobnega toka ob vpadnem toku  $j_0$  je tako

$$j = \frac{1}{4} j_0 |1 - e^{i\Delta\phi}|^2 = \frac{1}{2} j_0 (1 - \cos \Delta\phi) . \quad (9.34)$$

Preoblikujemo izraz in zapisemo prepustnost takega modulatorja ob upoštevanju enačbe (9.20)

$$T = \frac{j}{j_0} = \sin \left( \frac{\Delta\phi}{2} \right)^2 = \sin \left( \frac{\pi n_o^3 r_{63} U}{\lambda} \right)^2 . \quad (9.35)$$



Slika 9.5: Prepustnost amplitudnega modulatorja v odvisnosti od faznega zamika  $\Delta\phi$ , ki je sorazmeren priključeni napetosti  $U$ . Če pred vzorec dodamo ploščico  $\lambda/4$ , se pojavi stalni fazni zamik  $\pi/2$  in odvisnost prepustnosti od priključene napetosti je približno linearна (modra črta).

Ko je napetost na kristalu enaka nič, je  $\Delta\phi = 0$  in tudi intenziteta prepuščene svetlobe  $j = 0$ . To je pričakovano, saj sta analizator in polarizator prekrižana, vpadni žarek pa se širi vzdolž lastne osi kristala. Prepustnost doseže največjo vrednost, ko je  $\Delta\phi = \pi$ , kar je ravno pri  $\pi$ -napetosti. Ko torej napetost povečamo z 0 na  $U_\pi$ , se prepustnost modulatorja spremeni z 0 na 1 (slika 9.5).

Pogosto želimo, da je zveza med modulacijsko napetostjo in izhodno gostoto toka linearna. To lahko dosežemo, če modulator deluje v okolici  $\Delta\phi = \pi/2$  (slika 9.5). Ena rešitev bi bila dodati stalno visoko napetost, signal pa modulirati okoli te vrednosti. Precej bolj praktična rešitev je, da med polarizator in kristal dodamo ploščico  $\lambda/4$ , ki da zahtevan stalni fazni premik med rednim in izrednim valom. Potem lahko z razmeroma majhno napetostjo linearno amplitudno moduliramo svetlobo.

## 9.5 Fazna in frekvenčna modulacija

Svetlobo smo amplitudno modulirali, tako da smo z zunanjim poljem spremenili fazi lastnih valov, zaradi česar je postal linearo polarizirano vpadno valovanje po prehodu kristala eliptično polarizirano. Spremembo polarizacije smo z analizatorjem prevedli v spremembo amplitude.

Včasih pa želimo modulirati fazo vpadne svetlobe. Vrnimo se k primeru longitudinalne modulacije. Fazno oziroma frekvenčno modulacijo dosežemo tako, da vhodno polarizacijo izberemo vzporedno eni od novih lastnih osi kristala, na primeri osi  $x'$ , izhodni polarizator pa odstranimo (slika 9.6).



Slika 9.6: Shema fazne modulacije signala. Vpadna polarizacija je vzporedna eni od novih lastnih osi kristala, ki se pojavijo pod vplivom zunanjega polja.

Celoten fazni zamik po preletu skozi kristal zapišemo kot

$$\phi = k_0 n_{x'} L - \omega_0 t = \frac{\omega_0}{c_0} L \left( n_o - \frac{1}{2} n_o^3 r_{63} \frac{U}{L} \right) - \omega_0 t, \quad (9.36)$$

pri čemer smo za lomni količnik zapisali skladno z enačbo (9.18). Opazimo, da je fazni zamik odvisen od priključene zunanjega napetosti.

Obravnavajmo dva primera spremenljajoče se napetosti. V prvem primeru naj bo napetost linearna funkcija časa

$$U = U_0 + \frac{\Delta U}{\Delta t} t. \quad (9.37)$$

Celotna faza prepuščenega valovanja je potem

$$\phi = \frac{\omega_0}{c_0} L n_o - \frac{\omega_0 n_o^3 r_{63}}{2 c_0} \left( U_0 + \frac{\Delta U}{\Delta t} t \right) - \omega_0 t. \quad (9.38)$$

Trenutno frekvenco valovanja izračunamo kot negativni odvod faze po času

$$\omega = -\frac{d\phi}{dt} = \omega_0 + \frac{\omega_0 n_o^3 r_{63}}{2c_0} \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad (9.39)$$

oziroma

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega. \quad (9.40)$$

Linearno naraščajoča modulacijska napetost da torej konstanten frekvenčni premik, kar v optiki pogosto potrebujemo. Dosegljive spremembe frekvence so seveda dokaj majhne, do nekaj sto MHz, saj so omejene s hitrostjo spremicanja napetosti. Napetost seveda tudi ne more neomejeno naraščati. Kadar se napetost vrača na nič, pride do frekvenčnega premika v nasprotni smeri, ki pa ga lahko zanemarimo, če je čas vračanja bistveno krajši od časa naraščanja.

Poglejmo še drug primer, pri katerem se priključena napetost periodično spreminja. Zapišemo jo kot

$$U = U_0 \sin(\omega_m t). \quad (9.41)$$

Vstavimo gornji izraz v enačbo (9.36) in zapišemo fazo izhodnega valovanja

$$\phi = \frac{\omega_0}{c_0} L n_o - \frac{\omega_0 n_o^3 r_{63}}{2c_0} U_0 \sin(\omega_m t) - \omega_0 t. \quad (9.42)$$

V primeru linearne spremnjajoče napetosti smo na tem mestu fazo odvajali in dobili hitrost, ki je bila konstantna. V tem primeru pa z odvajanjem dobimo kotno hitrost, ki se spreminja s časom. Zato se računa lotimo drugače. Konstantni člen v gornjem izrazu lahko izpustimo in zapišemo električno poljsko jakost prepuščenega valovanja

$$E = E_0 \cos \left( \omega_0 t + \frac{\omega_0 n_o^3 r_{63}}{2c_0} U_0 \sin(\omega_m t) \right) = E_0 \cos(\omega_0 t + \delta \sin(\omega_m t)), \quad (9.43)$$

pri čemer je

$$\delta = \frac{\omega_0 n_o^3 r_{63}}{2c_0} U_0. \quad (9.44)$$

Z uporabo Jacobi-Angerjevih<sup>3</sup> identitet

$$\begin{aligned} \cos(\delta \sin x) &= J_0(\delta) + 2J_2(\delta) \cos 2x + 2J_4(\delta) \cos 4x + \dots && \text{in} \\ \sin(\delta \sin x) &= 2J_1(\delta) \sin x + 2J_3 \sin 3x + 2J_5 \sin 5x + \dots \end{aligned} \quad (9.45)$$

je izhodno polje mogoče zapisati v obliki

$$\begin{aligned} \frac{E}{E_0} &= J_0(\delta) \cos(\omega_0 t) + \\ &+ J_1(\delta) \cos(\omega_0 + \omega_m)t - J_1(\delta) \cos(\omega_0 - \omega_m)t + \\ &+ J_2(\delta) \cos(\omega_0 + 2\omega_m)t + J_2(\delta) \cos(\omega_0 - 2\omega_m)t + \\ &+ J_3(\delta) \cos(\omega_0 + 3\omega_m)t - J_3(\delta) \cos(\omega_0 - 3\omega_m)t + \dots \end{aligned} \quad (9.46)$$

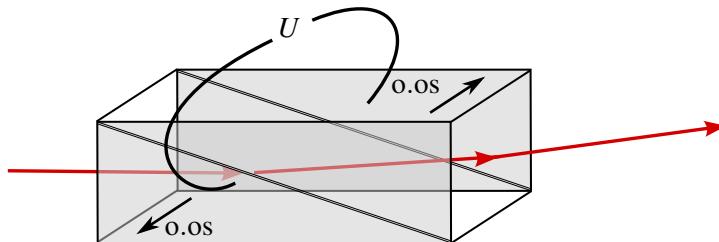
---

<sup>3</sup>Nemška matematika Carl Gustav Jacob Jacobi, 1804–1851, in Carl Theodor Anger, 1803–1858.

**Naloga 9.5.1** Ob upoštevanju Jacobi-Angerjevih identitet (enačbi 9.45) pokaži, da električno polje izhodne svetlobe ob priključeni izmenični napetosti s frekvenco  $\omega_m$  ustreza polju v enačbi (9.46).

Zaradi periodične fazne modulacije se torej v spektru pojavijo stranski pasovi, ki so od osnovne frekvence  $\omega_0$  odmaknjeni za večkratnike modulacijske frekvence  $\omega_m$ . Njihova velikost je podana s kvadratom Besselovih funkcij parametra  $\delta$ . Ker je ta navadno majhen, se pogosto zadovoljimo le s prvim členom.

Elektro-optični pojav izkorisčamo tudi za uklanjanje žarkov. Najpreprostejši primer deflektorja je trikotna prizma z elektrodama na osnovnih ploskvah. Svetloba se ob prehodu skozi prizmo lomi v odvisnosti od njenega lomnega količnika, tega pa lahko spremojemo z napetostjo na elektrodah. Praktično je bolj uporabna dvojna prizma. Sestavljena je iz dveh enakih prizem, ki skupaj tvorita kvader, pri tem pa optični osi zgornje in spodnje prizme kažeta v nasprotnih smereh. S spremenjanjem napetosti, ki jo priključimo prečno na smer razširjanja svetlobe, lahko zelo hitro in zelo natančno spremojemo smer izhodnega žarka. Vendar ta pristop ni splošno uveljavljen, predvsem zaradi velike napetosti, ki je potrebna za znatno uklanjanje. Veliko bolj razširjen je akusto-optični pojav, ki ga bomo spoznali v naslednjem razdelku.



Slika 9.7: Shema elektro-optičnega deflektorja

## 9.6 Elasto-optični in akusto-optični pojav

Pri elasto-optičnem pojavu dielektrične lastnosti snovi in njen lomni količnik spremojamo z mehansko deformacijo. Podobno kot pri elektro-optičnem pojavu opišemo pojav s spremembou inverznega dielektričnega tenzorja

$$\underline{b} = \tilde{\underline{b}} + \Delta \underline{b}, \quad (9.47)$$

pri čemer je  $\tilde{\underline{b}}$  tenzor v odsotnosti mehanske deformacije,  $\Delta \underline{b}$  pa sprememba tenzorja zaradi deformacije snovi. Zapišemo jo kot

$$\Delta b_{ij} = p_{ijkl} S_{kl}. \quad (9.48)$$

Sorazmerna je s tenzorjem deformacije snovi oziroma Greenovim tenzorjem<sup>4</sup> v linearinem približku

$$S_{kl} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_k}{\partial x_l} + \frac{\partial u_l}{\partial x_k} \right), \quad (9.49)$$

pri čemer je  $\mathbf{u}$  vektor deformacije.

<sup>4</sup>Angleški matematični fizik George Green, 1793–1841.

Vpeljali smo še sorazmernostni faktor  $p_{ijkl}$ , ki ga imenujemo elasto-optični tenzor. Tenzor  $p$  je različen od nič v vsaki snovi, ker povezuje dva simetrična tenzorja drugega ranga. Posledično je simetričen v prvem in drugem paru indeksov

$$p_{ijkl} = p_{jikl} = p_{ijlk} = p_{jilk}. \quad (9.50)$$

V najbolj splošnem primeru triklinske kristalne simetrije ima tako 36 neodvisnih komponent, v bolj simetričnih snoveh pa se število neodvisnih komponent še zmanjša. Če vpeljemo skrajšan zapis indeksov ( $xx = 1, yy = 2, zz = 3, yz = 4, zx = 5, xy = 6$ ), zapišemo tenzor za primer izotropne snovi kot

$$p_{\text{izo}} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{11} & p_{12} & 0 & 0 & 0 \\ p_{12} & p_{12} & p_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & p_{44} \end{bmatrix}, \quad (9.51)$$

pri čemer je  $p_{44} = \frac{1}{2}(p_{11} - p_{12})$ . Koeficienti tenzorja so brezdimenzijski, njihova tipična vrednost pa je  $p \sim 0, 1$ . Za vodo, na primer, velja  $p_{11} \approx p_{12} = 0, 31$ , za LiNbO<sub>3</sub> pa  $p_{11} = -0, 02, p_{12} = 0, 08, p_{13} = 0, 13, p_{14} = -0, 08, p_{31} = 0, 17, p_{33} = 0, 07, p_{41} = -0, 15, p_{44} = 0, 12$ .

Podobno kot pri elektro-optičnem pojavu lahko iz enačbe (9.48) izrazimo spremembo dielektričnega tenzorja

$$\Delta \epsilon_{ij} = -\tilde{\epsilon}_{ii}\tilde{\epsilon}_{jj}p_{ijkl}S_{kl}, \quad (9.52)$$

kjer smo že predpostavili, da je nemoten  $\epsilon$  diagonalen.

Dvojni lom, ki se pojavi v deformirani snovi, izkoriščamo za študij mehanskih napetosti v modelih, ki so izdelani iz prozorne plastične snovi. Nas bo v nadaljevanju zanimal uklon svetlobe na periodični modulaciji lomnega količnika, ki nastane zaradi zvočnega valovanja v snovi. Takemu pojavu pravimo tudi akusto-optični pojav.

---

**Nalog 9.6.1** Po izotropni snovi se širi longitudinalno valovanje vzdolž smeri  $z$ , tako da deformacijo v snovi zapišemo kot

$$\mathbf{u} = A \cos(qz - \Omega t) \mathbf{e}_z. \quad (9.53)$$

Pokaži, da je taka snov dvolomna z optično osjo vzdolž osi  $z$ , lastni lomni količniki pa so

$$n_x' \approx n(1 + \frac{1}{2}n^2 p_{12} q A \sin(qz - \Omega t)) \quad (9.54)$$

$$n_y' \approx n(1 + \frac{1}{2}n^2 p_{12} q A \sin(qz - \Omega t)) \quad (9.55)$$

$$n_z' \approx n(1 + \frac{1}{2}n^2 p_{11} q A \sin(qz - \Omega t)), \quad (9.56)$$

kjer je  $n$  lomni količnik v odsotnosti motnje.

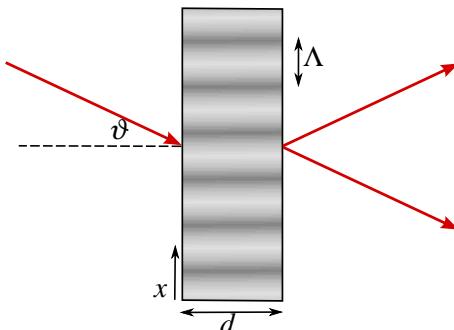
---

## 9.7 Uklon svetlobe na zvočnem valovanju

Vzбудimo v plasti prozorne izotropne snovi zvočno valovanje z valovno dolžino  $\Lambda$ , ki potuje v smeri  $x$ . To naredimo tako, da na eno stran snovi priključimo piezoelektrik, ki se pod izmenično napetostjo periodično krči in razteza s krožno frekvenco  $\Omega$ . Na drugo stran kristala damo akustični absorber ali pa reflektor, tako da lahko v snovi vzbudimo tudi stoječe valovanje. Zaradi zvočnega valovanja se v snovi periodično spreminja gostota in z njo lomni količnik

$$n = \tilde{n} + \Delta n \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda}x - \Omega t\right). \quad (9.57)$$

V zgoščini je lomni količnik nekoliko večji kot v razredčini, zato je optična pot na takem mestu skozi plast daljša. Ravno svetlobno valovanje, ki vpada na plast pravokotno glede na smer širjenja zvoka, po izstopu zato nima povsod enake faze, valovno čelo pa je periodično modulirano s periodo valovne dolžine zvočnega valovanja. Zvočno valovanje v snovi torej deluje kot optična fazna mrežica. Tipična frekvenca, s katero vzbujamo elastično deformacijo, je okoli  $\Omega = 50$  MHz, ustrezna valovna dolžina pa okoli  $\Lambda = 100 \mu\text{m}$ . Frekvence, ki so v uporabi, navadno sežejo od nekaj MHz prek 10 GHz. Vsa ta valovanja imenujemo zvočno valovanje.



Slika 9.8: Vpadna svetloba se na stoječem zvočnem valovanju v snovi uklanja.

Oglejmo si dva limitna primera. V prvem primeru je debelina plasti  $d$ , v kateri vzbujamo zvočno valovanje, zelo majhna (slika 9.9 levo). Takrat modulator deluje kot tanka uklonska mrežica in pojavi se veliko uklonskih vrhov, intenziteta posameznega žarka pa je razmeroma majhna. Kote, pod katerimi se pojavijo ojačitve, izračunamo po preprosti enačbi

$$\Lambda(\sin \vartheta - \sin \beta) = N\lambda, \quad (9.58)$$

pri čemer je  $\lambda$  valovna dolžina svetlobe v snovi,  $N$  pa celo število. Takemu pojavu pravimo Raman-Nathov uklon<sup>5</sup>. Opazimo ga pri razmeroma nizkih zvočnih frekvencah (pod  $\sim 10$  MHz) in majhnih debelinah (pod  $d \sim 1$  cm) pri poljubnem vpadnem kotu  $\vartheta$ .

V nasprotnem limitnem primeru se svetloba uklanja na ravnih zvočnih valovih in modulator deluje kot debela uklonska mrežica. V splošnem je delež uklnjene svetlobe na taki mrežici neuporabno majhen. Znaten postane le tedaj, kadar je izpolnjen Braggov pogoj<sup>6</sup>

$$2\Lambda \sin \vartheta = \pm N\lambda. \quad (9.59)$$

<sup>5</sup>Indijski fizik in nobelovec Sir Chandrasekhara Venkata Raman, 1888–1970, in indijski fizik N. S. Nagendra Nath.

<sup>6</sup>Angleška znanstvenika in nobelovca Sir William Henry Bragg, 1862–1942, in Sir William Lawrence Bragg, 1890–1971.

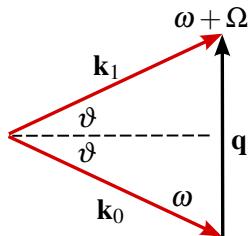


Slika 9.9: Ob vpadu svetlobe na tanko plast zvočnega valovanja se pojavi veliko uklonskih vrhov, na debeli plasti zvočnega valovanja pa je opazen zgolj en uklonjen vrh, pa še ta le ob izpolnjenem Braggovem pogoju (enačba 9.59).

Poglejmo natančneje, kako pridemo do gornjega pogoja. Zapišimo pogoj za ohranitev gibalne količine fotona pri sisanju na zvočnem valu

$$\mathbf{k}_0 \pm \mathbf{q} = \mathbf{k}_1, \quad (9.60)$$

kjer je  $\mathbf{k}_0$  valovni vektor vpadne svetlobe,  $\mathbf{k}_1$  valovni vektor uklonjenega svetlobnega snopa,  $\mathbf{q}$  pa valovni vektor zvočnega vala. Znak plus velja, kadar potuje zvok proti projekciji  $\mathbf{k}_0$  na  $\mathbf{q}$ , negativen predznak pa ob potovanju zvoka v nasprotno smer. Ker je frekvenca zvočnega vala dosti nižja od frekvence svetlobe, se frekvenca svetlobe pri sisanju le malo spremeni in  $\mathbf{k}_0$  in  $\mathbf{k}_1$  sta po velikosti skoraj enaka. Tedaj je  $q = 2k_0 \sin \vartheta$  (glej sliko 9.10), od koder sledi Braggov pogoj (enačba 9.59). Obenem je vpadni kot na zvočni val enak izhodnemu, kar pomeni, da se na zvočnem valu Braggovo sisanja svetloba zrcalno odbije. Razmere so torej povsem analogne Braggovemu sisanju rentgenske svetlobe na kristalnih ravninah. Kot bomo pokazali v nadaljevanju, je ob izpolnjenem Braggovem pogoju mogoče doseči, da se vsa vpadna svetloba uklanja.



Slika 9.10: K izpeljavi Braggovega pogoja



Poskusimo še malo bolj natančno oceniti, kdaj je v veljavi Raman-Nathov in kdaj Braggov režim. Izhajajmo iz pogoja, da je razširitev žarka na debelini plasti zvočnega valovanja dovolj majhna, da se snop ne širi iz območja zgoščine v območje razredčine, da se torej ne razširi za več kot za  $\Lambda/2$ . Tako zapišemo divergenco kot (enačba 3.21)  $\theta \sim \lambda/w_0 \sim 2\lambda/\Lambda$ , ki ne sme presegati razširitve  $\theta \sim \Lambda/2d$ . Sledi kriterij za debelinu  $d$ , pri kateri preidemo iz enega v drug režim

$$d \sim \frac{\Lambda^2}{4\lambda}. \quad (9.61)$$

Če svetloba z  $\lambda = 1 \mu\text{m}$  vpade na kristal, v katerem je vzbujeno zvočno valovanje z valovno dolžino  $\Lambda = 0,2 \text{ mm}$  in frekvenco  $\Omega = 150 \text{ MHz}$ , je mejna debelina  $d \sim 1 \text{ cm}$ .

Če je zvočno valovanje potupoče, kar smo v gornjem razmišljjanju že privzeli s tem, ko smo mu pripisali natanko določen valovni vektor  $\mathbf{q}$ , se spremeni tudi frekvence sisanega vala zaradi Dopplerjevega premika pri odboju na zvočnem valovanju, ki potuje s hitrostjo  $v_z$ . Upoštevati moramo le projekcijo na smer vpadne in odbite svetlobe, zato je

$$\frac{\Delta\omega}{\omega} = \pm \frac{2v_z \sin \vartheta}{c} = \pm \frac{2\Omega\Lambda \sin \vartheta}{2\pi c} = \pm \frac{\Omega}{\omega}, \quad (9.62)$$

pri čemer smo uporabili Braggov pogoj (enačba 9.59). Sprememba frekvence siane svetlobe je torej kar enaka frekvenci zvočnega valovanja. To je seveda v skladu z gornjo zahtevo, da se pri uklonu na zvočnem valovanju ohranja energija vpadnega fotona in kvanta zvočnega valovanja (fonona), ki se pri sisanju absorbira ali pri njem nastane.

Malenkost drugačno je obnašanje, ko v snovi vzbudimo stopeče zvočno valovanje. Takrat lahko sisanje obravnavamo kot vsoto sisanja na dveh valovanjih z valovnima vektorjema  $\mathbf{q}$  in  $-\mathbf{q}$ . Smer Braggovo sisanega vala je obakrat enaka, frekvanca pa se enkrat poveča, drugič zmanjša za  $\Omega$ . Zato se pojavi utripanje sisanega vala s frekvenco  $2\Omega$ .

### Uporaba akusto-optičnih modulatorjev

Spoznali smo, da lahko z zvočnim valovanjem spremojemo smer vpadne svetlobe. Bistvena razlika od navadnih uklonskih mrežic je dinamičnost akusto-optičnih modulatorjev, saj lahko uklonski kot svetlobe hitro spremojamo, pri čemer pa smo omejeni s tem, da mora biti vsaj približno izpolnjen Braggov pogoj. S kombinacijo dveh med seboj pravokotnih akusto-optičnih modulatorjev lahko žarek premikamo po ravnini, kar s pridom uporabljam v različnih optičnih napravah, na primer v optičnih pincetah, optičnih čitalcih ali optičnih litografskih zapisovalnikih.

Z vklapljanjem in izklopjanjem zvočnega valovanja, ki ga vzbujamo s piezoelektričnim elementom, na katerega pritisnemo izmenično napetost, lahko moduliramo intenziteto direktnega svetlobnega snopa. To potrebujemo na primer pri preklapljanju kvalitete laserskega resonatorja.

Tretji primer uporabe je spremjanje frekvence svetlobe. Možne so spremembe do nekaj 100 MHz, kar je ravno primerno za uporabo v laserskih merilnikih hitrosti, kjer merimo frekvenco utripanja med referenčno svetobo in svetobo, odbito od merjenega predmeta. Če ima referenčna svetloba isto frekvenco kot merilni snop, ni mogoče določiti predznaka hitrosti predmeta, če pa referenčni svetlobi nekoliko spremenimo frekvenco, se pojavi utripanje tudi tedaj, ko predmet miruje. Frekvencia utripanja se poveča ali zmanjša glede na predznak hitrosti predmeta.

Naslednja pomembna uporaba je za uklepanje faz v laserskem resonatorju. Če je v Braggovem elementu prisotno stopeče zvočno valovanje, je amplituda direktnega snopa modulirana s frekvenco zvoka. Kadar je frekvanca zvoka ravno enaka razmiku frekvenc laserskih nihanj, lahko nastanejo uklenjene faze vzbujenih nihanj in s tem kratki, periodični sunki svetlobe.

Zanimiva je tudi uporaba Braggovega elementa za izdelavo hitrega frekvenčnega analizatorja električnih signalov. Piezoelektrični element vzbujamo z električnim signalom, ki ima neznan spekter. Enak spekter imajo tudi vzbujeni zvočni valovi, pri čemer vsakemu valu določene frekvence ustrezata določen kot odklona svetlobnega snopa. Za Braggovim elementom postavimo lečo. Vsak delni uklonjeni snop da v goriščni ravnini svetlo točko, katere položaj je odvisen od kota odklona in torej od frekvence zvočnega vala. Spekter zaznamo z vrstičnim detektorjem. Akusto-optični element oziroma Braggova celica torej frekvenčni spekter zvočnih valov prevede v prostorski spekter prepuščene svetlobe. Prostorski spekter svetlobe pa lahko analiziramo z lečo, ki nam v goriščni ravnini da prostorsko Fourierovo transformacijo svetlobnega snopa pred lečo.

## 9.8 \*Račun akusto-optičnega pojava

Izračunajmo intenziteto svetlobe, ki se uklanja na zvočnem valovanju. Izhajamo iz valovne enačbe v nehomogenem sredstvu, kar je dokaj težaven problem in se moramo zateči k približkom. Uporabili bomo metodo sklopljenih valov.

Naj vzporeden snop zvočnega valovanja s širino  $d$  in valovnim vektorjem  $\mathbf{q}$  potuje v smeri  $x$ . Nanj pod kotom  $\vartheta$  glede na os  $z$  vpada ravno svetlobno valovanje z valovnim vektorjem  $\mathbf{k} = (k_x, 0, k_z) = k(\sin \vartheta, 0, \cos \vartheta)$ . Vse valovanje, vpadno na levi od zvočnega snopa in izhodno na njegovi desni, obravnavajmo znotraj snovi, da nam ni treba upoštevati še loma, ki le zaplete izraze.

Privzemimo, da se v snovi zaradi zvočnih valov spremeni le velikost dielektrične konstante. Ob upoštevanju zveze med spremembijo dielektričnosti in deformacijo v zvočnem valu (enačba 9.52) lahko spremembu dielektričnosti zapišemo kot

$$\epsilon = \tilde{\epsilon} + \Delta\epsilon = \tilde{\epsilon} - \tilde{\epsilon}^2 p S_0 \sin(qx - \Omega t). \quad (9.63)$$

Zaradi spremembe dielektričnosti pride do pojava dodatne polarizacije  $\Delta P$

$$\Delta P = \epsilon_0 \Delta \epsilon E = -\epsilon_0 \tilde{\epsilon}^2 p S_0 \sin(qx - \Omega t) E. \quad (9.64)$$

Dodatna polarizacija v valovno enačbo doprinese dodaten nehomogen člen, podobno kot pri nelinearni optiki (enačba 8.11). Zapišemo

$$\nabla^2 E - \frac{\tilde{\epsilon}}{c^2} \frac{\partial E^2}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial t^2}, \quad (9.65)$$

pri čemer smo privzeli, da je  $\nabla \cdot \mathbf{E} \approx 0$ , čeprav je  $\epsilon$  funkcija kraja.

Enačbo (9.65) brez dodane polarizacije  $\Delta P$  rešijo ravni valovi z valovnim vektorjem  $\mathbf{k}$  in frekvenco  $\omega$ . Tej rešitvi se primešajo valovi z valovnim vektorjem  $\mathbf{k} \pm n\mathbf{q}$  in frekvenco  $\omega \pm n\Omega$ . Zato iščemo rešitve v obliki vsote ravnih valov, torej Fouriereve vrste

$$E = \sum_n A_n(z) e^{in(qx - \Omega t)} e^{i(k_x x + k_z z - \omega t)}. \quad (9.66)$$

Zaradi sklopite preko  $\Delta P$  smo dopustili, da so amplitude  $A_n$  funkcije  $z$ . Če je  $\Delta\epsilon$  dovolj majhen, se  $A_n(z)$  le počasi spreminjajo.

Izračunajmo

$$\nabla^2 E = \sum_n \left( -[k_z^2 + (k_x + nq)^2] A_n(z) + 2ik_z A'_n(z) \right) e^{i[(k_x + nq)x + k_z z - (\omega + n\Omega)t]}. \quad (9.67)$$

Člene z  $A''_n$  lahko izpustimo, če je le  $k_z A'_n \gg A''_n$  oziroma kadar se  $A_n$  spreminjajo počasi v primerjavi z  $\exp(ik_z z)$ . Drugi odvod polarizacije po času da

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \Delta P}{\partial t^2} &= -\frac{\epsilon_0 \tilde{\epsilon}^2 p S_0}{2i} A_n(z) \exp(i[(k_x + nq)x + k_z z - (\omega + n\Omega)t]) \cdot \\ &\quad \sum_n \left( -[n\Omega + \omega + \Omega]^2 e^{i(qx - \Omega t)} + [n\Omega + \omega - \Omega]^2 e^{i(-qx + \Omega t)} \right), \end{aligned} \quad (9.68)$$

drugi odvod polja po času pa

$$\frac{\partial E^2}{\partial t^2} = -(n\Omega + \omega)^2 \sum_n A_n(z) e^{in(qx - \Omega t)} e^{i(k_x x + k_z z - \omega t)}. \quad (9.69)$$

Vstavimo izraze (9.67), (9.68) in (9.69) v valovno enačbo (9.65) in izenačimo člene z isto časovno in prostorsko frekvenco, na primer s  $k_z z + (k_x + mq)x - (\omega + m\Omega)t$ . Tako dobimo

$$-[k_z^2 + (k_x + mq)^2]A_m + 2ik_z A'_m + \frac{\tilde{\epsilon}}{c^2}(m\Omega + \omega)^2 A_m = \quad (9.70)$$

$$= \frac{\mu_0 \epsilon_0 \tilde{\epsilon}^2 p S_0}{2i} (\omega + m\Omega)^2 (A_{m-1} - A_{m+1}). \quad (9.71)$$

Upoštevamo, da je

$$k_x^2 + k_z^2 = k^2 = \frac{\tilde{\epsilon} \omega^2}{c^2} \quad (9.72)$$

in naredimo približek  $(\omega + m\Omega)^2 \approx \omega^2$ . Sledi

$$A'_m + i\beta_m A_m + \xi (A_{m+1} - A_{m-1}) = 0, \quad (9.73)$$

kjer sta

$$\beta_m = \frac{mq}{k_z} \left( k_x + \frac{1}{2} mq \right) \quad (9.74)$$

in

$$\xi = -\frac{\tilde{\epsilon} p S_0 k^2}{4k_z}. \quad (9.75)$$

Reševanje sistema enačb (9.73) je težavno, zato poiščimo rešitve le v treh pomembnih limitnih primerih. Amplituda vala, ki vpada z leve, naj bo  $A_0(0) = A_0$ , za ostale pa naj velja  $A_n(0) = 0$ .

Najprej privzemimo, da je  $L\xi \ll 1$ , da je torej velikost  $\Delta\epsilon$  majhna in debelina zvočnega snopa ne prevelika. Tedaj je pri vseh  $z$  in za pozitivne  $m$   $A_{m+1} \ll A_m$  in lahko člen  $A_{m+1}$  v enačbi (9.73) izpustimo. S tem zapišemo preprost sistem enačb

$$A'_m + i\beta_m A_m = \xi A_{m-1}, \quad (9.76)$$

ki jih lahko zapored integriramo:

$$A_m(z) = \xi e^{-i\beta_m z} \int_0^z A_{m-1}(z') e^{i\beta_m z'} dz'. \quad (9.77)$$

Podobne izraze izpeljemo za negativne  $m$ .

Poglejmo posebej prvi uklonjeni val z amplitudo  $A_1$ . Po predpostavki, da je  $A_{\pm 1} \ll A_0$ , se le malo energije uklanja iz osnovnega vala in lahko privzamemo, da je  $A_0(z)$  skoraj konstanta. Potem lahko integral v enačbi (9.77) izračunamo

$$A_1(d) = A_0 \xi d \frac{\sin \beta_1 d / 2}{\beta_1 d / 2} e^{-i\beta_1 d / 2}, \quad (9.78)$$

pri čemer je  $d$  debelina plasti zvočnega valovanja. Funkcija  $A_1(d)$  ima vrh pri  $\beta_1 = 0$ , to je po enačbi (9.74) pri

$$k_x + \frac{q}{2} = k \sin \vartheta + \frac{q}{2} = 0 \quad \text{ali} \quad 2\Lambda \sin \vartheta = -\lambda. \quad (9.79)$$

Vidimo, da predstavlja  $\beta_1 = 0$  ravno pogoj za Braggovo sisanje vpadnega vala.

Delež moči uklonjenega vala je potem

$$\frac{I_1}{I_0} = \left| \frac{A_1}{A_0} \right|^2 = (\xi d)^2 \left( \frac{\sin \beta_1 d / 2}{\beta_1 d / 2} \right)^2. \quad (9.80)$$

Če je Braggov pogoj izpolnjen, je  $I_1/I_0 = (\xi d)^2$ , kar lahko velja le, dokler je  $\xi d \ll 1$ . Kadar intenziteta uklonjenega žarka tako naraste, da ta pogoj ni več izpolnjen, je treba v računu upoštevati tudi zmanjšanje moči vpadnega snopa.

Drug primer naj bo približek, da sta le  $A_0$  in  $A_1$  različni od nič, opustimo pa omejitve  $d\xi \ll 1$ . Ta približek je smiseln, saj je Braggov pogoj hkrati lahko izpolnjen le za en uklonjen val, na primer  $m = 1$ . Tedaj so vse ostale amplitude  $A_{m,m \neq 0,1}$  majhne in ne vplivajo na  $A_1$ . Zaradi velike pretvorbe  $A_0(z)$  ne smemo več obravnavati kot konstante. Upoštevamo izpolnjen Braggov pogoj (enačba 9.79) in iz sistema enačb (9.73) dobimo

$$\begin{aligned} A'_0 + \xi A_1 &= 0 \\ A'_1 - \xi A_0 &= 0. \end{aligned} \quad (9.81)$$

Ob začetnih pogojih  $A_0(0) = A_0$  in  $A_1(0) = 0$  sta rešitvi gornjih enačb

$$A_0(d) = A_0 \cos(\xi d) \quad (9.82)$$

in

$$A_1(d) = A_0 \sin(\xi d). \quad (9.83)$$

Če je izpolnjen Braggov pogoj, se moč vpadnega vala na razdalji  $\pi/(2\xi)$  skoraj vsa pretoči v uklonjeni snop, nato pa zopet nazaj (slika 9.11). Za čim bolj učinkovito delovanje akusto-optičnega modulatorja seveda želimo doseči ravno take pogoje.



Slika 9.11: Intenziteta prepuščenega in uklonjenega valovanja na zvočnem valovanju v odvisnosti od debeline plasti zvočnega valovanja

V gornja izraza vstavimo še parameter  $\xi$ , ki je podan z enačbo (9.75). Razmerje med močjo uklonjenega in vpadnega snopa je tako

$$\frac{I_1}{I_0} = \sin^2 \left( \frac{\pi n_0^3 p S_0 d}{2\lambda \cos \vartheta} \right). \quad (9.84)$$

Amplituda deformacije  $S_0$  je povezana z gostoto energijskega toka zvočnega valovanja

$$j_z = \frac{1}{2} C S_0^2 v_z, \quad (9.85)$$

kjer je  $C$  elastična konstanta snovi,  $v_z$  pa hitrost zvoka v snovi. Iz zveze  $v_z^2 = C/\rho$  izrazimo  $C$  z gostoto  $\rho$ , s čemer dobimo

$$S_0 = \sqrt{\frac{2j_z}{\rho v_z^3}}. \quad (9.86)$$

Praktično je vpeljati merilo uporabnosti neke snovi za akusto-optični modulator. To je koeficient

$$M = \frac{n_0^6 p^2}{\rho v_z^3}. \quad (9.87)$$

Večja kot je njegova vrednost, bolj izrazit je akusto-optični pojav v dani snovi.

Poglejmo primer. V kremenu z gostoto  $\rho = 2,2 \cdot 10^3 \text{ kg/m}^3$  je hitrost zvoka  $v_z = 6000 \text{ m/s}$ ,  $\tilde{n} = 1,46$  in  $p = 0,2$ . To da  $M = 8 \cdot 10^{-16} \text{ W/m}^2$ . Pri gostoti zvočnega toka  $10 \text{ W/cm}^2$  in valovni dolžini svetlobe  $633 \text{ nm}$  pride do popolnega prenosa moči v uklonjeni snop pri debelini  $d = 3 \text{ cm}$ . Gornja gostota zvočnega toka je kar velika in je ni prav lahko doseči, zato so uklonski izkoristki navadno nekaj manjši od 1.

Izračunajmo še kot odklona uklonjenega vala  $\theta = 2\vartheta$

$$\theta \approx \frac{q}{k} = \frac{\lambda}{\tilde{n}\Lambda} = 1,7 \cdot 10^{-3}. \quad (9.88)$$

Uklonski kot je torej precej majhen.

 Opisani račun izkoristka uklona na zvočnih valovih je uporaben tudi pri računu izkoristka holograma. V primeru faznega holograma je račun povsem enak in nam kaže tudi razliko med tankim in debelim hologramom, kako pa je z izkoristkom amplitudnega holograma, kjer je modulirana absorpcija v snovi, lahko bralec izračuna sam.<sup>7</sup>

Oglejmo si še tretji primer. Izhajamo iz sistema enačb (9.73), ki smo ga zaenkrat rešili za primer Braggovega odboja oziroma v njegovi bližini. Enačbe je preprosto rešiti še v primeru Raman-Nathovega približka. Vpeljimo novo neodvisno spremenljivko  $\zeta = 2\xi z$ . Zveza (9.73) preide v

$$2 \frac{dA_m(\zeta)}{d\zeta} + A_{m+1}(\zeta) - A_{m-1}(\zeta) = \frac{\beta_m}{i\xi} A_m. \quad (9.89)$$

Člen na desni lahko izpustimo, če je

$$\frac{\beta_m}{\xi} = \left| \frac{4mq}{\tilde{\epsilon} p S_0 k} (\sin \vartheta + \frac{mq}{2k}) \right| \ll 1, \quad (9.90)$$

ozioroma če je valovna dolžina zvoka dovolj velika v primerjavi z valovno dolžino svetlobe. Potem v enačbi (9.89) prepoznamo rekurzivsko zvezo za Besselove funkcije

$$2J'_n + J_{n+1} - J_{n-1} = 0 \quad (9.91)$$

z rešitvijo  $A_m(z) = A_0 J_m(2\xi z)$ . Kadar je  $2\xi d$  ničla funkcije  $J_0$ , prvič je to pri  $2\xi d \approx 2.4$ , se vsa energija ukloni iz vpadnega snopa, vendar se v tem primeru, ko Braggov pogoj ni izpolnjen, razporedi v mnogo uklonjenih snopov.

<sup>7</sup>Glej H. Kogelnik, Bell Syst. Tech. J. 48, 2909 (1969).

### 9.9 Modulacija s tekočimi kristali

Za konec opišimo še modulacijo svetlobe s tekočimi kristali. Tekoči kristali so anizotropne kapljevine in so vmesna faza med navadnimi izotropnimi kapljevinami in kristali. Tekoče kristale tvorijo podolgovate ali ploščate molekule, ki imajo različne stopnje urejenosti. Omejimo se najosnovnejši primer, to je podolgovate organske molekule v nematski fazi tekočega kristala. Navadno so to molekule z relativno togim jedrom iz dveh ali treh benzenovih obročev, ki imajo na koncih krajše ali daljše alifatske verige (slika ??). V nematski fazi so težišča molekul neurejena, enako kot v navadni tekočini, osi molekul pa so v povprečju urejene v določeno smer. Smer povprečne urejenosti opišemo z enotnim vektorjem  $\mathbf{n}$ , ki mu rečemo direktor. Smeri  $\mathbf{n}$  in  $-\mathbf{n}$  sta enakovredni, saj molekule z enako verjetnostjo kažejo v smeri  $+\mathbf{n}$  kot v  $-\mathbf{n}$ . Stopnja urejenosti v mikroskopski sliki ni prav velika, povprečen odklon molekul od  $\mathbf{n}$  je nekaj deset stopinj.

Ker so molekule v povprečju urejene, se nematski tekoči kristal obnaša kot enoosen dvolumni kristal, njegova optična os pa je vzporedna z  $\mathbf{n}$ . Ker je optična polarizabilnost benzenovih obročev vzdolž osi molekul precej večja kot v prečni smeri, je razlika med rednim in izrednim lomnim količnikom razmeroma velika, navadno med 0,1 in 0,2.

V makroskopskem vzorcu nematskega tekočega kristala se v splošnem smer direktorja  $\mathbf{n}$  po vzorcu neurejeno spreminja. Energija takega deformiranega stanja je nekoliko večja od energije homogenega urejenega stanja, zato na delček tekočega kristala okolica deluje z navorom v smeri zmanjševanja nehomogenosti  $\mathbf{n}$ . Temu pojavi, značilnemu za tekoče kristale, pravimo orientacijska elastičnost. Ti ti elastični navori so prešibki, da bi uredili razsežne neurejene vzorce. Urejene vzorce, kakršne potrebujemo v optičnih elementih, pripravimo v zunanjem polju ali pa dovolj tanke, da mejne površine vsilijo ureditev v celiem vzorcu. Poglejmo, kako.

Na ureditev molekul tekočega kristala vpliva zunanje električno ali magnetno polje. Električna in magnetna susceptibilnost nematskega tekočega kristala nista skalarja, temveč imata dve različni lastni vrednosti, eno v za smer vzporedno z  $\mathbf{n}$ , drugo za pravokotno nanj. Zato je elektrostatična energija odvisna od kota med zunanjim poljem  $\vec{E}$  in  $\mathbf{n}$ . Kotno odvisni del energije lahko zapišemo v obliki

$$w_a = -\frac{1}{2} \epsilon_0 \epsilon_a (\mathbf{E} \cdot \mathbf{n})^2, \quad (9.92)$$

kjer je  $\epsilon_a = \epsilon_{||} - \epsilon_{\perp}$  anizotropni del dielektrične konstante. Če je  $\epsilon_a > 0$ , se molekule skušajo zasukati v smer polja, če je  $\epsilon_a < 0$ , pa pravokotno nanj.

Urejen vzorec je mogoče narediti tudi v tankih plasteh. Če površino, ki je v stiku s tekočim kristalom, prevlečemo z primerno pastjo, se molekule tekočega kristala tik ob površini na določen način uredijo. Tanka plast najlona, ki jo podrgnemo v željeni smeri, povzroči, da je  $\mathbf{n}$  ob površini vzporeden s površino v smeri drženja. Drženje deloma uredi verige najlona, zato se tudi molekule tekočega kristala raje uredijo v isti smeri. Da je  $\mathbf{n}$  pravokoten na površino, dosežemo na primer s tanko plastjo lecitina ali surfaktanta silana. Ta imata polarno glavo, ki se adsorbira na stekleno površino, in alifatsko verigo, ki stoji približno pravokotno na površino. Zato se tudi alifatski repi molekul tekočega kristala uredijo enako. V obeh primerih, vzporedni ali pravokotni orientaciji ob steni, se urejenost zaradi orientacijske elastičnosti ohranja tudi stran od stene, tako da lahko brez težav naredimo urejene vzorce debeline do kakih  $200 \mu\text{m}$ . Pri večjih debelinah so elastični navori prešibki in v vzorcu nastanejo defekti.

Struktura tekočekristalnega vzorca je tako odvisna od orientacijske elastičnosti, od robnih pogojev, ki jih določimo z obdelavo mejne površine, in od zunanjega električnega ali magnetnega polja.

Preprost elektro-optični modulator ali kazalnik na osnovi nematskih tekočih kristalov naredimo takole. Vzemimo vzorec tekočega kristala med dvema stekloma, na katerih sta prozorni elektrodi. Ureditev tekočega kristala naj bo vzporedna s površino stekel. Tudi optična os ima isto smer. Dovolj velika napetost zasuče  $\mathbf{n}$  in s tem optično os pravokotno na stene, razen tik ob površini. Pri debelini okoli  $10 \mu\text{m}$  je potrebna napetost nekaj voltov.

Naj debelina  $h$  obravnavane plasti za izbrano valovno dolžino svetlobe ustreza pogoju

$$h(n_i - n_r) = (2N + 1) \frac{\lambda}{2}, \quad (9.93)$$

kjer je  $N$  celo število. Plast torej deluje kot ploščica  $\lambda/2$ . Ker je  $n_i - n_r \simeq 0,1$ , je potrebna debelina nekaj  $\mu\text{m}$ . Vzorec damo med prekrižana polarizatorja s prepustno smerjo  $45^\circ$  na  $\mathbf{n}$ . Ploščica polarizacijo svetlobe z izbrano valovno dolžino zasuče za  $90^\circ$ , tako da gre svetlobe tudi skozi analizator. Ko vključimo napetost, se optična os obrne, polarizacija svetlobe se pri prehodu skozi plast ohrani in analizator je ne prepusti.

Tak preklopnik ima nekaj slabih lastnosti. Prepustnost je odvisna od valovne dolžine svetlobe in od temperature in debelina preklopnika mora biti povsod enaka. Zato se v praksi uporablja zasukana nematska plast.

Obrnimo eno od stekel za  $90^\circ$ , tako da sta smeri urejanja na obeh mejah med seboj pravokotni. Tedaj se smer  $\mathbf{n}$  v plasti zvezno zavrti od ene do druge površine, kot kaže slika ???. Polarizacija svetlobe, ki je ob vstopu v plast polarizirana v smeri urejanja, skozi plast približno sledi smeri  $\mathbf{n}$ , kot bomo pokazali nekoliko kasneje, in je ob izstopu iz plasti polarizirana pravokotno na vpadno polarizacijo. Z električnim poljem preklopimo optično os pravokotno na plast in polarizacija se ne zasuče. Plast med prekrižanima polarizatorjem brez polja prepušča svetlobo, v polju pa ne. Pri tem delovanje kazalnika ni dosti odvisno niti od debeline plasti niti od valovne dolžine. Kadar želimo, da kazalnik deluje v odbiti svetlobi, damo za zadnji analizator še odbojno površino.

Pri kristalnem elektro-optičnem modulatorju smo lahko dobili tudi vmesne prepustnosti, medtem ko s tekočimi kristali na opisan način lahko dosežemo le zaprto in odprto stanje, vmesna stanja pa je zelo težko kontrolirati.

Pokažimo še, da polarizacija v sredstvu, ki je lokalno enoosno in se optična os suče v pravokotni smeri, v določenih pogojih res približno sledi optični osi. Poleg zasukane nematske celice je pomemben primer snovi s takimi lastnostmi holesteričen tekoči kristal, ki je zelo podoben nematskim, le da se  $\mathbf{n}$  spontano počasi suče okoli smeri, pravokotne na  $\mathbf{n}$ .

Optična os sredstva naj leži v ravnini  $xy$  in naj se enakomerno suče, ko se premikamo vzdolž osi  $z$ . Kot med optično osjo in osjo  $x$  lahko zapišemo

$$\phi = qz. \quad (9.94)$$

Pri tem je  $2\pi/q$  perioda sukanja optične osi. Zanimajmo se le za širjenje svetlobe v smeri  $z$ . Tedaj potrebujemo le del dielektričnega tenzorja v  $xy$  ravnini. Njegova oblika je

$$\boldsymbol{\epsilon}(z) = \begin{bmatrix} \bar{\epsilon} + \frac{1}{2}\epsilon_a \cos 2\phi & \frac{1}{2}\epsilon_a \sin 2\phi \\ \frac{1}{2}\epsilon_a \sin 2\phi & \bar{\epsilon} + \frac{1}{2}\epsilon_a \cos 2\phi \end{bmatrix}, \quad (9.95)$$

kjer je

$$\bar{\epsilon} = \frac{\epsilon_{||} + \epsilon_{\perp}}{2} \quad (9.96)$$

Valovna enačba za valovanje s frekvenco  $\omega$  je

$$\frac{d^2\mathbf{E}}{dz^2} = -\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon(z) \mathbf{E} \quad (9.97)$$

ali v komponentah

$$\begin{aligned} -\frac{d^2E_x}{dz^2} &= (\beta^2 + \alpha^2 \cos 2qz) E_x + \alpha^2 E_y \sin 2qz \\ -\frac{d^2E_y}{dz^2} &= \alpha^2 E_x \sin 2qz + (\beta^2 + \alpha^2 \cos 2qz) E_y, \end{aligned} \quad (9.98)$$

kjer je  $\alpha^2 = \epsilon_a \omega^2 / (2c^2)$  in  $\beta^2 = \bar{\epsilon} \omega^2 / c^2$ .

Ugodno je vpeljati krožni polarizaciji  $E_+ = E_x + iE_y$  in  $E_- = E_x - iE_y$ . Enačbi ?? prejeta v

$$\begin{aligned} -\frac{d^2E_+}{dz^2} &= \beta^2 E_+ + \alpha^2 E_- e^{2iqz} \\ -\frac{d^2E_-}{dz^2} &= \alpha^2 E_+ e^{-2iqz} + \beta^2 E_-. \end{aligned} \quad (9.99)$$

Iščemo lastne rešitve valovne enačbe v sredstvu s periodično modulacijo lomnega količnika. Matematično podoben problem je iskanje lastnih funkcij elektronov v kristalu. Za te vemo, da morajo imeti Blochovo obliko, to je, biti morajo produkt periodične funkcije s periodo kristalne mreže in faktorja  $\exp(ikz)$ . Matematiki pravijo tej trditvi Floquetov izrek. Veljati mora tudi v našem primeru. Lastne valove torej poiščimo v obliki

$$\begin{aligned} E_+ &= Ae^{i(k+q)z} \\ E_- &= Be^{i(k-q)z}. \end{aligned} \quad (9.100)$$

Nastavek reši sistem ??, če  $A$  in  $B$  rešita sistem homogenih linearnih enačb

$$\begin{aligned} [(k+q)^2 - \beta^2]A - \alpha^2 B &= 0 \\ -\alpha^2 A + [(k-q)^2 - \beta^2]B &= 0. \end{aligned} \quad (9.101)$$

Sistem je netrivialno rešljiv, če je determinanta koefficientov enaka nič:

$$(k^2 + q^2 - \beta^2)^2 - 4k^2 q^2 - \alpha^4 = 0. \quad (9.102)$$

$\beta$  in  $\alpha$  sta sorazmerna z  $\omega$ . Dobljena enačba tako predstavlja disperzijsko relacijo - zvezo med  $\omega$  in  $k$  - za svetlobo v zavitem sredstvu. Prikazana je na sliki ???. Vsaki vrednosti  $\omega$ , razen v ozkem območju med  $\omega_-$  in  $\omega_+$ , recimo mu frekvenčna špranja, pripadajo 4 realne rešitve za  $k$ , po dve za valovanji v pozitivni in negativni smeri. V območju špranje je en par rešitev imaginaren. Vsaki vrednosti  $k$  pripada neko razmerje koefficientov  $A$  in  $B$ , ki ga izračunamo iz enčb ?? in ki določa polarizacijo lastnega vala. Polarizacije lastnih valov so v splošnem eliptične in med pri dani frekvenci med seboj niso pravokotne, kar je posledica tega, da sistem ?? ne predstavlja čisto navadnega problema lastnih vektorjev simetrične matrike. V območju frekvenčne špranje le en par rešitev predstavlja potupoč val, drug pa polje, ki eksponentno pojema v sredstvo. Zato se svetloba s frekvenco v špranji in z ustrezno polarizacijo, ki vpada na holesteričen tekoči kristal, totalno odbije. Pojav je povsem analogen Braggovemu odboju na kristalih in daje holesterikom značilen obarvan videz. Več o zanimivih podrobnostih optike holesteričnih tekočih kristalov najde bralec v ?? in nalogah k temu poglavju.(nalogi)

Za razlago delovanja zasukane nematske celice zadošča primer, ko je  $q \ll \beta$  in  $\alpha$ , ko je torej perioda sukanja optične osi velika v primeri z valovno dolžino svetlobe. Tedaj lahko  $q$  v

disperzijski zvezi kar zanemarimo, prvi popravek je šele reda  $q^2$ , in dobimo

$$k^2 = \left\{ \beta^2 + \alpha^2 = \frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_{\parallel} \right. \quad (9.103)$$

Ti vrednosti, ki ustrezata velikosti valovnega vektorja za izredni in redni val v običajnem enoosnem kristalu, postavimo v eno od enačb ?? in izračunamo še polarizaciji lastnih valov:  $B = \pm A$ .

Izračunajmo obe kartezični komponenti električnega polja za prvo rešitev:

$$\begin{aligned} E_x &= \frac{1}{2}(E_+ + E_-) = \frac{1}{2}Ae^{ikz}(e^{iqz} + e^{-iqz}) = Ae^{ikz} \cos qz \\ E_y &= \frac{1}{2}(E_+ - E_-) = \frac{1}{2i}Ae^{ikz}(e^{iqz} - e^{-iqz}) = Ae^{ikz} \sin qz \end{aligned} \quad . \quad (9.104)$$

Polarizacija torej res kar sledi optični osi. Druga rešitev da val, ki je polariziran pravokotno na lokalno optično os in se prav tako suče z njo. Prvi val se širi s fzano hitrostjo  $c/n_i$ , torej kot izredni val, drugi pa s  $c/n_r$ , to je kot redni val. Če na zasukano nematsko celico vpada svetloba, polarizirana ali paralelno ali pravokotno na optično os ob meji, se pojavi na izhodni strani polarizacija, zasukano za pravi kot. V primeru, da vpadna polarizacija ne sovpada z eno od lastnih, jo moramo seveda razstaviti na obe lastni in po prehodu skozi tekoči kristal zopet sestaviti, s čemer seveda na splošno nastane eliptično polarizacijo.

## 9.10 Dodatek

Energija nematskega tekočega kristala je najnižja, kadar ima  $\mathbf{n}$  povsod isto smer. Povečanje energije zaradi krajevne odvisnosti  $\mathbf{n}$  je v najnižjem redu sorazmerno s  $(\nabla \mathbf{n}(\mathbf{r}))^2$ . Najsplonejši izraz za it orientacijsko elastično energijo zapišemo tako, da tvorimo vse neodvisne člene, v katerih nastopa  $(\nabla \mathbf{n}(\mathbf{r}))^2$  in ki so invariantni na simetrijske operacije nematske faze. Sledi[?]

$$F_e = \int \{ K_1 (\nabla \cdot \mathbf{n})^2 + K_2 [\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n})]^2 + K_3 [\mathbf{n} \cdot (\nabla \times \mathbf{n})]^2 \} dV \quad (9.105)$$

$K_1, K_2$  in  $K_3$  so tri Frankove orientacijske elastične konstante. Prvi člen predstavlja deformacijo v obliki pahljače, drugi upogib, tretji pa zasuk (slika ??)

V zunanjem električnem polju se energija spremeni. Običajno je neodvisna električna količina električna poljska jakost, ker je polje posledica predpisanih napetosti na fiksni elektrodah. Ustrezni člen v termodinamičnem potencialu je tedaj  $-\mathbf{D} \cdot \mathbf{E}/2$ . E razstavimo na komponento, paralelno in pravokotno z  $\mathbf{n}$ . Dielektrični tenzor ima v smeri  $\mathbf{n}$  vrednost  $\epsilon_{\parallel}$ , v pravokotni smeri pa  $\epsilon_{\perp}$ . Tako je

$$\begin{aligned} \mathbf{D} &= \epsilon_0 \underline{\epsilon} \mathbf{E} = \epsilon_0 \epsilon_{\parallel} (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{n} + \epsilon_0 \epsilon_{\perp} [\mathbf{E} - (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{n}] \\ &= \epsilon_0 \epsilon_a (\mathbf{n} \cdot \mathbf{E}) \mathbf{n} - \epsilon_0 \epsilon_{\perp} \mathbf{E}, \end{aligned} \quad (9.106)$$

kjer je  $\epsilon_a = \epsilon_{\parallel} - \epsilon_{\perp}$ . Drugi člen je neodvisen od  $\mathbf{n}$ , zato ga lahko izpustimo. Prosta energija nematičnega tekočega kristala v električnem polju je tako

$$F = F_0 + F_e - \frac{1}{2}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{E})^2. \quad (9.107)$$

$F_0$  predstavlja del proste energije, ki je neodvisen od  $\mathbf{n}$  in  $\mathbf{E}$ . V ravnovesju je prosta energija najmanjša. Kadar je  $\epsilon_a > 0$ , se zato skuša  $\mathbf{n}$  postaviti vzporedno s poljem. Da lahko z minimizacijo  $F$  izrazimo  $\mathbf{n}(\mathbf{r})$ , moramo poznati še robne pogoje.

Poglejmo primer. Naj bo nematski kristal med dvema paralelnima steklenima ploščama v razmiku  $h$ . Na obeh ploščah naj bo  $\mathbf{n}$  vzporeden s površino v isti smeri. Brez zunanjega polja je  $\mathbf{n}$  povsod enako usmerjen. V dovolj velike zunanjem polju, pravokotnem na plošči, naj bo to smer  $z$ , dobi  $\mathbf{n}$  komponento v smeri  $z$ :

$$\mathbf{n}(z) = (n_1(z), 0, n_3(z)) . \quad (9.108)$$

Deformacija  $n_3$  naj bo majhna. Tedaj je  $n_1 = 1n_3^2/2$ . Robna pogoja sta  $n_3(0) = n_3(h) = 0$ . Približno rešitev, ki ustreza robnima pogojem, poiščemo z nastavkom

$$n_3(z) = a \sin qz , \quad q = \frac{\pi}{h} . \quad (9.109)$$

Ta nastavek je prvi člen razvoja prave rešitve v Fourierovo vrsto. Velja

$$\nabla \times \mathbf{n} = (0, -\frac{dn_1}{dz}, 0) \quad (9.110)$$

in

$$\mathbf{n} \times (\nabla \times \mathbf{n}) = (n_3 \frac{dn_1}{dz}, 0, n_1 \frac{dn_3}{dz}) \simeq (0, 0, n_3 \frac{dn_3}{dz}) \quad (9.111)$$

do drugega reda v  $n_3$ . Prosta energija je tako

$$\begin{aligned} F &= \frac{1}{2} \int \left[ K_1 \left( \frac{dn_3}{dz} \right)^2 + K_2 n_3^2 \left( \frac{dn_3}{dz} \right)^2 - \epsilon_0 \epsilon_a (n_3 E)^2 \right] dz = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^h [K_1 q^2 a^2 \cos^2 qz + K_3 q^2 a^4 \sin^2 qz \cos^2 qz - \epsilon_0 \epsilon_a E a^2 \sin^2 qz] dz = \\ &= \frac{\pi}{4q} [K_1 q^2 a^2 + \frac{1}{4} K_3 q^2 a^4 - \epsilon_0 \epsilon_a E a^2] . \end{aligned} \quad (9.112)$$

Iščemo amplitudo deformacije  $a$ , pri kateri je prosta energija najmanjša. Tedaj mora biti  $a$  rešitev enačbe

$$(K_1 q^2 - \epsilon_0 \epsilon_a E) a + \frac{1}{2} K_3 q^2 a^3 = 0 . \quad (9.113)$$

Rešitvi sta

$$a = 0 \quad \text{in} \quad a^2 = 2 \frac{\epsilon_0 \epsilon_a E - K_1 q^2}{K_3 q^2} . \quad (9.114)$$

Pri majhnih poljih, ko je  $\epsilon_0 \epsilon_a E < K_1 q^2$ , je fizikalno smiselna le prva rešitev, ko deformacije ni. Pri večjih poljih pa je stabilna druga rešitev. Ko večamo polje, deformacija v sredini plasti hitro naraste, tako da se  $\mathbf{n}$  postavi skoraj popolnoma v smer zunanjega polja. Tedaj naša rešitev seveda ni dobra, saj smo računali, kot da je  $n_3 \ll 1$ . Prehodu iz nedefomiranega stanja v deformirano stanje pravimo tudi Fredericksov prehod. Na njem je osnovano preklapanje optičnih kazalnikov na nematske tekoče kristale.

V primeru zasukane nematske celice je prehod podoben, le račun je nekoliko bolj zapleten, ker ima deformacija vse tri komponente, tudi zasuk (Naloga).

## 10. Optična vlakna

Optična vlakna vodijo svetlobno valovanje s tem, da se na meji med sredico z večjim lomnim količnikom in plaščem valovanje totalno odbije. So torej dielektrični valovni vodniki za svetlobo. Njihove prednosti pred bakrenimi vodniki v komunikacijski tehnologiji so bistveno večja količina informacij, ki jo je mogoče prenašati po enem vlaknu, majhne izgube in neobčutljivost na elektromagnetne motnje. Zato danes v veliki meri nadomeščajo kovinske vodnike, posebej v medkrajevni telefoniji in računalniških povezavah.

Njenostavnejši model optičnega vodnika je planparalelna plast prozornega dielektrika z lomnim količnikom  $n_1$  večjim od okolice (slika ??). Plasti z večjim lomnim količnikom recimo sredica, okolici pa plasč vlakna. Žarek je ujet v sredici, če je vpadni kot  $\theta$  večji od kota totalnega odboja, za katerega velja  $\sin \theta_c = n_0/n_1$ . Količini  $\sin(\pi/2 - \theta_c)$ , ki določa največji kot divergence svetlobnega snopa, ki je še ujet v vlaknu, pravimo *numerična odprtina* vlakna. Razlika lomnih količnikov  $n_1 - n_0 = \Delta n$  je običajno dokaj majhna, to je le nekaj stotink.

Za podroben opis širjenja svetlobe po vlaknih, ki imajo običajno polmer sredice od nekaj do nekaj deset mikrometrov, geometrijska optika ne zadošča. Rešiti moramo Maxwellove enačbe z ustreznimi robnimi pogoji, kar je za praktična vlakna dokaj dolg račun. Ugotovimo najprej, kakšne so osnovne značilnosti valovanja po vlaknu.

Geometrijskemu žarku, ki potuje po sredici pod kotom in se na meji odbija, ustreza v valovni sliki val, ki ima prečno komponento valovnega vektorja različno  $k_{\perp}$  od nič. Kot totalnega odboja pri dani frekvenci določa največjo možno vrednost  $k_{\perp\max} \simeq n_1 k_0 \cos \theta_c = k_0 \sqrt{n_1^2 - n_0^2} \simeq k_0 \sqrt{2n\Delta n}$ , kjer je  $k_0 = \omega/c$ ,  $n$  pa povprečni lomni količnik. Ker je valovanje v prečni smeri omejeno na sredico dimenzije  $a$ , ima lahko  $k_{\perp}$  le diskretne vrednosti, ki so približno  $N\pi/a$ , kjer je  $N$  celo število. Z vsakim  $N$  je določen en *rod* valovanj v vlaknu. Ker je omejen  $k_{\perp}$ , je število rodov je navzgor omejeno:  $N_{\max} \simeq k_0 a / \pi \sqrt{2n\Delta n}$ .  $N$  je tudi število vozlov, ki jih ima valovanje v prečni smeri. Število rodov v danem vlaknu je odvisno od razlike lomnih količnikov in od dimenzije vlakna. Videli bomo, da v optičnih vlaknih en rod vselej obstaja, kar je ena od razlik med dielektričnimi in kovinskimi vodniki, kakršne poznamo iz mikrovalovne tehnike in po katerih se pod določeno frekvenco ne more širiti nobeno valovanje. Optični vodniki, po katerih se širi en sam rod, imajo posebej lepe lastnosti za uporabo v komunikacijskih sistemih.

Fazna hitrost valovanja, ki potuje po valovnem vodniku, je odvisna od frekvence, imamo torej disperzijo. Razlog je v diskretnih vrednostih  $k_{\perp}$ . Naj bo  $\beta$  komponenta valovnega vektorja vzdolž vlakna, recimo ji tudi valovno število, tako da je odvisnost polja od koordinate vzdolž vlakna  $\exp i\beta z$ . Veljati mora

$$n_1 \frac{\omega}{c} = \sqrt{\beta^2 + k_{\perp}^2} \quad (10.1)$$

Za dano vrednost  $k_{\perp}$  torej zveza med valovnim številom in frekvenco ni linearna, zato je fazna hitrost  $v_f = \omega/\beta$  odvisna od frekvence. Grupna hitrost  $v_g = d\omega/d\beta$  je različna od fazne in tudi odvisna od frekvence, kar ima za uporabo vlaken pomembne posledice.

## 10.1 Planparalelni vodnik

Preprost dvodimenzionalen model optičnega vlakna je planparalelna plast prozornega dielektrika z lomnim količnikom večjim od okolice:  $n_1 > n_0$  (Slika ??). Rešitev krajevnega dela valovne enačbe

$$\nabla^2 \mathbf{E} + n(x)^2 k_0^2 \mathbf{E} = 0 \quad (10.2)$$

kjer je  $k_0 = \omega/c$ , iščimo v obliki

$$\mathbf{E} = \psi(x) e^{i\beta z} \quad (10.3)$$

Za amplitudo  $\psi(x)$  dobimo enačbo

$$\frac{d^2 \psi}{dx^2} + [n(x)^2 k_0^2 - \beta^2] \psi = 0 \quad (10.4)$$

kjer je v plasti (območje II.) lomni količnik  $n_1$ , v okolici (območji I. in III.) pa  $n_0$ . Robni pogoji so, da sta tangencialni komponenti električne in magnetne poljske jakosti na meji zvezni. V planparalelnem primeru lahko valovanja ločimo na transverzalno električna (TE) in transverzalno magnetna (TM). V prvem primeru je  $\mathbf{E}$  v smeri osi  $y$ , v drugem pa  $\mathbf{H}$ . Pri TE valovih je tangencialna komponenta magnetnega polja  $H_z$ . Ker je  $\nabla \times \mathbf{E} = i\omega \mu_0 \mathbf{H}$ , dobimo iz zveznosti  $H_z$ , da je na meji zvezan tudi odvod  $\partial E_y / \partial x$ . S tem postane problem matematično enak iskanju lastnih stanj energije za delec v končno globoki enodimenzionalni potencialni jami v kvantni mehaniki, kjer lastni vrednosti energije ustrezata  $\beta^2$ . Poglejmo najprej, kakšne so možne rešitve:

- a.  $k_0 n_0 < \beta < k_0 n_1$ . Tedaj so rešitve oscilatorne v sredici in eksponentno pojemajoče v plašču. Predstavljajo vodene valove v plasti. V kvantni mehaniki ustrezajo vezanim stanjem.
- b.  $\beta < k_0 n_0$ . Rešitve so oscilatorne v vseh treh območjih in opisujejo valove, ki niso ujeti v plasti, temveč z ene strani vpadajo na plast, se delno skoznjo lomijo, delno pa odbijejo. V rešitvi je upoštevana tudi interferenca na plasti (Naloga). Taka stanja v kvantni mehaniki opisujejo prost delec.

Zanima nas predvsem prvi primer. Začnimo s TE polarizacijo, to je  $\psi(x) = (0, \psi(x), 0)$ . Naj bo  $x = 0$  v sredini plasti. Zaradi simetrije morajo biti rešitve za  $\psi(x)$  ali sode ali lihe. Sode rešitve imajo v sredici obliko

$$\psi_{II}(x) = C_1 \cos k_\perp x \quad (10.5)$$

v območjih I in III pa

$$\psi_{I,III}(x) = C_0 e^{\kappa(a \mp x)} \quad (10.6)$$

Tu je  $k_\perp = \sqrt{n_1^2 k_0^2 - \beta^2}$  in  $\kappa = \sqrt{\beta^2 - n_0^2 k_0^2}$ . Zveznost električne poljske jakosti na meji nam da

$$C_1 \cos k_\perp a = C_0 \quad (10.7)$$

Iz zveznosti odvoda dobimo

$$C_1 k_\perp \sin k_\perp a = \kappa C_0 \quad (10.8)$$

Zadnji dve enačbi morata biti hkrati izpolnjeni, zato velja zveza

$$k_\perp \tan k_\perp a = \kappa \quad (10.9)$$

Iz izrazov za  $k_{\perp}$  in  $\kappa$  dobimo še drugo zvezo

$$k_{\perp}^2 + \kappa^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_0^2) \quad (10.10)$$

Vpeljimo brezdimenzijske količine  $\xi = ak_{\perp}$ ,  $\eta = a\kappa$  in  $V^2 = a^2 k_0^2 (n_1^2 - n_0^2)$ . Z njimi lahko gornji enačbi zapišemo v prglednejši obliki

$$\xi \tan \xi = \eta \quad (10.11)$$

$$\xi^2 + \eta^2 = V^2 \quad (10.12)$$

Dovoljene vrednosti  $\xi$  in  $\eta$  dobimo kot presečišča krogov z radijem  $V$  in funkcije  $\xi \tan \xi$ , kar je prikazano na sliki ??.

Lihe rešitve imajo v sredici obliko

$$\psi_{II}(x) = C_1 \sin k_{\perp} x \quad (10.13)$$

v plašču pa

$$\psi_{I,III}(x) = \pm C_0 e^{\kappa(a \mp x)} \quad (10.14)$$

Na enak način kot za sode rešitve dobimo iz robnih pogojev, da mora veljati zveza

$$k_{\perp} \cot k_{\perp} a = -\kappa \quad (10.15)$$

ali

$$-\xi \cot \xi = \eta \quad (10.16)$$

Funkcija  $-\xi \cot \xi$  je na sliki ?? prikazana črtkano. Lastne vrednosti za lihe rešitve dobimo kot njena presečišča s krogomz radijem  $V$ .

Parameter  $V$  meri globino potencialne Jame; iz slike vidimo, da eno vodenega valovanja (ali vezano stanje v kvantni mehaniki) vselej obstaja. Pri velikih vrednostih  $V$  je rešitev za dovoljene vrednosti  $\xi$  več. Razen največje so zelo blizu mnogokratniku  $\pi/2$ , kar da za dovoljene vrednosti  $k_{\perp}$  približno mnogokratnike  $\pi/(2a)$ , kot smo pričakovali že v uvodu. Ko smo določili lastne vrednosti  $k_{\perp}$ , poznamo za vsak rod tudi disperzijsko zvezo med frekvenco in valovnim številom:

$$n_1^2 \frac{\omega^2}{c^2} = \beta^2 + k_{\perp}^2 \quad (10.17)$$

Pri tem je tudi lastna vrednost  $k_{\perp}$  lahko nekoliko odvisna od  $\omega$ , ker je ta vsebovana v  $V$ .

Osnovna lastna vrednost  $\xi_0$  je pri  $V \ll 1$  približno kar  $V$ . Zato je  $k_{\perp}^2 \simeq k_0^2 (n_1^2 - n_0^2)$  in je  $\beta = n_0 k_0$ . V primeru zelo šibkega vodenja je torej fazna hitrost vodenega vala približno enaka fazni hitrosti v plašču, to je  $c/n_0$ . To je lahko razumeti; pri majhnem  $V$  je namreč tudi  $\kappa$  majhen in se eksponentno pojemačče valovanje razteza daleč v plašč. (Naloga: Kakšna je v tej limiti grupna hitrost?). V nasprotnem primeru, ko je  $V \gg 1$ , je  $\xi_0 \simeq \pi/2 \ll V$ . Zato je tudi  $k_{\perp} \simeq \pi/(2a) \ll n_1 k_0$  in je približno  $\beta \simeq n_1 k_0$ . V tem primeru je torej fazna hitrost takša kot v sredstvu z lomnim količnikom sredice, kar je v skladu s preprosto predstavo, da se pri velikem  $V$  osnovni vodenii rod širi po sredici vzdolž osi vlakna.

Račun za transverzalno magnetne (TM) valove je zelo podoben, le v robnem pogoju za tangencialno komponento električnega polja nastopita dielektrični konstanti sredice in plašča, zato je predvsem najnižja lastna vrednost za  $k_{\perp}$  nekoliko večja kot za TE valove. (Naloga)

## 10.2 Cilindrično vlakno

Običajna vlakna so seveda tridimenzionalna s cilindrično geometrijo. Najpreprostejša struktura, povsem analogna gornjemu primeru planparalene plasti, je jedro s konstatnim lomnim količnikom, ki je nekoliko večji od lomnega količnika plašča. Pogoste so tudi zapletenejše konstrukcije, pri katerih je sredica sestavljena iz več kolobarjev z različnimi lomnimi količniki. S primerno izbiro je tako mogoče zelo zmanjšati disperzijo (Slika ??).

Račun za širjenje svetlobe po cilindričnem vlaknu s homogeno sredico je sicer podoben kot za planparalelni primer, vendar je precej bolj zapleten. Glavna komplikacija je, da v cilindrični geomteriji ni več delitve na čisto električno in magneto transverzalne valove, zato postanejo robni pogoji bolj zapleteni. Rešitve se izrazajo v obliki kombinacij Besselovih funkcij. Podrobnosti si bralec lahko ogleda v literaturi [?]. Osnovne značilnosti rešitev pa ostajajo enako kot v dvodimenzionalnem primeru. Kot smo ugotovili že na začetku, obstaja končno število vodenih valov, odvisno od premera sredice in razlike lomnih količnikov sredice in plašča. Če sta ti količini majhni, obstaja le eno vodeno valovanje in imamo enorodovno vlakno. Za njegovo valovno število velja  $n_0 k_0 < \beta < n_1 k_0$ .

## 10.3 Cilindrično vlakno s paraboličnim profilom lomnega količnika

V treh dimenzijah lahko hitro poiščemo rešitve za vlakno, v katerem je dielektrična konstanta kvadratna funkcija radialne koordinate  $r$ :

$$n(r)^2 = n_0^2 + n_2^2 r^2 \quad (10.18)$$

Parameter  $n_2$  je v praksi vselej majhen, zato ima za vse smiselne vrednosti  $r$  tudi lomni količnik paraboličen profil. Parabolična sredica mora sveda biti omejena, okoli nje imamo zopet plašč s konstantnim lomnim količnikom (Slika ??). Tipičen radij sredice je nekaj deset mikrometrov.

Komponento polja za izbrano polarizacijo napišimo v obliki

$$E = E_0 \psi(x, y) e^{i\beta z} \quad (10.19)$$

Zanemarili smo, da zaradi odvisnosti od prečnih koordinat in  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$  polje ne more imeti povsod iste smeri; če hočemo biti natančni, moramo v gornji obliki zapisati vektorski potencial. Postavimo približni nastavek v valovno enačbo. Dobimo enačbo

$$\nabla_{\perp}^2 \psi + [k_0^2 (n_0^2 + n_2^2 r^2) - \beta^2] \psi = 0 \quad (10.20)$$

ki je popolnoma enaka enačbi za krajevni del lastnih funkcij dvodimenzionalnega harmonskega oscilatorja v kvantni mehaniki. Rešitve imajo obliko

$$\psi_{lm} = H_l \left( \sqrt{2} \frac{x}{w} \right) H_m \left( \sqrt{2} \frac{y}{w} \right) e^{-(x^2+y^2)/w^2}, \quad w^2 = \frac{\lambda}{\pi n_2} \quad (10.21)$$

z lastnimi vrednostmi

$$\beta_{lm}^2 = n_0^2 k_0^2 \left[ 1 - \frac{2n_2}{k_0 n_0} (l + m + 1) \right] \quad (10.22)$$

Razmerje  $2n_2 / (k_0 n_0)$  je majhno, zato je približno  $\beta_{lm} = n_0 k_0 \left[ 1 - \frac{n_2}{k_0 n_0} (l + m + 1) \right]$ . Če je  $n_2$  neodvisen od frekvence, je grupna hitrost

$$v_g = \left( \frac{d\beta_{lm}}{d\omega} \right)^{-1} = \frac{c_0}{n_0} \quad (10.23)$$

enaka za vse rodove, kar je značilnost vlakna s kvadratnim profilom lomnega količnika. V dejanskem vlaknu je seveda tako odvisnost možna le v omejenem območju sredice, zato je tudi gornja analiza le približna in velja dobro za tiste rodove, ki se ne raztezajo izven sredice.

Neodvisnost grupne hitrosti od reda valovanja v vlaknu je praktično pomembna. Grupna hitrost določa čas potovanja svetlobnega sunka, ki lahko predstavlja en bit informacije. Če se po vlaknu lahko širi več rodov, ki imajo različno grupno hitrost, se sunek po prehodu skozi vlakno razširi, kar omejuje uporabno dolžino vlakna, kot bomo podrobnejše videli kasneje. Temu se lahko izognemo z uporabo enorodovnih vlaken, ki pa so dražja in je vanje te "je uvesti svetlobni snop, katerega divergencia in premer morata ustrezati ujetemu valu enorodovnega vlakna, če naj ne bo izgub. Zato se za krajše zveze uporablajo mnogorodovna vlakna, ki imajo sredico s približno paraboličnim profilom lomnega količnika.

## 10.4 Sprememba lomnega količnika vlakna

Sprememba lomnega količnika sredice ali plašča vlakna povzroči spremembo valovnega števila  $\beta$  danega roda. V enorodovnih vlaknih je to mogoče izkoristiti za izdelavo senzorjev, na primer temperature ali tlaka. Zaradi zunanjih vplivov, ki jih želimo zaznati, se spremeni lomni količnik vlakna in s tem propagacijska konstanta, kar lahko izmerimo preko spremembe faze valovanja na izhodu iz vlakna, to je, z ustrezno sestavljenim interferometrom. Ker je dolžina vlakna lahko velika, v nekaj centimetrov velik tulec lahko brez težav navijemo kilometre vlakna, je celotna sprememba faze velika že pri majhnih spremembah merjene količine. Sprememba valovnega števila povzroča tudi nezaželjene spremembe faze in odboje pri prenosu informacij. V tem razdelku zato pogledamo, kako se spremeni valovno število pri dani spremembi lomenga količnika.

Vzemimo rod vlakna s propagacijsko konstanto  $\beta_{lm}$  in prečnim profilom  $\psi_{lm}(r, \phi)$ . Ta mora zadoščati valovni enačbi

$$\nabla_{\perp}^2 \psi_{lm} + (\epsilon(r)k_0^2 - \beta_{lm}^2) \psi_{lm} = 0 \quad (10.24)$$

Naj se dielektrična konstanta vlakna spremeni za  $\delta\epsilon$ . Zato se spremenita tudi propagacijska konstanta  $\beta = \beta_{lm} + \delta\beta$  in prečna oblika  $\psi = \psi_{lm} + \delta\psi$ . Tudi motena funkcija  $\psi$  mora zadoščati enačbi 10.24, zato za perturbacijo velja

$$\nabla_{\perp}^2 \delta\psi + (\epsilon(r)k_0^2 - \beta_{lm}^2) \delta\psi + \delta\epsilon k_0^2 \psi_{lm} = 2\beta_{lm} \delta\beta \psi_{lm} \quad (10.25)$$

kjer smo zanemarili produkte majhnih količin. Množimo obe strani enačbe s  $\psi_{lm}^*$  in integrirajmo po preseku vlakna, pri čemer upoštevajmo, da je  $\delta\psi$  ortogonalna na  $\psi_{lm}$ :

$$\int \psi_{lm}^* \nabla_{\perp}^2 \delta\psi dS + \int (\epsilon(r)k_0^2 - \beta_{lm}^2) \delta\psi \psi_{lm}^* + k_0^2 \int \delta\epsilon |\psi_{lm}|^2 dS \quad (10.26)$$

$$= 2\beta_{lm} \delta\beta \int |\psi_{lm}|^2 dS \quad (10.27)$$

Prvi člen na levi preoblikujmo z uporabo zvez  $\int (u \nabla_{\perp}^2 v - v \nabla_{\perp}^2 u) dS = \int \nabla_{\perp} \cdot (u \nabla_{\perp} v - v \nabla_{\perp} u) dS = \oint \mathbf{ds} \times (u \nabla_{\perp} v - v \nabla_{\perp} u)$ . Ker funkciji  $\psi_{lm}$  in  $\delta\psi$  opisujeta vodene valove, morata iti za velike  $r$  proti nič, zato je integral po krivulji v gornji zvezi nič in velja  $\int \psi_{lm}^* \nabla_{\perp}^2 \delta\psi dS = \int \delta\psi \nabla_{\perp}^2 \psi_{lm}^* dS$ . Ker  $\psi_{lm}^*$  zadošča enačbi 10.24, se v enačbi 10.26 prvi in drugi člen uničita in dobimo željeno zvezo

$$\delta\beta = \frac{k_0^2 \int \delta\epsilon |\psi_{lm}|^2 dS}{2\beta \int |\psi_{lm}|^2 dS} \quad (10.28)$$

ki je seveda analogna kvantomehanskemu rezultatu s teorijo motenj prvega reda za spremembo energije lastnega stanja pri majhni spremembi Hamiltonovega operatorja. Rezultat je tudi intuitivno razumljiv: v najnižjem redu je  $\delta\beta$  sorazmerna s uteženim povprečjem  $\delta\varepsilon$ , kjer je utež  $\psi_{lm}$ .

Sprememba valovnega števila  $\beta$  v delu vlakna, po katerem potuje svetloba, ne povzroči le spremembe faze, ampak tudi odboj dela valovanja. Ta pojav je le nekoliko druga oblika odboja na meji (zvezni ali ostri) dveh dielektrikov, ali splošneje, odboja vsakega valovanja na območju, kjer se spremeni fazna hitrost valovanja.

Odboj na območju vlakna, kjer se spreminja  $\beta$ , bomo najlažje dobili preko formule za odboj na meji dveh dielektrikov pri pravokotnem vpodu. Odbita amplituda je tedaj

$$E_r = \frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1} E_0 \quad (10.29)$$

Mislimo si, da je sprememba  $\beta$  na delu vlakna sestavljena iz majhnih stopničastih sprememb  $\Delta\beta_i$  na intervalih  $\Delta z$ . Za ravno valovanje, za katerega velja enačba 10.29, je sprememba lomnega količnika sorazmerna s spremembo fazne hitrosti. Ker tudi  $\beta$  določa fazno hitrost valovanja po vlaknu, je delež odbitega valovanja na stopničasti spremembi  $\Delta\beta_i$

$$\Delta E_i = \frac{\Delta\beta_i}{2\beta} E_0 \quad (10.30)$$

Predpostavili smo, da je celotni del odbitega valovanja tako majhen, da ni treba upoštevati spremembe amplitude vpadnega vala  $E_0$ . Vse odbito valovanje je vsota prispevkov na posameznih stopnicah  $\Delta\beta_i$ , pri čemer moramo upoštevati še različne faze delnih odbitih valovanj:

$$E_r = \sum \frac{\Delta\beta_i}{2\beta} e^{2i\beta z_i} E_0 = \frac{1}{2\beta} \sum \frac{d\beta}{dz} e^{2i\beta z_i} \Delta z E_0 \quad (10.31)$$

Preidimo z vsote na integral, pa dobimo, da je odbita amplituda

$$E_r = \frac{E_0}{2\beta} \int \frac{d\beta}{dz} e^{2i\beta z} dz \quad (10.32)$$

*Primer:* Naj se valovno število linearno spremeni za  $\Delta\beta_0$  na razdalji  $L$ . Tedaj je po gornji formuli

$$\frac{E_r}{E_0} = 2 \frac{\Delta\beta_0}{L} \frac{\sin \beta L/2}{\beta} \quad (10.33)$$

Odbojnost je največja, kadar je  $L$  majhen v primeri z  $1/\beta$ , torej kadar je sprememba  $\beta$  ostra stopnica. Čim počasnejša je sprememba, tem manj je odboja, poleg tega pa odboja ni vsakič, ko je  $\sin \beta L/2 = 0$ , to je, pride do destruktivne interference vseh delnih odbojev. (Naloga: Odboj na erf stopnici).

## 10.5 Izgube v optičnih vlaknih

Ena najpomembnejših lastnosti optičnih valken je majhno slabljenje svetlobnega vala, posebej še v vlaknih iz kremenovega stekla. Najboljša vlakna imajo danes izgube okoli 0,2 dB/km pri valovni dolžini 1,55 μm. (1 decibel je  $10 \log(j_0/j)$ ). Glavni vzroki izgub so absorpcija in sisanje na nečistočah in sisanje na termičnih fluktuacijah gostote (Rayleighovo sisanje).

Slika ?? prikazuje tipično odvisnost izgub od valovne dolžine za dobro enorodovno vlakno iz kremenovega stekla s primesjo GeO<sub>2</sub>. Sipanje na fluktuacijah gostote je sorazmerno z  $\lambda^{-4}$ , zato dominira pri majhnih valovnih dolžinah, sipanje na defektih in nepravilnostih je skoraj zanemarljivo, pri valovnih dolžinah nad 1,6 μm pa prevlada absorpcija. Vrh med 1,3 μm in 1,5 μm je posledica absorpcije na OH ionih, ki se jih je v steklu zelo težko znebiti. Iz slike je razvidno, da so izgube najmanjše okoli 1,55 μm, zato se to območje največ uporablja za zvezne na velike razdalje. Najboljših modernih vlaken tudi ni več mogoče kaj dosti izboljšati glede izgub, saj so že dosegla spodnjo mejo, določeno s termičnimi fluktuacijami.

Pri optičnih zvezah nastanejo še izgube na spojih vlaken, ki so okoli 0,2 dB na spoj. Skupne izgube so tako dosti manjše kot v koaksialnem kablu in je možen prenos signala do nekaj sto kilometrov brez vmesnega ojačevanja. S tem pri dolžini optičnih zvez izgube niso več glavna omejitev, ampak je to popačitev signala zaradi disperzije.

V optičnem vlaknu nastanejo izgube tudi, kadar je vlakno ukrivljeno. Te izgube postanejo znantne, kadar je krivinski radij vlakna centimeter ali manj. Ta pojav je dovolj zanimiv, da si ga je vredno nekoliko podrobnejše ogledati.

Vzemimo spet dvodimenzionalno plast debeline 2a z lomnim količnikom  $n_1$  v sredstvu z lomnim količnikom  $n_0$ , ki naj bo ukrivljena s krivinskim radijem R. Taka plast tvori del kolobarja z notranjim radijem  $R - a$  in zunanjim radijem  $R + a$ , pri čemer je  $R \gg a$  (Slika ??). Zapišimo valovno enačbo za dve dimenziji v cilindrični geometriji:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} r \frac{\partial E}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E}{\partial \phi^2} + k_0^2 n^2(r) E = 0 \quad (10.34)$$

kjer ima  $n(r)$  vrednost  $n_1$  v sredici in  $n_0$  drugje. Zanimajo nas rešitve oblike

$$E = \psi(r) e^{im\phi} \quad (10.35)$$

kjer je  $\psi(r)$  znatna le v sredici. Ker je valovna dolžina svetlobe dosti manjša od R, je m veliko število, ki je povezano z valovnim številom β: naj bo  $z = R\phi$  dolžina loka vzdolž sredine sredice. Tedaj je  $m\phi = (m/R)z$  in je torej  $\beta = m/R$ .  $\psi$  zadošča enačbi

$$\frac{d^2\psi}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{d\psi}{dr} + \left[ k_0^2 n^2(r) - \frac{m^2}{r^2} \right] \psi = 0 \quad (10.36)$$

Rešitve za  $\psi$  so kombinacije Besselovih funkcij reda m, kar pa zaradi velikosti m ni posebno zanimivo. Dosti več bomo izvedeli, če primerno preoblikujemo valovno enačbo 10.34. Namesto r in φ vpeljimo koordinati  $x = r - R$  in  $z = R\phi$ . S tem smo prešli nazaj na koordinate planparelne plasti in iščemo popravke valovne enacbe 10.4 reda  $1/R$ . Tako je  $1/r \simeq 1/R$  in

$$\frac{m^2}{r^2} = \frac{m^2}{(R+x)^2} \simeq \frac{m^2}{R^2} \left( 1 - 2 \frac{x}{R} \right) = \beta^2 \left( 1 - 2 \frac{x}{R} \right) \quad (10.37)$$

S tem dobimo iz enačbe 10.36 približno enačbo za prečno obliko polja

$$\frac{d^2\psi}{dx^2} + [k_0^2 n^2(r) - \beta^2] \psi + \frac{1}{R} \left( \frac{d\psi}{dx} - 2\beta^2 x \psi \right) = 0 \quad (10.38)$$

## 10.6 Disperzija

Zaradi disperzije, to je odvisnosti fazne in grupne hitrosti od frekvence, se sunek svetlobe, ki potuje po vlaknu, podaljšuje. Ta pojav omejuje količino informacije, ki jo je mogoče prenašati po

vlaknu dane dolžine. Zato je čim manjša disperzija v vlaknih vsaj toliko pomembna kot majhne izgube.

Vzemimo najprej enorodovno vlakno in naj bo svetloba v vlaknu modulirana v obliki kratkih sunkov, ki nosijo informacijo. Sunki potujejo z grupno hitrostjo

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} = \left( \frac{d\beta}{d\omega} \right)^{-1} \quad (10.39)$$

Po enačbi 10.1 je grupna hitrost odvisna od frekvence tako zaradi eksplisitne korenske zveze med  $\omega$  in  $\beta$  kot zaradi odvisnosti lomnih količnikov sredice in plašča od frekvence. Prvemu prispevku recimo valovodna disperzija, ker je posledica omejitve valovanja v sredico vlakna, drugemu pa materialna disperzija. Oba prispevka sta pomembna.

Naj bo dolžina vlakna  $L$  in trajanje posameznega sunka  $\tau$ . Sunek potuje po vlaknu čas

$$T = \frac{L}{v_g} = L \frac{d\beta}{d\omega} \quad (10.40)$$

Svetloba ima končno spektralno širino  $\Delta\omega$ . Ta mora biti vsaj  $1/\tau$ , lahko pa je tudi večja, če svetlobni izvor, običajno polvodniški laser, ni povsem monokromatski. Ker vse spektralne komponente ne potujejo z isto hitrostjo, se sunek na koncu vlakna razleže za

$$\Delta\tau = \left| \frac{dT}{d\omega} \right| \Delta\omega = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Delta\omega \quad (10.41)$$

Naj bo tudi razmik med zaporednimi sunki  $\tau$ . Da se sunki ne bodo prekrivali, mora biti  $\Delta\tau < \tau$  in sme biti najvišja frekvenca modulacije kvečjemu

$$v_{\max} = \frac{1}{2\Delta\tau} \quad (10.42)$$

Ločiti moramo dva mejna primera. Kadar je  $\Delta\omega \gg 1/\tau$ , to je, kadar je spektralna širina izvora mnogo večja od širine zaradi modulacije, je

$$v_{\max} = \frac{1}{L\Delta\omega} \left( \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right)^{-1} \quad (10.43)$$

Največja gostota informacije, ki jo lahko prenašamo po vlaknu, je v tem primeru obratno sorazmerna z dolžino vlakna in spektralno širino laserja.

V nasprotnem primeru, ko je laser dosti bolj monokromatski od razširitve zaradi same modulacije, imamo  $\Delta\omega = 1/\tau$ . Pri najvišji možni frekvenci modulacije  $v_{\max}$  je  $\tau \simeq \Delta\tau$  in je po enačbi 10.41

$$(\Delta\tau)^2 = L \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \quad (10.44)$$

in je

$$v_{\max} = \sqrt{\frac{1}{L} \left( \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \right)^{-1}} \quad (10.45)$$

V tem primeru je najvišja frekvenca modulacije obratno sorazmerna s korenom dolžine vlakna.

Večji del disperzije grupne hitrosti prinese materialna disperzija, to je, odvisnost lomnega količnika od frekvence. Primer meritve razširitve sunka z znano spektralno širino v izbrani

dolžini vlakna kaže slika ???. Pri valovni dolžini okoli  $1,3 \mu\text{m}$  ima materialna disperzija, to je  $d^2n/d\omega^2$ , ničlo, ki je v celotni disperziji nekoliko premaknjena zaradi prispevka valovodne disperzije. Na valovodno disperzijo je mogoče vplivati s konstrukcijo vlakna. Sredica je lahko sestavljena iz več plasti z različnimi lomnimi količniki in različnimi debelinami, s čimer se spremeni prispevek valovodne disperzije in se položaj ničle celotne disperzije premakne k valovni dolžini izvora.

Iz slike ?? razberemo, da je tipična disperzija enorodovnega vlakna okoli  $10 \text{ ps/km}$  pri spektralni širini  $1 \text{ nm}$ . Od tod je  $d^2\beta/d\omega^2 = \Delta\tau\lambda / (\Delta\lambda L\omega) \simeq 5 \cdot 10^{-23} \text{ s}^2/\text{m}$ . Po enačbi 10.45 je v  $100 \text{ km}$  dolgem vlaknu tedaj najvišja frekvenca modulacije okoli  $10^9 \text{ Hz}$ . Pri zmogljivih zvezah na velike razdalje je torej za največjo dolžino vlakna brez obnovitve signala disperzija hujaša omejitev kot izgube. Največja možna razdalja in najvišje frekvenca modulacije sta danes nekaj sto kilometrov in nekaj GHz.

V mnogorodvnih vlaknih se sunek širi zaradi različnih grupnih hitrosti posameznih rodov. Različne grupne hitrosti v valovni sliki ustrezajo različni dolžini optične poti za žarke, ki potujejo pod različnimi koti glede na os vlakna. Te razlike so mnogo večje od disperzije v enorodvnih vlaknih, zato je pri dani dolžini vlakna popačitev signala dosti večja in se mnogorodovna vlakna ne uporablajo za dolge zveze.

## 10.7 Potovanje sunka po enorodovnem vlaknu

Poglejmo si nekoliko podrobnejše, kako po enorodovnem vlaknu ali drugem sredstvu z disperzijo potuje sunek valovanja z dano začetno obliko. Denimo, da smo poiskali lastna valovanja in da torej poznamo zvezo med valovnim številom  $\beta$  in frekvenco  $\omega$ . Zapišimo sunek v obliki

$$E(z, t) = a(z, t) \psi(x, y) \quad (10.46)$$

kjer je  $\psi(x, y)$  lastna rešitev prečenega dela valovne enačbe, ki določa tudi  $\beta(\omega)$ . Funkcijo  $a(z, t)$ , ki opisuje širjenje sunka in njegovo obliko v  $z$  smeri, lahko zapišemo s Fourierovim integralom po frekvencah

$$a(z, t) = \int a(\omega, z) e^{-i\omega t} d\omega \quad (10.47)$$

Sunek naj bo približno monokromatičen s frekvenco  $\omega_0$ , to pomeni, da je mnogo daljši od optične periode. Pri določeni  $\omega$  ima Fourierova amplituda krajevno odvisnost  $\exp[i\beta(\omega)z]$ , zato zadošča enačbi

$$\frac{\partial a(z, \omega)}{\partial z} = i\beta(\omega) a(z, \omega) \quad (10.48)$$

Privzeli smo, da je spekter sunka ozek, zato lahko  $\beta(\omega)$  razvijemo okoli  $\omega_0$ :

$$\frac{\partial a(z, \omega)}{\partial z} = i \left[ \beta(\omega_0) + \frac{d\beta}{d\omega} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} (\omega - \omega_0)^2 \right] a \quad (10.49)$$

Vpeljimo novo amplitudno funkcijo, ki ne bo vsebovala osnovne odvisnosti  $\exp[i\beta(\omega_0)z]$

$$a(z, \omega) = A(z, \omega - \omega_0) e^{i\beta(\omega_0)z} \quad (10.50)$$

Ker je spkter različen od nič le okoli  $\omega_0$ , je prikladno  $A$  pisati kot funkcijo  $\omega - \omega_0$ . Napravimo obratno Fourierovo transformacijo zadnjega izraza:

$$\begin{aligned} a(z, t) &= \int_{-\infty}^{\infty} A(z, \omega - \omega_0) e^{i[\beta(\omega_0)z - \omega_0 t]} d\omega \\ &= \int_{-\infty}^{\infty} A(z, \omega - \omega_0) e^{-i(\omega - \omega_0)t} d(\omega - \omega_0) e^{i[\beta(\omega_0)z - \omega_0 t]} \\ &= A(z, t) e^{i[\beta(\omega_0)z - \omega_0 t]} \end{aligned} \quad (10.51)$$

Funkcija  $A(z, t)$ , katere Fourierova transformacija je  $A(z, \omega)$ , očitno predstavlja prostorsko in časovno odvisnost ovojnice sunka. Postavimo definicijo 10.50 v enačbo 10.49:

$$\frac{\partial A(z, \omega - \omega_0)}{\partial z} = i \left[ \frac{d\beta}{d\omega} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} (\omega - \omega_0)^2 \right] A(z, \omega - \omega_0) \quad (10.52)$$

Z obratno Fourierovo transformacijo dobimo

$$\left( \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} \right) A(z, t) = -\frac{i}{2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} \quad (10.53)$$

Upoštevali smo, da je

$$\int (i\omega)^n A(z, \omega) e^{-i\omega t} d\omega = \frac{\partial^n}{\partial t^n} A(z, t) \quad (10.54)$$

in da je  $d\beta/d\omega = 1/v_g$ .

Enačba 10.53 opisuje razvoj oblike sunka pri širjenju po vlaknu. Če ni disperzije grupne hitrosti, to je, če je desna stran enačbe nič, je rešitev poljubna funkcija  $f(z - v_g t)$ . Sunek poljubne začetne oblike potuje po vlaknu nepopačen z grupno hitrostjo. Disperzija pa povzroči, da se spreminja tudi oblika. Enačbo lahko še nekoliko poenostavimo z vpeljavo novih neodvisnih spremenljivk

$$\begin{aligned} \tau &= t - \frac{z}{v_g} \\ \zeta &= z \end{aligned} \quad (10.55)$$

Za vrh sunka, ki naj ima pri  $t = 0$  koordinato  $z = 0$  in se giblje z grupno hitrostjo, je vselej  $\tau = 0$ . Spremenljivka predstavlja  $\tau$  torej čas v točki  $z = \zeta$ , merjen od trenutka, ko tja prispe center sunka. Z novima spremenljivkama se enačba 10.53 zapiše

$$\frac{d^2\beta}{d\omega^2} \frac{\partial^2 A}{\partial \tau^2} + 2i \frac{\partial A}{\partial \zeta} = 0 \quad (10.56)$$

Ta enačba ima isto obliko kot obosna valovna enačba, ki smo jo v drugem poglavju uporabili za obravnavo koherentnih snopov. Podobnost seže dlje od formalne oblike. Pri snopih, ki so omejeni v prečni smeri, disperzija fazne in grupne hitrosti po prečnih komponentah valovnega vektorja povzroča spremjanje prečnega preseka snopa, pri časovno omejenih sunkih v sredstvu s frekvenčno disperzijo pa se spreminja vzdolžna oblika sunka. Kot se morda bralec spominja, je tudi v praznem prostoru pri širjenju snopa v okolici grla fazna hitrost funkcija frekvence. Zato se kratek sunek, ki je omejen v prečni smeri, tudi v praznem prostoru razširi tako v prečni kot v vzdolžni smeri. (Naloga)

Obosno valovno enačbo rešijo Gaussovi snopi. V en. 10.56 ima vlogo prečne koordinate  $\tau$ . Po analogiji s snopi se bo zaradi disperzije najmanj širil sunek z Gaussovo časovno odvisnostjo.

Računa nam ni treba ponavljati, kar v izrazu za Gaussove snope napravimo ustrezeno zamenjavo črk. Valovnemu številu  $k$  pri snopih na primer ustreza parameter  $\mu = (d^2\beta/d\omega^2)^{-1}$ . Tako dobimo

$$A(\tau, \zeta) = \frac{A_0}{\sigma_0 \sqrt{1 + \frac{\zeta^2}{\zeta_0^2}}} \exp\left(-\frac{\tau^2}{\sigma^2}\right) \exp\left(-i\frac{\mu\tau^2}{2b}\right) e^{i\phi(\zeta)} \quad (10.57)$$

kjer je  $\sigma$  trajanje sunka, za katerega velja enaka zveza kot za polmer Gaussovega snopa:

$$\sigma^2 = \sigma_0^2 \left(1 + \frac{\zeta^2}{\zeta_0^2}\right) \quad (10.58)$$

Tu je  $\sigma_0$  trajanje sunka pri  $\zeta = 0$ , to je na mestu, kjer je sunek najkrajši. Dodatna skupna faza  $\phi(\zeta)$  ni posebno pomembna, pač pa je zanimiv drugi eksponentni faktor v enačbi 10.57. V njem smo z  $b = \zeta (1 + \zeta_0^2/\zeta^2)$  označili količino, ki je analogna krivinskemu radiju valovnih front v primeru Gaussovih snopov. Odvod faze po  $\tau$  predstavlja spremembo frekvence glede na centralno frekvenco sunka  $\omega_0$ :

$$\omega - \omega_0 = \frac{\mu\tau}{b} \quad (10.59)$$

Za pozitivno disperzijo  $\mu$  je frekvencia na prednji strani sunka, to je pri  $\tau < 0$ , večja in se linearno zmanjšuje proti koncu sunka. Pri  $\zeta = 0$  je sunek toliko kratek, kolikor je možno pri dani spektralni širini. Pri potovanju po vlaknu se zaradi disperzije sunek razširi, spektralna širina pa ostaja enaka, zato se je del pojavi kot spremenjanje frekvence znotraj sunka. Lahko si mislimo tudi, da je sunek najkrajši, to je omejen z Fourierovo transformacijo spektra, tedaj, kadar se vse frekvenčne komponente seštejejo z isto fazo, to je pri  $\zeta = 0$ . Da dobimo najkrajše sunke, kadar je faza vseh delnih valov enaka, smo srečali že pri fazno uklenjenih sunkih iz mnogofrekvenčnih laserjev. Pri potovanju sunka se zaradi disperzije faze frekvenčnih komponent različno spreminja in sunek se podaljša. Zanimivo je, da je pri tem pomemben šele drugi odvod fazne hitrosti po frekvenci, ki je sorazmeren z  $\mu$ , linearno spremenjanje faze pa ne povzroči razširitve.

Naloga: Pokaži, da je spekter sunka nespremenjen.

Naloga: Pokaži, da je za sunek poljubne začetne oblike razširitev mogoče zapisati z uklonskim integralom.

Naloga: Pokaži, da iz en. 10.58 sledi podobna ocena za maksimalno frekvenco modulacije (minimalno razširitev sunka) pri dani dolžini vlakna, kot jo da en. 10.45.

Razširitev sunka zaradi disperzije je pri  $\mu > 0$  mogoče kompenzirati s parom paralelnih uklonskih mrežic, kot kaže slika ???. Prva mrežica različne frekvenčna komponente razkloni, druga pa zopet zbere, vendar dolžine optičnih poti za različne komponente niso enake. celoten učinek je enak kot pri razširjanju sunka po sredstvu z negativno disperzijo. Račun je nekoliko preglednejši, rezultat pa povsem enak, če namesto refleksijskih mrežic vzamemo transmisiji, kot kaže slika ???. Naj na par vpada raven val pod kotom  $\alpha$ . Pred prvo mrežico je fazni faktor  $\exp(ik_1x)$ , kjer je  $k_1 = \omega/c \sin \alpha$ . Pri prehodu skozi mrežico se polje pomnoži s kompleksno prepustnostjo mrežice, ki povzroči razcep vala na uklonjene valove. Pri tem se faza za prvi uklonski red poveča za  $qx$ , kje je  $q = 2\pi/\Lambda$  in je  $\Lambda$  perioda mrežice. Premik do druge mrežice poveča fazo za  $k_3L$ . Za komponento valovnega vektorja v smeri  $z$  velja seveda  $k_3 = \sqrt{(\omega/c)^2 - (k_1 + q)^2}$ . Po prehodu

skozi drugo mrežico nas zanima prvi negativni uklonski red, ki da val v smeri prvotnega vala. Za ta red se faza spremeni za  $-qx$ , tako da je celotna sprememba faze

$$\Phi = L \sqrt{(\omega/c)^2 - (k_1 + q)^2} = \frac{L}{c} \sqrt{\omega^2 - (\omega \sin \alpha + qc)^2} \quad (10.60)$$

Disperzija, ki jo povzroči par mrežic, je določena z drugim odvodom faze po frekvenci:

$$\frac{d^2\Phi}{d\omega^2} = -\frac{Lq}{[\omega^2 - (\omega \sin \alpha + qc)^2]^{3/2}} \quad (10.61)$$

Drugi odvod je vselej negativen. Par mrežic torej deluje kot sredstvo z negativno disperzijo. Sunek, ki se je razširil zaradi potovanja po sredstvu s pozitivno disperzijo, lahko ponovno skrajšamo do meje, določene s širino spektra. Postopek se uporablja za pridobivanje zelo kratkih sunkov. Sunku iz fazno uklenjenega barvilnega ali Ti:safirnega laserja najprej v nelinearnem sredstvu razširijo spekter, pri čemer se sunek tudi časovno podaljša. O tem najde bralec nekaj več v poglavju o nelinearni optiki. Razširjen sunek nato s parom mrežic skrajšajo za faktor 10-100 glede na prvotno dolžino sunka. Tako dobijo sunke dolge le okoli 10 fs, kar je le še nekaj optičnih period.

## 10.8 Sklopitev v optična vlakna



## 11. Detektorji svetlobe

11.1 Kalorimetrični detektorji

11.2 Fotoprevodni detektorji

11.3 PN in PiN fotodiode

11.4 Plazovne fotodiode

11.5 Šum pri optični detekciji

# Stvarno kazalo

π način, 12  
Čričkanje, 111  
Življenski čas nihanj, 62  
  
ABCD matrike, 49, 51, 59  
Absorpcija, 74  
Absorpcija fotona, 71  
Absorpcijski koeficient, 74  
Akusto-optični pojav, 129, 131, 134  
Avtokorelacijska funkcija, 28  
  
BaTiO<sub>3</sub>, 88, 89, 121  
Besselov snop, 45  
Braggov uklon, 131, 136  
Brewsterjev kot, 16  
  
CS<sub>2</sub>, 105  
  
DFG, *glej* Generacija razlike frekvenc  
Dielektričnost, 9, 21  
    inverzna, 119, 129  
Disperzija, 112  
Dobrota rezonatorja, 63  
Dopplerjeva razširitev, 80  
Dvolomnost, 23, 94, 125, 130  
Dvonivojski sistem, 70  
  
Einsteinovi koeficienti, 72, 84  
Elasto-optični pojav, 129  
Elasto-optični tenzor, 130  
Električna polarizacija, 9, 87, 104  
Električna susceptibilnost, 9  
Električno polje  
    gostota, 9  
    jakost, 9, 11, 87  
Elektro-optična modulacija  
    amplitudna, 119, 126  
    fazna, 119, 127  
    frekvenčna, 119, 127  
    linearna, 127  
    longitudinalna, 122, 126  
    transverzalna, 124  
Elektro-optični deflektor, 129  
Elektro-optični pojav, 119  
Elektro-optični tenzor, 120

Elektromagnetno valovanje, 12  
Fabry-Perotov interferometer, 53, 55, 63  
Foton, 69  
Fraunhoferjev uklon, 19, 37  
Fresnel-Kirchhoffov integral, 18  
Fresnelov uklon, 19, 37  
Fresnelove enačbe, 15  
Fresnelovo število, 19, 55, 62  
  
GaAs, 121  
Gaussov snop, 41, 56  
    divergenca, 40  
    frekvenčno podvajanje, 97  
    grlo, 40  
    krivinski radij, 41  
    polmer, 40  
Generacija razlike frekvenc, 89  
Generacija vsote frekvenc, 89  
Gostota energije, 11, 13  
Gostota energijskega toka, 11–13, 29  
Gostota stanj, 53, 68  
Gouyeva faza, 41, 60  
  
Hamiltonova funkcija, 69  
Harmonski oscilator, 69  
Helmholtzeva enačba, 12, 38  
Hermite-Gaussovi snopi, 43, 66  
Huygensovo načelo, 19  
  
Intenziteta, *glej* Gostota energijskega toka  
Interferenca, 25, 28, 32, 35  
Izgube v rezonatorju, 62  
  
Jonesov vektor, 13  
Jonesova matrika, 14, 15  
  
KDP, 88, 92, 95, 121, 122  
Kerrov pojav, 120  
    optični, 104, 117  
Kerrov tenzor, 120  
Kirchhoffov integral, 17, 64  
Kleinmanova domneva, 88  
Koherenčna dolžina, 28  
Koherenčna ploskev, 33, 34

- Koherenčna razdalja, 26, 33  
 Koherenčni čas, 25, 28  
 Koherenca, 25  
     časovna, 25, 27  
     prostorska, 26, 32  
 Kompleksna ukrivljenost, 42  
 Kompleksni krivinski radij, 42
- Laguerre-Gaussovi snopi, 44  
 Laser  
     Nd:YAG, 91  
 Lastne frekvence resonatorja, 53, 54, 60  
 LiNbO<sub>3</sub>, 88, 101, 121, 130  
 Lomni količnik, 10, 21, 94  
     efektivni, 105  
     izredni, 22  
     nelinearni, 105  
     redni, 22  
 Lomni zakon, 15, 23
- Magnetizacija, 9  
 Magnetna permeabilnost, 9  
 Magnetna susceptibilnost, 9  
 Magnetno polje  
     gostota, 9  
     jakost, 9, 11  
 Makerjeve oscilacije, 93  
 Maxwellove enačbe, 9  
 Metoda vzdolžnega premika, 107  
 Michelsonov interferometer, 27
- Nasičena absorpcija, 75  
 Nelinearna optika, 87  
     drugega reda, 89  
     tretjega reda, 104  
 Nelinearna Schrödingerjeva enačba, 109, 114  
 Neujemanje faz, 101
- Obosna valovna enačba, 38, 56, 98  
 Obrnjena zasedenost, 76  
 Omejen snop, 37  
 Optična fazna konjugacija, 114  
 Optična indikatrisa, 21  
 Optična os, 22  
 Optični parametrični oscilator, 102  
 Optično črpanje, 76  
 Optično parametrično ojačevanje, 99  
 Optično podvajanje frekvenc, 89, 91, 96  
 Optično usmerjanje, 89, 103
- Parametrično ojačevanje, *glej* Optično parametrično ojačevanje  
 Planckov zakon, 70  
 Ploščica  $\lambda/2$ , 14, 124  
 Ploščica  $\lambda/4$ , 14, 127  
 Pockelsov pojav, 120  
 Pockelsov tenzor, *glej* Elektro-optični tenzor  
 Polarizacija valovanja, 13  
     TE, 15  
     TM, 15  
 Poyntingov teorem, 11  
 Poyntingov vektor, 11, 12  
 Presek za absorpcijo, 74  
 Presek za stimulirano sevanje, 74  
 Preslikava čez lečo, 46
- Raman-Nathov uklon, 131, 137  
 Ravn val, 12, 38, 67  
 Rayleighova dolžina, 40  
 Resonator, 53  
     ciklični, 66  
     koncentrični, 59  
     konfokalni, 58, 61, 62, 64  
     nestabilen, 59  
     odprt, 54  
     parametrični oscilator, 102  
     planparalelni, 56, 59, 61  
     simetrični, 57  
 Robni pogoji, 10
- Samozbiranje, 104, 106  
 Saturacijska gostota toka, 75, 78  
 Sevanje črnega telesa, 69  
 SFG, *glej* Generacija vsote frekvenc  
 SHG, *glej* Optično podvajanje frekvenc  
 Soliton  
     fazna hitrost, 110  
     krajevni, 107, 108  
     optični, 111, 112  
 Spekter, 29  
     Gaussov, 29, 31  
     Lorentzov, 29, 31, 63, 72  
     Planckov, 32  
 Spektralna črta  
     homogena razširitev, 79  
     nehomogena razširitev, 79  
 Spektralna širina, 30  
 Spontano sevanje, 70, 84  
 Stabilnost resonatorja, 55, 57, 60  
 Stimulirano sevanje, 71, 84

Susceptibilnost  
linearna, 87  
nelinearna, 87  
nelinearna, efektivna, 95

Telur, 88

Teraherčno valovanje, 103

Tirna vrtilna količina, 45

Ujemanje faz, 92, 93, 96, 98, 100, 104

Uklon, 17, 37, 64

Valovna enačba, 10, 89

Valovni vektor, 12

van Cittert-Zernikov teorem, 34

Wiener-Hinčinov teorem, 30

Youngov poskus, 25, 32

Z-scan, *glej* Metoda vzdolžnega premika

Zasedenost stanj, 72

ZnTe, 121