

## VIII SKYRIUS

**ŠVIESOS STIPRINIMAS IR GENERAVIMAS**

Fizikos sritis, vadinama *kvantine elektronika*, yra mokslas, nagrinėjantis elektromagnetinių bangų sąveikos su medžiaga teoriją ir generavimo metodus dėl priverstinio (indukuotojo) kvantinių sistemų (molekulių, atomų, jonų) spinduliavimo, o taip pat įrangas, kuriose vyksta elektromagnetinės spinduliuotės generavimas optinėje bangų srityje. Tokie įrenginiai vadinami *lazeriais* (arba *optiniais kvantiniais generatoriais*). Žodis „lazeris“ atsirado 1960 m., kai amerikiečių mokslininkas Meimenas sukūrė pirmąjį pasaulyje optinį kvantinį generatorių, skleidžiantį raudonąją šviesą. Šis žodis yra angliškos frazės „Light amplification by stimulated emission of radiation“ (šviesos stiprinimas indukuotuoju spinduliavimu) santrumpa.

**8.1. SAVAIMINIS IR PRIVERSTINIS SPINDULIAVIMAS**

Optinio kvantinio generatoriaus veikimas grindžiamas tokiais elektromagnetinės bangos sąveikos su medžiaga procesais: savaiminiu (spontaniu) ir priverstiniu (indukuotuoju) spinduliavimu bei sugertimi. Šių klausimų nagrinėjime didelį indėlį įnešė Einšteinas. Įvedęs į kvantinę spinduliavimo teoriją statistines sąvokas ir panaudojęs detaliosios pusiausvyros principą – *kai sistema yra statistinėje pusiausvyroje, bet kokių tiesioginių šuolių iš vienos būsenos į kitą skaičius yra lygus atvirkščiuju šuolių skaičiui*, – jis ne tik naujai pagrindė Planko šiluminio spinduliavimo dėsnį, bet ir giliau išsiskverbė į elektromagnetinio lauko ir medžiagos sąveikos esmę. Nustatyta, kad šalia anksčiau žinomų procesų – sugerties ir savaiminio spinduliavimo – yra trečiasis procesas – priverstinis spinduliavimas.

**Savaiminis spinduliavimas.** Savaiminio spinduliavimo dėsnį Einšteinas suformulavo kaip tikimybinį: kai nėra išorinio spinduliuotės lauko, yra tam tikra dalelės savaiminio šuolio iš aukštesniojo  $E_2$  energijos lygmens 2 į žemesnįjį  $E_1$  energijos lygmenį 1 tikimybė (8.1.1 a pav.). Šuolių skaičius per vienetinį laiką vadinamas *šuolio tikimybe*  $A_{21}$ .

Savaiminės spinduliuotės galia išreiškiama taip:

$$W_{\text{sav}} = A_{21} N_2 h \nu.$$

čia  $N_2$  – dalelių skaičius lygmenyje 2.

Koeficientas  $A_{21}$  nusako savaiminio spinduliavimo tikimybę ir vadinamas savaiminio spinduliavimo *Einšteino koeficientu*. Jis susijęs su sužadintosios būsenos gyvavimo trukme  $\tau$ , kai nėra nespindulinių šuolių, tokiu sąryšiu:

$$A_{21} = \frac{1}{\tau}.$$

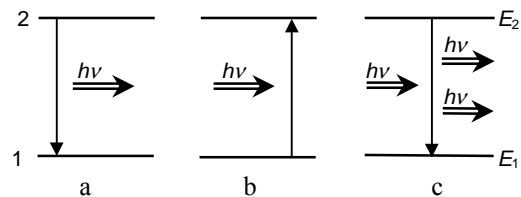
Savaiminės spinduliuotės galia išreiškiama taip:

$$W_{\text{sav}} = W_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right).$$

Čia  $W_0 = A_{21} N_{20} h\nu$  nusako savaiminės spinduliuotės galią pradiniu laiko momentu.

Savaiminiuose šuoliuose įvairios dalelės spinduliuoja ne vienu metu ir nepriklausomai viena nuo kitos, todėl jų spinduliuojamųjų fotonų fazės nesusietos tarpusavyje, t. y. savaiminė spinduliuotė yra nekoherentinė. Be to spinduliojamojo fotono sklidimo linkmė ir poliarizacija yra atsitiktinės, o dažnis kinta kažkokiam tai ruože.

**Priverstinis spinduliavimas.** Einšteino teiginio prasmė apie priverstinį spinduliavimą yra ta, kad veikiant  $\nu$  dažnio elektromagnetiniam laukui molekulė gali pereiti iš žemesniojo energijos lygmens  $E_1$  į aukštesnįjį  $E_2$  sugerdama energijos kvantą  $h\nu = E_2 - E_1$  (8.1.1 b pav.), arba pereiti iš aukštesniojo lygmens  $E_2$  į žemesnįjį  $E_1$  išspinduliuodama energijos kvantą  $h\nu = E_2 - E_1$  (8.1.1 c pav.). Pirmasis procesas vadinamas *sugertimi*, antrasis – *priverstiniu (indukuotuoju) spinduliavimu*. Kiekvieno proceso sparta proporcinga atitinkamoms tikimybėms  $B_{12}u$  ir  $B_{21}u$  (čia  $B_{12}$  ir  $B_{21}$  – sugerties ir priverstinio spinduliavimo Einšteino koeficientai,  $u$  – spinduliuotės spektrinis energijos tankis). Iš detaliosios pusiausvyros principo išplaukia, kad esant termodinaminei pusiausvyrai šviesos kvantų skaičius  $dN_1$ , sugertų per laiką  $dt$  šuolio  $1 \rightarrow 2$  metu, turi būti lygus kvantų skaičiui  $dN_2$ , išspinduliuotų atvirkštinių šuolių  $2 \rightarrow 1$  metu. Sugertųjų kvantų skaičius, pagal



8.1.1 pav. Trijų procesų schema  
(a – savaiminis spinduliavimas, b – sugertis,  
c – priverstinis spinduliavimas)

Einšteiną, proporcingas spektriniam veikiančiosios spinduliuotės tankiui  $u$  ir dalelių skaičiui  $N_1$  apatiniame lygmenyje:

$$dN_1 = B_{12} u N_1 dt. \quad (8.1.1)$$

Sandauga  $B_{12} u N_1$  yra sugerties šuolių skaičius per vienetinį laiką.

Analogiškai spinduliuotę sukeliančiųjų šuolių skaičius  $dN_2$  išreiškiamas taip:

$$dN_2 = (A_{21} + B_{21} u) N_2 dt; \quad (8.1.2)$$

čia  $N_2$  – sužadintųjų dalelių skaičius būsenoje 2.

Koeficientų  $B_{12}$  ir  $B_{21}$  išraiškos ir jų sąryšis su  $A_{21}$  gaunamos kvantinėje elektrodinamikoje. Tačiau pateiksime tik sąryšius tarp Einšteino koeficientų. Tam tikslui panagrinėsime uždara ertmę, kurios sienelės sugeria ir spinduliuoja elektromagnetinę spinduliuotę. Esant statistinei pusiausvyrai, spinduliuotė ertmės viduje nusakoma spektriniu spinduliuotės energijos tankiu  $u_{\nu,T}$ , nusakomu Planko formule:

$$u_{\nu,T} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}.$$

Kadangi esant termodinaminei pusiausvyrai  $dN_2 = dN_1$ , naudojant (8.1.1) ir (8.1.2) išraiškas galima užrašyti taip:

$$B_{12} u_{\nu,T} N_1 = (A_{21} + B_{21} u_{\nu,T}) N_2.$$

Iš čia

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{B_{12} u_{\nu,T}}{A_{21} + B_{21} u_{\nu,T}}. \quad (8.1.3)$$

Esant termodinaminei pusiausvyrai dalelių skirstinys energijos lygmenyse nusakomas Bolcmano dėsnium:

$$N = N_0 g \exp\left(-\frac{E}{kT}\right).$$

Tada

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{g_2}{g_1} \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{kT}\right). \quad (8.1.4)$$

čia  $g_1$  ir  $g_2$  – statistiniai lygmenų svoriai, kurie nurodo, kiek nepriklausomų atominės sistemos būsenų turi vienodą energiją (paprastumo dėlei manysime, kad  $g_1 = g_2 = 1$ ).

Sulyginus (8.1.3) ir (8.1.4) išraiškas ir kadangi  $E_2 - E_1 = h \nu$ , galima užrašyti taip:

$$u_{\nu,T} = \frac{A_{21}}{B_{12} \exp(h\nu/kT) - B_{21}}. \quad (8.1.5)$$

Kai  $T \rightarrow \infty$ , spektrinis spinduliuotės tankis  $u$  turi neribotai didėti, t. y. (8.1.5) išraiškos vardiklis turi būti lygus nuliui. Tada

$$B_{12} = B_{21}. \quad (8.1.6)$$

Sulyginus (8.1.5) išraišką su Planko formule, galima užrašyti taip:

$$B_{21} = \frac{c^3}{8\pi h\nu^3} A_{21}. \quad (8.1.7)$$

(8.1.6) ir (8.1.7) sąryšiai tinka visoms sistemoms, jos nesusietos su išorės temperatūra, reiškia tinka ir nesant pusiausvyrai.

Savo savybėmis priverstinis spinduliavimas iš esmės skiriasi nuo savaiminio. Svarbiausia yra tai, kad susikūręs srautas sklinda ta pačia linkme kaip ir pradinis žadinantysis. Be to priverstinio ir pirminio srautų dažniai ir poliarizacijos griežtai vienodos. Priverstinis srautas yra koherentinis su pradiniu žadinančiuoju.

## 8.2. ŠVIESOS STIPRINIMAS IR GENERAVIMAS

Sugerties ir priverstinio spinduliavimo reiškiniai visuomet pasireiškia ir sudaro dvi neatskiriamas puses vieno ir to paties proceso – šviesos sąveikos su medžiaga. Plintančiojo kažkokia kryptimi šviesos srauto dalį medžiaga sugeria ir tuo pat metu kažkokią sugertosios energijos dalį gražina priverstinio spinduliavimo būdu. Todėl eksperimento metu negalima išmatuoti atskirai sugerties arba priverstinės spinduliuotės galių; nustatomas jų skirtumas:

$$W_{\text{sug}} = (B_{12} N_1 - B_{21} N_2) u h \nu.$$

Dažniausiai  $B_{12} N_1 > B_{21} N_2$ , todėl  $W_{\text{sug}} > 0$  ir perėjęs terpę šviesos srautas dėl sugerties susilpnėja. Tačiau jei sistema yra būsenoje, kurioje dalelių skaičius  $N_2$  lygmenyje 2 tampa didesniu už dalelių skaičių  $N_1$  lygmenyje 1, tai  $B_{12} N_1 < B_{21} N_2$ , t. y. sugerties galia tampa neigiama ( $W_{\text{sug}} < 0$ ). Tokia terpė veikiant šviesai ne sugeria, o išskiria šviesos energiją ir stiprina į ją krintančiąją spinduliuotę. Pradžioje šis reiškinys pavadintas *neigiama*

*sugertimi*. Dabar dažniau naudojamas terminas – *stiprinimas*. Stiprinimo galia  $W_{st} = -W_{sug}$ .

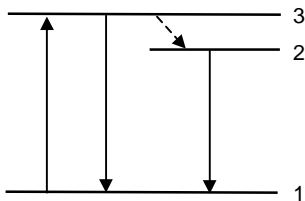
Vienas iš svarbiausių optinių medžiagos parametrų yra sugerties koeficientas  $k^{sug}$ , kuris išreiškiamas taip:

$$k_{12}^{sug} = \frac{W_{sug}}{cu} = \frac{h\nu}{c} (B_{12} N_1 - B_{21} N_2) = \frac{B_{12} h\nu}{c} (N_1 - N_2).$$

Stiprinimo koeficientas  $k^{st}$ , nusakantis šviesos srauto intensyvumo prieauglį pereinant vienetinio ilgio sluoksni, yra lygus

$$k_{21}^{st} = -k_{12}^{sug} = \frac{h\nu}{c} (B_{21} N_2 - B_{12} N_1) = \frac{B_{21} h\nu}{c} (N_2 - N_1).$$

Iš šios išraiškos išplaukia, kad tarp dviejų energijos lygmenų vykstančiųjų optinių šuolių metu stiprinimas ( $k^{st} > 0$ ) bus tada, kai viršutinio lygmens užpilda  $N_2$  viršija apatinio lygmens užpildą  $N_1$ , t. y. kai yra taip vadinamas *inversinis dalelių skirstinys* energijos lygmenyse ( $N_2 > N_1$ ). Terpė su inversine energijos lygmenų užpilda vadinama *aktyviaja*. Svarbu pabrėžti, kad norint sukurti aktyviąją terpę visuomet reikalinga išorinė papildomoji energija, kuri po to priverstiniame spinduliavime iš dalies pasikeičia į stiprinamosios elektromagnetinės spinduliuotės energiją. Dviejų lygmenų optinio sužadavimo ypatumas tame, kad negalima perkelti į sužadintąją būseną daugiau nei pusę dalelių ir todėl negalima sukurti inversinę lygmenų užpildą. Tokia padėtis susidaro todėl, kad yra priverstinis spinduliavimas.



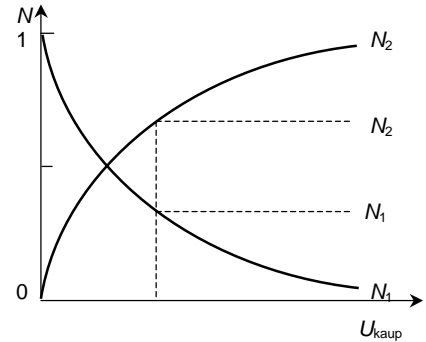
8.2.1 pav. Šuoliai trijų lygmenų sistemoje žadinant kanale 1→3

Kai kurių spinduliuotės sąveikos su medžiaga savybių negalima aprašyti dviejų lygmenų modelių. Labai dažnai po sužadavimo sistema ne optiniu būdu pereina į kokią nors trečiąją būseną (8.2.1 pav.). Tokia situacija yra, pvz., rubine. Trečioji būsena 2 yra *metastabilioji* (ilgai gyvuojanti).

Dalelių skaičiaus  $N_1$  ir  $N_2$  priklausomybės nuo išorinės žadinančiosios spinduliuotės intensyvumo pavaizduotos 8.2.2 pav. Dalelių

skaičius lygmenyje 3 menkas, t. y. lygmuo 3 yra savotiškas „virsmo“ punktas, kuriame dalelės ilgai neužsilaiko. Didėjant kaupinančiosios energijos tankiui  $u_{kaup}$ ,  $N_2$  vertė staigiai auga, o  $N_1$  mažėja. Skirtingai nuo dviejų lygmenų sistemos, šiuo atveju dalelių skaičius pradiniame lygmenyje 1 gali sumažėti iki nulio ir visos dalelės gali susikaupti metastabiliam lygme-

nyje 2. Po kreivių  $N_2(u_{\text{kaup}})$  ir  $N_1(u_{\text{kaup}})$  susikirtimo taško susidaro inversinė lygmenų užpilda ( $N_2 > N_1$ ). Kai  $u_{\text{kaup}} < u_{\text{kaup}}^{\text{inv}}$ , sugerties koeficientas kanale  $1 \rightarrow 2$  teigiamas. Inversijos taške jis lygus nuliui, o kai  $u_{\text{kaup}} > u_{\text{kaup}}^{\text{inv}}$ , jis tampa neigiamu, t. y. tenkinama pagrindinė spinduliuotės stiprinimo sąlyga.



8.2.2 pav. Lygmenų užpildos priklausomybė nuo kaupinimo intensyvumo kanale  $1 \rightarrow 3$

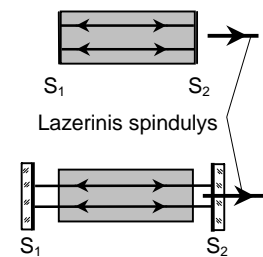
Inversinės užpildos sudarymas dar ne garantuoja didelio išeinančiojo iš aktyviosios medžiagos šviesos srauto intensyvumo. Stiprinimo laipsnį lemia stiprinimo koeficientas  $k_{\text{st}}$  ir aktyvaus sluoksnio ilgis  $l$ . Ši priklausomybė paprasčiausiu atveju gali būti išreikšta taip:

$$I_i = I_0 \exp(k_{\text{st}} l) ;$$

čia  $I_0$  – krintančiosios į sugeriantįjį medžiagos sluoksnį šviesos intensyvumas,  $I_i$  – išeinančiojo iš jo šviesos intensyvumas,  $k_{\text{st}} = -k_{\text{sug}}$ .

Jei pasisektų smarkiai padidinti aktyvaus strypo ilgį, išeinančioji iš jo galų spinduliuotė būtų pakankamai intensyvi. Be to ji būtų ir tada, kai nėra išorinio srauto. Pirminis impulsas būtų savaiminių šuolių metu išspinduliuota spinduliuotė, kuri daug kartų stiprinama sklindant didelio ilgio sluoksniu. Šis reiškinys vadinamas *superluminescencija*.

Aktyvioji medžiaga gali tapti šviesos virpesių generatoriumi, jei sklaidžiamosios šviesos dalis visą laiką yra aktyviojoje medžiagos zonoje ir sukelia vis naujų ir naujų dalelių priverstinę spinduliuotę, t. y. kai yra grįžtamasis ryšys. Tam aktyvioji medžiaga įdedama tarp dviejų lygiagrečių veidrodžių. Tarkim, pavyzdžiui, kad aktyvioji medžiaga yra cilindrinis strypas, o veidrodžių  $S_1$  ir  $S_2$  plokštumos statmenos strypo ašiai (8.2.3 pav. ). Tada daug kartų atsispindėjęs nuo veidrodžių šviesos spindulys daug kartų pereis aktyvųjį strypą, kiekvieną kartą stiprėdamas dėl dalelių priverstinių šuolių. Gaunamas atvirasis *optinis rezonatorius*, savotiškas Fabri ir Pero interferometras, užpildytas aktyviaja terpe. Dėl daugkartinio šviesos spindulio atspindžio rezonatoriaus viduje susikau-

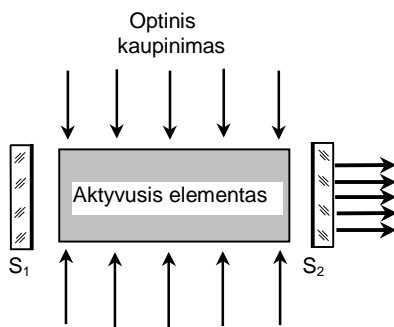


8.2.3 pav. Optiniai rezonatoriai

pia ženklus šviesos srauto tankis. Jo dalis, lygi  $1 - R$  ( $R$  – iš dalies skaidraus veidrodžio atspindžio faktorius), išeina į išorę ir sudaro lazerinę spinduliuotę. Tokia situacija susidaro netgi tada, kai nėra jokios išorinės spinduliuotės, t. y. sistema tampa generatoriumi.

Toks generatorius yra savarankiškas elektromagnetinės spinduliuotės šaltinis. Generatoriaus spinduliuotė nusakoma kaupinimo galia ir metodu, veidrodžių atspindžio ir praleidimo ypatumais, rezonatoriaus viduje pasireiškiančiais energijos nuostoliais.

Bangos srauto dalis iš rezonatoriaus išeina. Be to yra ir kitokie nuostoliai, kurie nusakomi šviesos sklaida terpės netolygumuose bei veidrodžiuose, sugertimi, difrakcija ir kt. Generavimas galimas tik tada, kai krantinčiosios į pusskaidrų veidrodį bangos energiją yra ne mažesnė už energiją ankstyvesniojo kritimo atveju. Tai reiškia, kad šviesos stiprinimas turi būti pakankamai didelis, viršijantis tam tikrą slenkstinę vertę. Jei stiprinimas dviejuose perėjimuose rezonatoriuje didesnis už suminius nuostolius, tai kiekvieno perėjimo atveju bangos intensyvumas didėja. Tačiau šis didėjimas yra ne begalinis. Esant konkrečiai kaupinamą šaltinio galiai, darbinių lygmenų inversinė užpilda mažėja, didėjant spinduliuotės energijos tankiui



8.2.4 pav. Principinė optinio lazerio schema

rezonatoriuje ir sumažėja stiprinimo koeficientas. Dėl šio *netiesinio isotinimo* reiškinio lazeryje nusistovi stacionarus generavimo režimas, kai suminiai energijos nuostolius tiksliai kompensuoja stiprinimas aktyviojoje terpėje.

Principinė lazerio su optiniu kaupinimu schema pavaizduotas 8.2.4 pav. Aktyvusis elementas kaupinamas specialiųjų ksenono dujų išlydžio impulsinių lempų šviesa. Blyksnio trukmė apie  $10^{-3}$  s.

Taigi lazerio veikimas grindžiamas šiais pagrindiniais momentais:

1. Atominių sistemų priverstiniu spinduliavimu;
2. Termodinamiškai nepusiausvyriųjų sistemų naudojimu, kuriose galima stiprinti šviesą, t. y. inversinių sistemų sukūrimu;
3. Teigiamas grįžtamasis ryšys, kuris stiprinančiąją sistemą paverčia koherentinės spinduliuotės generatoriumi.

### 8.3. LAZERIO SPINDULIUOTĖS SAVYBĖS

Lazeris yra naujas elektromagnetinių bangų šaltinis. Jo spinduliuotės savybės yra unikalios, smarkiai besiskiriančios nuo įprastinių spindulių: kaitrinių lempų, liuminescencinių lempų, elektros lanko, kibirkšties ir t. t.

Lazerio spinduliuotės **kryptingumas** yra viena iš pagrindinių jos savybių. Lazerio spindulio plėtra yra kelios kampinės minutės, o kartais net kelios sekundės. Pavyzdžiui, Mėnulyje susidariusi lazerio pluoštelio dėmė yra tik keli kilometrai. Spinduliuotės kryptingumą lemia tai, kad maksimaliai stiprinami tie spinduliai, kurie sklinda lygiagrečiai su rezonatoriaus ašimi. Griežtai lygiagrečių spindulių sukurti, žinoma, negalima, nes tam trukdo šviesos difrakcija. Spindulių plėtros kampas principialiai negali būti mažesnis už difrakcijos ribą  $\delta\varphi \approx \lambda/D$  (čia  $D$  – pluoštelio plotis).

Lazerio spinduliuotės **monochromatiškumas** išskirtinai didelis. Atomų sistemos sugertis ir spinduliuotė nusakoma tam tikru dažnių ruožu, kuris vadinamas spektrinės linijos pločiu. Lazerio spinduliuotėje šis ruožas yra labai siauras, t. y. didelis monochromatiškumas.

Pagrindinį vaidmenį lazerio spinduliuotės spektro linijos susiaurėjime vaidina optinis rezonatorius. Optinių rezonatorių ypatumas tame, kad jų matmenys gerokai didesni už bangos ilgį. Dėl to vienu metu sužadinama daug nuosavųjų virpesių. Tokie virpesiai vadinami rezonatoriaus *modomis*. Moda nusako stovinčiosios elektromagnetinės bangos rezonatoriuje konfigūraciją.

Fabri ir Pero tipo rezonatoriaus modos pirmuoju artiniu gali būti suprantamos kaip dviejų plokščiųjų elektromagnetinių bangų, sklindančiųjų priešpriešiais palei rezonatoriaus ašį, superpozicija. Taip manant nesunkiai gaunami rezonansiniai dažniai, jei tenkinama sąlyga, kad rezonatoriaus ilgis  $L$  lygus sveikajam pusbangių skaičiui, t. y.

$$L = m \frac{\lambda}{2}; \quad (\text{čia } m = 1, 2, 3, \dots).$$

Ši sąlyga reikalinga tam, kad abiejų rezonatorių veidrodžių paviršiuose stovinčiosios elektromagnetinės bangos elektrinis laukas būtų lygus nuliui. Tada rezonansiniai dažniai:

$$\nu_m = m \frac{c}{2L}.$$



Dvi gretimąsias modas atitinkančių dažnių skirtumas:

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L} .$$

Šios dvi modos skiriasi viena nuo kitos lauko pasiskirstymu palei rezonatoriaus ašį, t. y. išilgine linkme. Todėl jos vadinamos *išilginėmis modomis*. Be jų rezonatoriuje susidaro ir *skersinės modos*, kurios nusako lauko pasiskirstymą plokštumoje, statmenoje rezonatoriaus ašiai.

Lazerio spinduliuotės spektro plotį pagrindinai lemia generuojančiųjų modų skaičius. Optiniuose rezonatoriuose vienu metu gali būti sužadinama daug modų (taip vadinamas daugiamodis generavimo režimas). Lazeris spinduliuoja įvairių dažnių rinkinį, kurie yra aktyviosios terpės liuminescencijos linijos viduryje. Pvz., kietųjų kūnų lazerių, veikiančių daugiamodiniu režimu, spinduliuotės spektro linijos plotis  $\Delta\nu_{\text{gen}}$  gali būti 1 GHz eilės. Reikia pabrėžti, kad daugiamodis lazerio režimas blogina koherentiškumą bei spinduliuotės kryptingumą.

Kartais reikia, kad lazeris generuotų tik vieną tam tikro dažnio modą. Tam naudojamos specialios priemonės, galinčios užslopinti nepageidaujamas aukštesniųjų eilių modas (taip vadinama *modų selekcija*). Užslopinus aukštesniųjų eilių virpesius, išorinė energija perduodama pagrindinei modai ir sutelkia šioje modoje ji gerokai padidėja. Teoriškai įvertinus vienmodžio 1 mW galios lazerio spektro linijos plotį gaunama vertė  $\Delta\nu_{\text{gen}} \approx 5 \cdot 10^{-3}$  Hz. Praktiškai tokie reiškiniai, kaip vibracija, terminis išplitimas, padidina šią vertę. Dujų lazerio  $\Delta\nu_{\text{gen}} = (50 \div 500)$  Hz, nors kartais gaunama kelių hercų linijos pločio vertė.

Lazerio spinduliuotės **koherentiškumas** yra didelis.

Bet kuri elektromagnetinė banga nusakoma *erdviniu* ir *laikiniu koherentiškumu*. Panagrinėsime konkrečiau.

Parinksime du taškus  $P_1$  ir  $P_2$  taip, kad laiko momentu  $t_0$  per juos per-eina elektromagnetinės bangos frontas. Sąlyga teigia, kad laiko momentu  $t_0$  elektrinių laukų fazių skirtumas tuose taškuose lygus nuliui. Jei šis fazių skirtumas išlieka lygus nuliui bet kuriuo laiko momentu  $t$ , sakoma, kad tarp dviejų taškų yra pilnutinis koherentiškumas. Jei ši sąlyga tenkinama bet kokiais bangos fronto taškų porai, ši banga apibūdinama *pilnutiniu erdviniu koherentiškumu*.

Panagrinėsime bangos elektrinį lauką taške P laiko momentais  $t$  ir  $t + \tau$ . Jei trukmėje  $\tau$  lauko virpesių fazių skirtumas išlieka toks pat bet kokių laiko momentu  $t$ , sakoma, kad trukmėje  $\tau$  yra *laikinis koherentiškumas*. Jei

tokia sąlyga tenkinama bet kokiai  $\tau$  vertei, banga apibūdinama *pilnutiniu laikiniu koherentiškumu*.

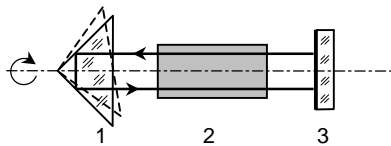
Vieną skersinę bangą generuojantis lazeris skleidžia pilnutinio erdvinio koherentiškumo spinduliuotę. Laikinis koherentiškumas priklauso nuo juostos pločio  $\Delta\nu_{\text{gen}}$ . Pavyzdžiui, nuolatinio režimu veikiančio dujų lazerio  $\Delta\nu_{\text{gen}} = (50 \div 500)$  Hz ir koherentiškumo ilgis keli kilometrai, o įprastinių spinduolių (pvz., natrio lempos) –  $\tau_{\text{koh}} \approx 10^{-10}$  s ir  $L_{\text{koh}} \approx 3$  cm.

Lazerio spinduliuotės **galia** priklauso ne tik nuo kaupinimo intensyvumo, bet ir nuo generavimo impulso trukmės. Panagrinėsime rubino lazerį, kuris dažniausiai veikia impulsiniu režimu. Rubino lazeris gali veikti dviem režimais: laisvojo generavimo ir kokybės moduliacijos. Rubino lazerio veikimas laisvojo generavimo režime tęsiasi tol, kol impulsinės lempos spinduliuotės intensyvumas netampa per daug mažas ir inversinė užpilda nesumažėja žemiau slenkstinės vertės. Įprastinių standartinių rubino kristalų, kurių ilgis keli centimetrai ir skersmuo 1 cm, pilnutinė spinduliuotės impulso energija šiame režime yra keli džauliai, generavimo impulso trukmė milisekundės ir vidutinė spinduliuotės galia keli kilovatai.

Jei generavimo impulsų trukmė sumažėja iki ( $10^{-7} \div 10^{-9}$ ) s ir mažiau, tai generatoriaus išėjimo smailinė galia padidėja iki ( $10 \div 1000$ ) MW ir daugiau. Tokie trumpi galingi impulsai gaunami lazeriuose, kurie veikia valdomosios rezonatoriaus kokybės režime (*kokybės moduliavimas*).

Lazerio veikimo kokybės moduliavimo režime principas yra toks. Tarkim, kad į rezonatoriaus vidų įdėta užtūra. Kai užtūra uždaryta, generavimas nevyksta, ir todėl inversijos užpilda gali būti labai didelė. Kai kaupinimo galia pakankama, metastabiliajame lygmenyje galima sukaupti beveik visas aktyviosios medžiagos daleles. Tačiau generavimo sąlyga nebus tenkinama, nes rezonatoriaus nuostoliai gan dideli. Jei užtūra greitai atidaroma, stiprinimas lazeryje gerokai viršija nuostolius ir sukauptoji energija išsiskiria trumpo intensyvaus šviesos impulso pavidalu. Kadangi šiuo atveju rezonatoriaus kokybė kinta nuo mažų iki didelių verčių, tai toks režimas vadinamas *rezonatoriaus kokybės moduliavimo* režimu. Kai užtūra atidaroma greitai (per trumpesnę už lazerinio impulso susidarymą laiką), išėjusioji spinduliuotė yra vienas gigantiškas impulsas. Jei užtūra atidaroma lėtai, gali generuoti daug impulsų.

Optinio rezonatoriaus kokybės valdymui naudojami įvairūs įrenginiai, kurie skirstomi į aktyviusius ir pasyviuosius. Aktyviesiems priklauso įvairūs optiniai mechaniniai, elektrooptiniai ir magnetooptiniai moduliatorių tipai. 8.3.1 pav. pavaizduota rezonatoriaus kokybės valdymo schema, nau-

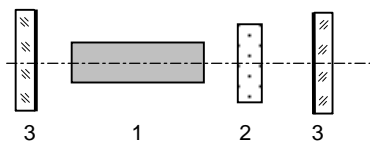


8.3.1 pav. Visiškojo vidaus atspindžio prizmės naudojimas kokybės valdymui (1 – besisukančioji prizmė, 2 – aktyvioji terpė, 3 – išeinamasis veidrodis)

dojant visiškojo vidaus atspindžio prizmės sukimą. Rezonatorius turi aukštą kokybę tik trumpoje trukmėje, kai prizmės briauna lygiagreti su nejudančiuoju veidrodžiu. Naudojant įprastinius apsisukimo greičius (20000 ÷ 30000) aps/min, kokybės perjungimo laikas yra apie  $10^{-7}$  s. Dar trumpesni laikai (apie  $10^{-9}$  s) gaunami elektrooptine užtūra, kurioje

naudojama Kero celė ir poliarizatorius. Aktyviuose modulatoriuose nuostolių atjungimo momentas nusakomas išorinėmis sąlygomis.

Kokybės įjungimas pasyviaisiais modulatoriais pilnutinai nusakomas spinduliuotės energijos tankiu rezonatoriaus viduje ir jų optinėmis savybėmis. Pasyvieji modulatoriai (arba pasyviosios užtūros) gali būti skaidrėjančieji filtrai, spinduliuotės poveikyje yrančios plėvelės, puslaidininkiniai veidrodžiai, kurių atspindžio faktorius priklauso nuo šviesos intensyvumo, organiniai kristalai ir t. t. Ypatingą vietą užima užtūros, pagamintos iš skaidrėjančiųjų filtrų. Jos paprastos ir pasižymi geromis savybėmis. Jų veikimas grindžiamas skaidrėjančiųjų filtrų sugebėjimu grįžtamai keisti sugerties koeficientą, veikiant intensyviais šviesos srautais. Įdėjus į rezonatorių pasyviają užtūrą (8.3.2 pav.), padidėja slenkstinis kaupinimo lygis, ir dėl to generavimo



8.3.2 pav. Pasyviosios užtūros naudojimas kokybės moduliavimui (1 – aktyvioji terpė, 2 – pasyvioji užtūra, 3 – rezonatoriaus veidrodžiai)

pradžios momentu metastabiliajame lygmenyje susikaupia didelis aktyviųjų dalelių skaičius. Kai prasideda generavimas, pereinanti per užtūrą lazerinė spinduliuotė staigiai sumažina jos nuostolius ir sukauptoji energija išspinduliuojama galingo impulso pavidalu. Šio impulso trukmė beveik tokia pati, kaip ir momentinio kokybės įjungimo

režime. Tokios užtūros supaprastina generatorių konstrukciją ir išeinančiojo impulso parametrai tampa artimi ribiniams.

Kai lazerinė spinduliuotė pereina terpę su inversine užpilda, ji stiprinama dėl priverstinių šuolių, kuriuos lydi terpės molekulių, atomų arba jonų spinduliuavimas. Tokie įrenginiai, kurie stiprina optinę elektromagnetinę spinduliuotę, vadinami *optiniais kvantiniais stiprintuvais*. Juose terpė su inversine užpilda sukuriama taip pat kaip ir optiniuose lazeriuose. Naudojant kelis nuosekliai išdėstytus kvantinius stiprintuvus, lazerinės spinduliuotės galia padidėja iki  $10^{12}$  W, kai spinduliuotės energija 10 J.