

8. ŠVIESOS STIPRINIMAS IR GENERAVIMAS

Naudodamasis M.Planko idėjomis, N.Boras (*Bohr*) išplėtojo atomo spinduliavimo kvantinę teoriją. Pagal ją, atomas nusakomas tam tikromis stacionariosiomis būsenomis, kurių būdamas jis nespinduliuoja. Energija spinduliuojama arba sugerama atomui peršokant iš vienos stacionariosios būsenos į kitą (8.1 pav.). Tokio šuolio metu spinduliuojama arba sugerama monochromatinė banga, kurios dažnį lemia stacionariųjų būsenų energijų skirtumas:

$$h\nu = E_2 - E_1.$$

A.Einšteinas papildė N.Boro kvantinę teoriją kiekybiškai nusakdamas šviesos sugerties ir spinduliavimo procesus.

Panagrinėsime vienodų atomų dujas. Pagal N.Borą, kiekvienas atomas gali būti stacionariųjų būsenų 1, 2, 3, ..., kurių energijos E_1, E_2, E_3, \dots . Vidutinis i būsenos, kurios energija E_i , atomų skaičius vadinamas i lygmenis užpilda, ji priklauso nuo išorinių sąlygų. Jei, pvz., T temperatūros dujos yra termodinaminės pusiausvyros būsenos, tai užpilda nusakoma Bolcmano skirstiniu:

$$N_i = N_0 \exp\left(-\frac{E_i}{kT}\right);$$

čia N_0 – atomų skaičius vienetiniame dujų tūryje apatiniame energijos lygmenyje.

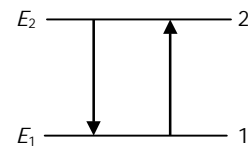
A.Einšteinas, nagrinėdamas spinduliuotės sąveiką su atomais, išskyrė tris procesus: savaiminį spinduliavimą, sugertį ir priverstinį spinduliavimą (8.2 pav.). Visi procesai nagrinėjami statistiškai, t. y. naudojant tikimybės sampratą.

Jei atomas yra 2 būsenos ir nepatiria išorinio poveikio, jis gali savaime pereiti į 1 būseną, kur energija mažesnė, ir atiduoti energijos skirtumą $E_2 - E_1$ fotono pavidalu. Toks procesas vadinamas *savaiminiu šviesos spinduliavimu*. Savaiminės spinduliuotės galia reiškia taip:

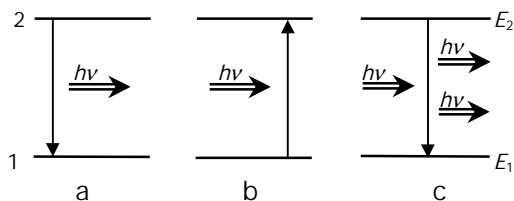
$$W_{\text{sav}} = A_{21} N_2 h\nu;$$

čia N_2 – dalelių skaičius lygmenyje 2. Koeficientas A_{21} nusako savaiminio spinduliavimo tikimybę ir vadinamas savaiminio spinduliavimo *Einšteino koeficientu*. Per savaiminius šuolius įvairios dalelės spinduliuoja ne vienu metu ir nepriklausomai viena nuo kitos, todėl jų spinduliuojamų fotonų fazės nesusietos tarpusavyje, t. y. savaiminė spinduliuotė nekoherentinė. Be to, spinduliuojamo fotono sklidimo linkmė ir poliarizacija atsitiktinės, dažnis kinta kuriame nors ruože.

Žemiausiame lygmenyje esantys nesužadinti atomai, veikiami išorinio elektromagnetinio lauko, pereina į sužadintąją būseną sugerdami energijos $E_2 - E_1 = h\nu$ fotoną. Sugerties šuolio tikimybė dažnių ruože nuo ν iki $\nu + d\nu$ proporcinga spektriniam spinduliuotės energijos tankiui u_ν , todėl galimas poveikis nagrinėjamajam procesui. Sugerties tikimybė per



8.1 pav. Energijos lygmenų schema



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

jų lygmenį išspinduliuoti $h\nu = E_2 - E_1$ energijos fotoną. Pastarieji šuoliai yra priverstiniai ir lemia priverstinį spinduliavimą. Kitaip tariant $h\nu$ energijos fotonas gali sukelti atomo kvantinį šuolį iš lygmens E_2 į E_1 , todėl atsiranda dar vienas $h\nu$ energijos fotonas. Dėl priverstinių šuolių atsiradusios spinduliuotės parametrai (dažnis, fazė, sklidimo kryptis, poliarizacija) yra tokie pat kaip pirminės spinduliuotės. Priverstinis srautas yra koherentinis pradiniam žadinančiajam srautui. Priverstinių šuolių tikimybė per vienetinį laiką yra $B_{21}u_\nu$. Koefficientas B_{21} vadinamas *priverstinio spinduliavimo Einšteino koeficientu*. Jei išorinio lauko nėra ($u_\nu = 0$), priverstiniai šuoliai nevyksta. Taigi išorinis elektromagnetinis laukas sukelia šuolius, per kuriuos vyksta energijos sugertis arba spinduliavimas.

Sugerties ir priverstinio spinduliavimo reiškiniai sudaro dvi neatskiriamas to paties proceso – šviesos ir medžiagos sąveikos – puses. Kuria nors kryptimi sklindančio šviesos srauto dalį medžiaga sugeria ir tuo pat metu kažkurią sugertosios energijos dalį grąžina priverstinio spinduliavimo būdu, todėl eksperimento metu negalima atskirai išmatuoti sugerties arba priverstinės spinduliuotės galios; nustatomas jų skirtumas:

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

Dažniausiai $B_{12}N_1 > B_{21}N_2$, todėl $W_{\text{sug}} > 0$, terpę perėjęs šviesos srautas dėl sugerties susilpnėja, tačiau jei sistemos dalelių skaičius N_2 lygmenyje 2 tampa didesnis 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 krintančią spinduliuotę. Pradžioje šis reiškinys buvo pavadintas *neigiamąja sugertimi*. Dabar dažniau naudojamas terminas – *stiprinimas*. Stiprinimo galia $W_{\text{st}} = -W_{\text{sug}}$.

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

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

Stiprinimo koeficientas k^{st} , nusakantis šviesos srauto intensyvumo prieaugį šviesai perėjus vienetinio ilgio sluoksni, lygus

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

vienetinį laiką lygi $B_{12}u_\nu$. Koefficientas B_{12} , nusakantis atominės sistemos sužadinimo tikimybę, vadinamas *sugerties Einšteino koeficientu*.

Be to, A. Einšteinas pateikė ir *priverstinio spinduliavimo* įvaizdį. Veikiant išoriniam elektromagnetiniam laukui sužadintosios būsenos atomai (pvz., būsenos E_2), pagal Einšteiną, gali ne tik sugerti energijos, bet ir grįždami į žemesnį energijos lygmenį išspinduliuoti $h\nu = E_2 - E_1$ energijos fotoną.

Pastarieji šuoliai yra priverstiniai ir lemia priverstinį spinduliavimą. Kitaip tariant $h\nu$ energijos fotonas gali sukelti atomo kvantinį šuolį iš lygmens E_2 į E_1 , todėl atsiranda dar vienas $h\nu$ energijos fotonas. Dėl priverstinių šuolių atsiradusios spinduliuotės parametrai (dažnis, fazė, sklidimo kryptis, poliarizacija) yra tokie pat kaip pirminės spinduliuotės. Priverstinis srautas yra koherentinis pradiniam žadinančiajam srautui. Priverstinių šuolių tikimybė per vienetinį laiką yra $B_{21}u_\nu$. Koefficientas B_{21} vadinamas *priverstinio spinduliavimo Einšteino koeficientu*. Jei išorinio lauko nėra ($u_\nu = 0$), priverstiniai šuoliai nevyksta. Taigi išorinis elektromagnetinis laukas sukelia šuolius, per kuriuos vyksta energijos sugertis arba spinduliavimas.

Sugerties ir priverstinio spinduliavimo reiškiniai sudaro dvi neatskiriamas to paties proceso – šviesos ir medžiagos sąveikos – puses. Kuria nors kryptimi sklindančio šviesos srauto dalį medžiaga sugeria ir tuo pat metu kažkurią sugertosios energijos dalį grąžina priverstinio spinduliavimo būdu, todėl eksperimento metu negalima atskirai išmatuoti sugerties arba priverstinės spinduliuotės galios; nustatomas jų skirtumas:

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

Dažniausiai $B_{12}N_1 > B_{21}N_2$, todėl $W_{\text{sug}} > 0$, terpę perėjęs šviesos srautas dėl sugerties susilpnėja, tačiau jei sistemos dalelių skaičius N_2 lygmenyje 2 tampa didesnis 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 krintančią spinduliuotę. Pradžioje šis reiškinys buvo pavadintas *neigiamąja sugertimi*. Dabar dažniau naudojamas terminas – *stiprinimas*. Stiprinimo galia $W_{\text{st}} = -W_{\text{sug}}$.

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

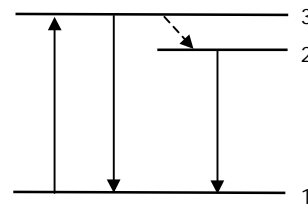
$$k_{12}^{\text{sug}} = \frac{W_{\text{sug}}}{cU} = \frac{h\nu}{c}(B_{12}N_1 - B_{21}N_2) = \frac{B_{12}h\nu}{c}(N_1 - N_2).$$

Stiprinimo koeficientas k^{st} , nusakantis šviesos srauto intensyvumo prieaugį šviesai perėjus vienetinio ilgio sluoksni, lygus

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

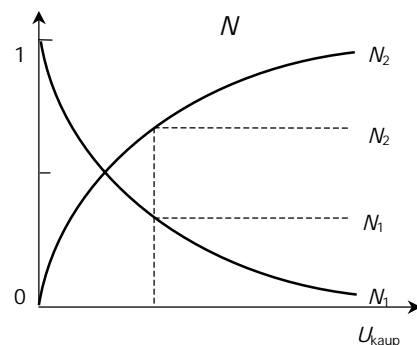
Iš šios išraiškos išplaukia, kad tarp dviejų energijos lygmenų vykstančių optinių šuolių metu spinduliuotė stiprinama ($k^{st} > 0$) tada, kai viršutinio energijos lygmens užpildą N_2 viršija apatinio lygmens užpildą N_1 , kai yra *inversinis dalelių pasiskirstymas* (arba *apgražinė lygmenų užpilda*) energijos lygmenyse ($N_2 > N_1$). Terpė su tokia energijos lygmenų užpilda vadinama *aktyviaja*. Aktyvioji terpė sukuria suteikus išorinės papildomos energijos, kuri po to per priverstinį spinduliavimą iš dalies virsta stiprinamos elektromagnetinės spinduliuotės energija. Dviejų lygmenų optinio sužadavimo ypatumas tas, kad negalima sužadinti daugiau negu pusę dalelių ir todėl negalima sukurti apgražinės lygmenų užpildos. Tokia padėtis susidaro todėl, kad yra priverstinis spinduliavimas.

Kai kurių spinduliuotės ir medžiagos sąveikos savybių negalima nusakyti dviejų lygmenų modeliu. Labai dažnai po sužadavimo sistema nespinduliuodama pereina į kurią nors trečiąją būseną (8.3 pav.). Tokia situacija susidaro, pvz., rubine. Trečioji būseną 2 yra *metastabilioji* (santykinai ilgai gyvuojanti).



8.3 pav. Dalelių šuoliai trijų lygmenų kaupinimo sistemoje

Dalelių skaičius N_1 ir N_2 priklausomybės nuo išorinės žadinančiosios spinduliuotės intensyvumo pavaizduotos 8.4 pav. Dalelių skaičius lygmenyje 3 mažas, lygmuo 3 yra savotiškas „virsmo“ punktas, kuriame dalelės ilgai neužsibūva. Didėjant kaupinimo energijos tankiui u_{kaup} , N_2 vertė staigiai auga, o N_1 mažėja. Skirtingai nuo dviejų lygmenų sistemos, šiuo atveju dalelių skaičius pradiniam lygmenyje 1 gali sumažėti iki nulio ir visos dalelės gali susikaupti metastabiliajame lygmenyje 2. Už kreivių $N_2(u_{kaup})$ ir $N_1(u_{kaup})$ sankirtos taško susidaro inversinė lygmenų užpilda ($N_2 > N_1$). Kai $u_{kaup} < u_{kaup}^{inv}$, sugerties koeficientas vykstant šuoliui tarp lygmenų $1 \rightarrow 2$ teigiamas. Inversijos taške jis lygus nuliui, o kai $u_{kaup} > u_{kaup}^{inv}$, jis tampa neigiamas – tenkinama pagrindinė spinduliuotės stiprinimo sąlyga.



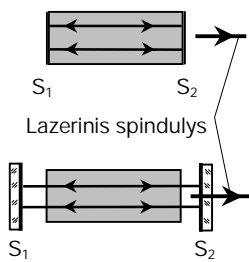
8.4 pav. Lygmenų užpildos priklausomybė nuo kaupinimo intensyvumo

Inversinės užpildos sudarymas dar negarantuoja didelio iš aktyviosios medžiagos išeinančio šviesos srauto intensyvumo. Stiprinimo laipsnį lemia stiprinimo koeficientas k_{st} ir aktyvaus sluoksnio ilgis l . Ši priklausomybė paprasčiausiu atveju yra tokia:

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

čia I_0 – į sugeriantį medžiagos sluoksnį krintančios šviesos intensyvumas, I_i – iš jo išeinančios šviesos intensyvumas, $k_{st} = -k_{sug}$.

Aktyvioji medžiaga gali tapti šviesos virpesių generatoriumi, jei skleidžiamos šviesos dalis visą laiką yra aktyviojoje medžiagoje ir sukelia vis naujų ir naujų jos dalelių priverstinę spinduliuotę, t. y. kai sudaromas grįžtamasis ryšys. Tam aktyvioji medžiaga dedama tarp



8.5 pav. Optiniai rezonatoriai

dviejų lygiagrečių veidrodžių. Pavyzdžiui, aktyviosios medžiagos cilindrinis strypas yra tarp veidrodžių S_1 ir S_2 , kurių plokštumos statmenos strypo ašiai (8.5 pav.). Daug kartų nuo veidrodžių atsispindėjęs šviesos spindulys daug kartų pereina aktyvųjų strypą kiekvieną kartą stiprėdamas dėl dalelių priverstinių šuolių. Šis įtaisas yra atvirasis *optinis rezonatorius*. Dėl daugkartinio šviesos spindulio atspindžio rezonatoriaus viduje susikaupia didelio energijos tankio šviesos srautas. Jo dalis, lygi $1 - R$ (R – iš dalies skaidraus veidrodžio atspindžio faktorius), išeina į išorę ir sudaro lazerio spinduliuotę. Sistema tampa generatoriumi – elektromagnetinės spinduliuotės šaltiniu. Generatoriaus spinduliuotės parametrus lemia kaupinimo galia ir metodas, veidrodžių atspindžio ir praleidimo ypatumai, rezonatoriuje susidarantys energijos nuostoliai.

Bangos srauto dalis iš rezonatoriaus išeina. Be to, yra ir kitokių nuostolių, kuriuos lemia šviesos sklaida nuo terpės nevienalytiškumų ir veidrodžių, sugertis, difrakcija ir kt. Generavimas galimas tik tada, kai į pusiau skaidrų veidrodį krintančios bangos energija yra ne mažesnė už prieš tai kritusios spinduliuotės energiją. Tai reiškia, kad šviesos stiprinimas turi būti gana didelis, t. y. viršyti tam tikrą slenkstinę vertę. Jei šviesa, du kartus perėjusi rezonatorių, sustiprinama tiek, kad suminiai nuostoliai yra mažesni, tai po kiekvieno perėjimo bangos intensyvumas padidėja. Tačiau šis didėjimas nėra begalinis. Esant konkrečiai kaupinimo šaltinio galiai, darbinį lygmenų apgražinę užpilda mažėja didėjant spinduliuotės energijos tankiui rezonatoriuje ir sumažėja stiprinimo koeficientas. Dėl šio *netiesinės soties* reiškinio lazeryje nusistovi stacionarus generavimo režimas, kai suminius energijos nuostolius tiksliai kompensuoja stiprinimas aktyviojoje terpėje.

Lazerio veikimas grindžiamas šiais pagrindiniais principais:

1. Atominių sistemų priverstiniu spinduliavimu;
2. Termodinamiškai nepusiausvirų sistemų naudojimu, kuriose galima stiprinti šviesą, t. y. apgražinės užpildos sudarymu;
3. Teigiamas grįžtamasis ryšys, kuris stiprinimo sistemą paverčia koherentinės spinduliuotės generatoriumi.