

1. BANGINĖS ŠVIESOS TEORIJS ĮVADAS

1.1. HARMONINIAI VIRPESIAI. MONOCHROMATINĖS BANGOS

Harmoniniai virpesiai yra periodiniai fizikinio dydžio kitimai per laiką, nusakomi sinuso (arba kosinuso) dėsniais. Juos nusako diferencialinė lygtis:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -f x + P;$$

čia P – sunkis, fx – tamprumo jėga, x – nuokrypis nuo pusiausvyros padėties, f – tampraus ryšio koeficientas. Šios lygties sprendinys:

$$x' = a \sin(\omega t + \delta) \text{ arba } x' = a \cos(\omega t + \delta);$$

čia $x' = x - P/f$, a – virpesių amplitudė, ω – kampinis dažnis, δ – pradinė virpesių fazė.

Šie sprendiniai išreiškia sistemos, vadinamos *harmoniniu osciliatoriumi*, virpesius.

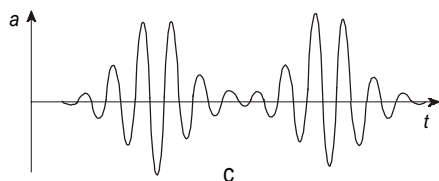
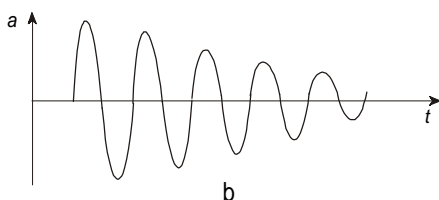
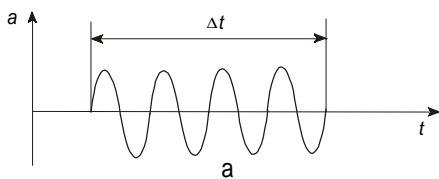
Harmoninio osciliatoriaus modelis plačiai naudojamas atomų ir molekulių spektroskopijoje. Osciliatoriaus virpesių periodas

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{f}},$$

pilnutinė energija

$$E = \frac{f a^2}{2}.$$

Monochromatinė banga išreiškiama tokia periodine funkcija, kurios periodas, amplitudė ir pradinė fazė nekinta laiko atžvilgiu. 1.1.1 pav. pavaizduotos bangos nėra monochromatinės. Jei banga vaizduojama sinusoidės dalimi (1.1.1 a pav.), tariama, kad amplitudė pradžioje lygi nuliui, o laiko momentu t_1 tampa a ir išlieka pastovi iki t_2 , po to vėl lygi nuliui. Tokia banga nemonochromatinė. Jokioje realioje bangoje virpesiai nevyksta be galo ilgai, jie prasideda ir baigiasi tam tikru momentu. Kuo didesnė trukmė $\Delta t = t_2 - t_1$ periodo atžvilgiu, tuo banga monochromatiškesnė.



1.1.1 pav. Nemonochromatinės bangos (a – dalis sinusinės bangos, b – slopstančioji banga, c – mūša)

1.2. SUPERPOZICIJOS PRINCIPAS

Tarkime, kad kuriame nors erdvės taške vienu metu fiksuojamas begalinio bangų skaičiaus poveikis. Paprasčiausia hipotezė, kurią galima taikyti bendram jų poveikiui, yra tokia: jei $s_1, s_2, s_3, \dots, s_n$ – atskirų bangų sukelti trikdžiai kuriame nors erdvės taške tam tikru laiko momentu, tai atstojamasis trikdys yra jų algebrinė suma:

$$s = s_1 + s_2 + s_3 + \dots + s_n. \quad (1.2.1)$$

Superpozicijos principas yra fizikinė hipotezė, pagal kurią, *šviesos bangos trikdys, susidarantis kuriame nors taške tam tikru laiko momentu pereinant kelioms bangoms, lygus atskirų bangų trikdžių algebrinei sumai*. Tai išreiškia (1.2.1) lygtis. Superpozicijos principas naudojamas tada, kai sistemos savybės nepriklauso nuo to, ar ji veikiama trikdžio, ar ne (kai poveikis nelabai stiprus).

Jei galioja superpozicijos principas, tai bangų grupę galima pakeisti (išskaidyti) jos dedamosiomis ir kiekvienos dedamosios poveikį nagrinėti atskirai. Racionalus šių dedamųjų parinkimas, t. y. skleidimo metodo parinkimas, gali gerokai supaprastinti užduotį. Toks racionalus skleidimas yra skleidimas monochromatinėmis bangomis, t. y. laisvoji funkcija pateikiama harmoninių funkcijų visuma. Tam gerai tinka Furjė (*Fourier*) teorema – *nesinusinės formos bangą visuomet galima išreikšti harmoninių bangų suma*.

1.3. ELEKTRINIO DIPOLIO SPINDULIAVIMAS

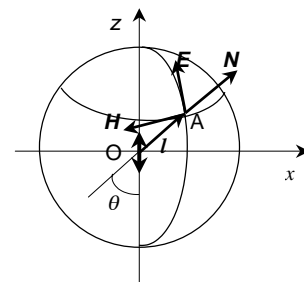
Elektrinio dipolio modelis plačiai naudojamas optikoje. Šiuo modeliu galima patenkinti nusakyti šviesos spinduliavimą, sklidimą, sugertį ir kitus reiškinius.

Elektrinis dipolis yra sistema, sudaryta iš dviejų vienodo didumo ir priešingo ženklo krūvininkų q , tarp kurių atstumas r . Pagrindinė dipolio charakteristika yra elektrinis dipolinis momentas $\mathbf{p} = q \mathbf{r}$.

Jei dipolio krūvininkai (arba vienas krūvininkas) harmoningai virpa išilgai ašies, tokia sistema vadinama *tiesiniu harmoniniu osciliatoriumi*. Osciliatoriaus kintantysis dipolinis momentas lygus $\mathbf{p} = \mathbf{p}_0 \cos \omega t$ (čia ω – krūvininko virpesių dažnis). Reikia pabrėžti, kad $\mathbf{p} = q \mathbf{r}$ kitimas gali vykti ir dėl $q = q_0 \cos \omega t$, ir dėl $r = r_0 \cos \omega t$ kitimo. Krūvio kitimas realizuojamas radiotechnikoje, o atstumo kitimas yra daugelio fizikinių reiškinių pagrindas.

Optikoje dažniausiai nagrinėjami atvejai, kai $r = r \cos \omega t$, $r \ll \lambda$ ir nuotolis l didelis ($l \gg r$). Vektorius \mathbf{l} brėžiamas iš osciliatoriaus centro O į nagrinėjamąjį tašką A (1.3.1 pav.). Sritis, kurioje kinta l , vadinama *bangos zona*. Visuose sferos, kurios centre yra dipolis, taškuose virpesių fazės yra vienodos, t. y. dipolio skleidžiama banga yra sferinė.

Į sparčiai kintantį šviesos lauką reaguoja tik atomų ir molekulių elektronai, kurių virpesius, atsirandančius dėl



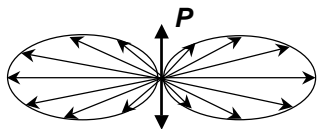
1.3.1. pav. Dipolio spinduliuojamos sferinės bangos elektromagnetinis laukas

elektrinio lauko poveikio, galima modeliuoti harmoniniais osciliatoriais. Izotropinės molekulės elektronai nuo elektrinio lauko poveikio paslenka visomis galimomis kryptimis vienodai, t. y. elektronų virpesių kryptis sutampa su krintančios šviesos bangos elektrinio vektoriaus virpesių kryptimi. Antrinės bangos elektrinio vektoriaus E kryptį lemia elektrono, kuris sukelia šią bangą, virpesių kryptis, t. y. E yra toje pačioje plokštumoje kaip ir p . Kadangi elektromagnetinės bangos yra skersinės, vektorius E turi būti statmenas bangos sklidimo kryptčiai. Šios dvi sąlygos, lemiančios vektoriaus E padėtį, leidžia suprasti virpančio elektrono spinduliavimą (1.3.1 pav.).

Harmoninio osciliatoriaus vidutinė energija proporcinga jo virpesių dažniui ketvirtuoju laipsniu (ω^4) ir priklauso nuo spinduliuotės linkmės ($\sin^2\theta$):

$$\langle S \rangle = \frac{\omega^4 p_0^2}{8\pi c^3 l^2} \sin^2\theta ;$$

čia p_0 – amplitudinė elektrinio dipolinio momento vertė.



1.3.2. pav. Elementaraus osciliatoriaus spinduliuotės diagrama

Dipolio spinduliuotės energijos skirstinys (spinduliuotės diagrama) pavaizduota 1.3.2 pav. Energija didžiausia kryptimis, statmenomis elektrono virpesių linijai (elementariojo spinduolio ašiai), ir lygi nuliui išilgai ašies (išilginė elektromagnetinė banga negalima!).

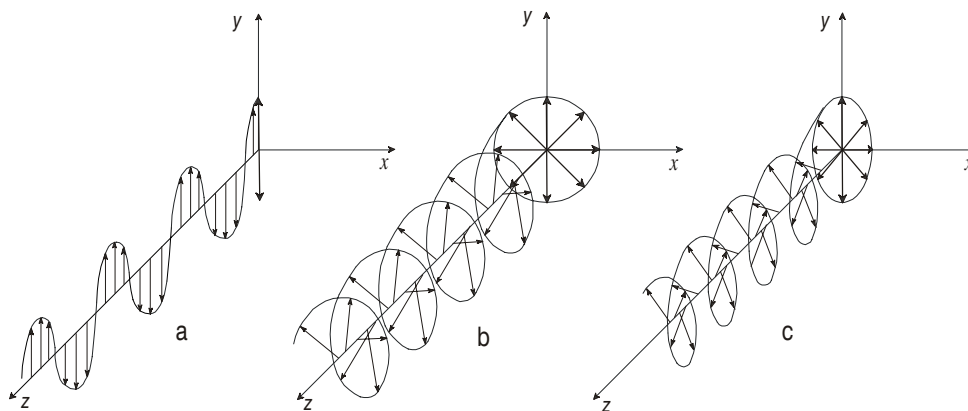
Osciliatoriaus spinduliuojamos galios ryškia priklausomybe nuo bangos ilgio aiškinama, pavyzdžiui, žydra dangaus spalva (trumposios bangos sklaidomos stipriau negu ilgosios) ir raudona Saulės spalva saulėlydžio metu, kai spinduliams pereinant storus atmosferos sluoksnius tiesioginio srauto melsvi spinduliai išsklaidomi smarkiau negu raudoni.

1.4. ELEKTROMAGNETINIŲ BANGŲ POLIARIZACIJA

Poliarizuotoji elektromagnetinė banga yra tokia banga, kurioje elektrinio (arba magnetinio) lauko stiprio konkretaus didumo vektoriaus E galas juda tam tikru dėsningumu. Jei vektoriaus projekcijos į plokštumą, statmeną sklidimo kryptčiai, galas juda tiese, tai banga *tiesiai poliarizuota* (1.4.1 a pav.). *Apskritai poliarizuotos* bėgančiosios bangos tam tikros fazės vektorius E (kartu ir H) erdvėje brėžia apskritas spirales, o statmenoje plokštumoje – apskritimą (1.4.1 b pav.). Kai erdvėje brėžiamos elipsinės spirales, o sklidimo kryptčiai statmenoje plokštumoje brėžiama elipsė – banga yra *elipsiškai poliarizuota* (1.4.1 c pav.).

Kai nagrinėjamojo srauto visos bangos, sklindančios iš skirtingų elementariųjų mikroskopinių spinduolių, poliarizuotos vienodai, tai tokia poliarizacija vadinama *visiškoji*.

Jei vektoriaus E dedamųjų fazių skirtumas nepastovus (bangos nekoherentinės) ir skirtingų elementariųjų spinduolių skleidžiamose bangose virpesiai yra skirtingos vienodai tikimos orientacijos, šviesa yra *natūrali* (arba *nepoliarizuota*). Ji gali susidėti iš elipsiškai, tiesiai ir apskritai poliarizuotų bangų.



1.4.1 pav. Tiesiai (a), apskritai (b) ir elipsiškai (c) poliarizuotoji banga

Šviesa, kurioje vyrauja tikimiausių kryptių virpesiai, vadinama *iš dalies* poliarizuota. Kiekybiškai ji apibūdinama poliarizacijos laipsniu.

Kiekvienas atskiras spinduliavimo modelis apibūdina tam tikrą poliarizaciją. Pavyzdžiui, harmoninis dipolinis osciliatorius spinduliuoja tiesiai poliarizuotas bangas, elektrinis arba magnetinis rotatorius – elipsiškai poliarizuotas. Jei spindulis yra išoriniame elektriniame arba magnetiniame lauke, šviesos poliarizacija sudėtingesnė – kiekviena spinduliuotės spektro linija skyla į kelias skirtingos poliarizacijos linijas.

Makroskopiniuose kūnuose šviesą spinduliuoja jų elementarieji spinduliai, kurių yra labai daug. Jos poliarizaciją lemia spindulių prigimtis ir jų orientacija. Kai spinduliai išsidėstę visiškai netvarkingai, jų spinduliuojama šviesa natūralioji, o, pvz., perėjusi kai kuriuos kristalus šviesa poliarizuojasi.

Šviesos poliarizacijos pobūdis turi esminio poveikio šviesos ir medžiagos sąveikai. Optiškai izotropinėse medžiagose, kartais ir metaluose, nuo šviesos poliarizacijos priklauso šviesos sklaidimo greitis ir kryptis (dvejopas spindulių lūžis), taip pat sugertis (dichrozmas). Sklindant šviesai medžiagoje jos poliarizacijos pobūdis gali keistis: pakinta virpesių plokštuma (atspindint, lūžtant, optiškai aktyviose terpėse); tiesiai poliarizuota šviesa gali tapti elipsiškai poliarizuota (kai vyksta visiškasis vidaus atspindys nuo sugeriančių paviršių, pvz., metalų). Terpės sklaidomos šviesos poliarizacija taip pat kinta. Sklindant terpėse poliarizuotai šviesai išsklaidytoji visuomet tam tikru laipsniu depoliarizuojasi. Indukuotos spinduliuotės poliarizacijos pobūdis visuomet toks pat kaip ir žadinančios.

1.5. VIRPESIŲ IR BANGŲ SUDĖTIS

Tarkime, kad viena kryptimi z sklinda dvi tarpusavyje statmenose plokštumose tiesiai poliarizuotos monochromatinės bangos

$$E_x = E_{10} \sin(\omega t - k z), \quad (1.5.1)$$

$$E_y = E_{20} \sin(\omega t - k z + \delta); \quad (1.5.2)$$

čia δ – pradinis virpesių fazių skirtumas, k – bangos skaičius.

Dėl superpozicijos $\mathbf{E} = \mathbf{E}_x + \mathbf{E}_y$. Sudarykime atstojamąjį virpesį nusakančios kreivės lygtį. (1.5.2) išraišką galima užrašyti taip:

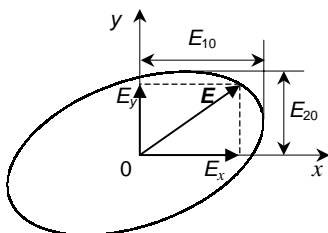
$$E_y = E_{20} \sin(\omega t - k z) \cos \delta + E_{20} \cos(\omega t - k z) \sin \delta.$$

Panaudojus (1.5.1) išraišką gaunama tokia lygtis:

$$E_y = E_{20} \frac{E_x}{E_{10}} \cos \delta + E_{20} \sqrt{1 - \frac{E_x^2}{E_{10}^2}} \sin \delta.$$

Iš čia gaunama, kad

$$\frac{E_x^2}{E_{10}^2} + \frac{E_y^2}{E_{20}^2} - 2 \frac{E_x}{E_{10}} \frac{E_y}{E_{20}} \cos \delta = \sin^2 \delta. \quad (1.5.3)$$



1.5.2 pav. Dviejų tarpusavyje statmenų virpesių sudėtis (bendrasis atvejis)

Tai elipsės lygtis, kurios grafikas pavaizduotas 1.5.2 pav. Jei $\cos \delta = 0$ ir $\sin \delta = \pm 1$, tai

$$\frac{E_x^2}{E_{10}^2} + \frac{E_y^2}{E_{20}^2} = 1$$

ir elipsės ašys sutampa su koordinatinių x ir y ašimis.

Sumuojant dvi tarpusavyje statmenas tiesiai poliarizuotas bangas, kai fazių skirtumas tarp jų $\delta = \pi/2 + m\pi$ (čia $m = 0, 1, 2, \dots$), sukuriama atstojamoji *elipsiškai poliarizuota* banga.

Kai $E_{10} = E_{20}$, elipsė tampa apskritimu, kurio lygtis nusako *apskritai poliarizuotą* šviesą.

Kai $\cos \delta \neq 0$, tai (1.5.3) lygtis taip pat nusako elipsę, bet jos ašys nesutampa su koordinatinių ašimis. Elipsė yra ir tuo atveju, kai $E_{10} = E_{20}$.

Kai $\cos \delta = \pm 1$ ir $\sin \delta = 0$, tai (1.5.3) lygtis yra tokio pavidalo:

$$\left(\frac{E_x}{E_{10}} \mp \frac{E_y}{E_{20}} \right)^2 = 0,$$

t. y. gaunamos tiesių lygtys:

$$\frac{E_x}{E_{10}} - \frac{E_y}{E_{20}} = 0 \quad \text{ir} \quad \frac{E_x}{E_{10}} + \frac{E_y}{E_{20}} = 0.$$

Atstojamojo vektoriaus E galas juda tiese (1.5.3 pav.). Taigi *tiesinės poliarizacijos* banga yra ribinis šviesos elipsinės poliarizacijos atvejis.

Iš to išplaukia, kad bet kokios poliarizacijos elektromagnetinė banga yra dviejų tiesinės poliarizacijos bangų, kurių vektorius E virpa tarpusavyje statmenoje plokštumoje, superpozicijos padarinys.

Galima įrodyti, kad *tiesiai poliarizuota banga atsiranda dėl apskritai poliarizuotų bangų superpozicijos*.

Tarkime, kad yra kairinės ir dešinės apskritinės poliarizacijos bangos, kurių elektrinio vektoriaus projekcijos į koordinačių ašis x ir y (1.5.4 pav.) reiškiamos taip:

$$E_{1x} = E_0 \cos \omega t; \quad E_{1y} = E_0 \sin \omega t;$$

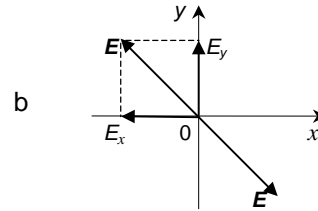
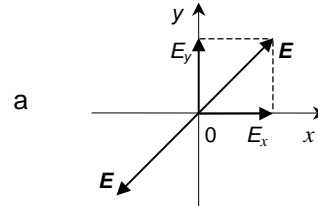
$$E_{2x} = E_0 \cos \omega t; \quad E_{2y} = -E_0 \sin \omega t.$$

Dėl superpozicijos gaunama:

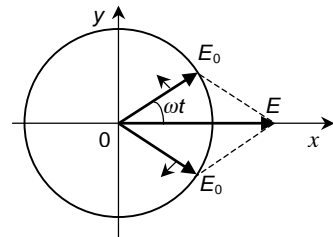
$$E_x = E_{1x} + E_{2x} = 2 E_0 \cos \omega t;$$

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} = 0,$$

t. y. susidaro tiesiai poliarizuota banga. Atstojamasis vektorius E nukreiptas x ašies kryptimi. Jei tarp atskirų virpesių būtų fazių skirtumas, tai atstojamųjų virpesių linija su x ašimi sudarytų tam tikrą kampą.



1.5.3 pav. Dviejų tarpusavyje statmenųjų virpesių sudėtis (a – vienodos fazės, b – priešingos fazės)



1.5.4 pav. Dviejų apskritai poliarizuotų bangų sudėtis