

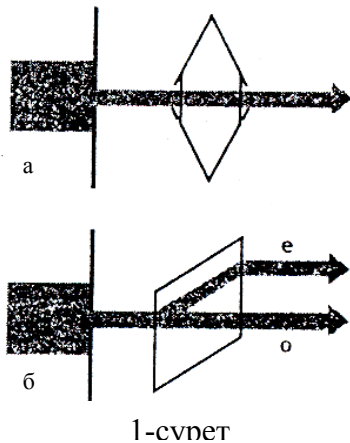
Лекция - 11. Жарықтың анизотропты орталарда таралуы. 11 апта.

2.5.1. Анизотроп орта. Диэлектрик өтімділіктің тензоры. Қосарланып сыну. Кәдімгі және ерекше сәулелер. Қосарланып сынған сәулелердің поляризациялануы. Поляроидтар. 1 сағат.

Анизотропты орталар

Ортаның физикалық қасиеттері ортадағы бағытқа байланысты әртүрлі болатын орта **анизотропты** деп аталады.

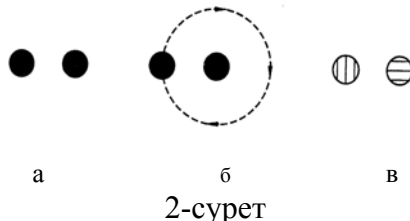
Қалыпты жағдайларда газ түріндегі, сұйық және аморфты қатты диэлектриктер оптикалық изотропты болатындығы, ал кристалдық диэлектриктердің көпшілігі оптикалық анизотропты болатындығы зерттеулерден анықталған. Мәселен, исландия шпатының кристалы (кальцит) жарықты оған жарық қай жағынан түсірілуіне байланысты әртүрлі сындырады. Осы кристалда бір бағыттың болатындығы анықталған, осы бағыт бойымен түсірілген жарық сәулелері сынбай түзу сызықты өтеді (1а-сурет). Басқа бағыттарда сәуле кристалл арқылы өткенде екіге жіктеледі; **жарықтың қосарлана сынуы** (қосарлана сәулесынушылық - двойное лучепреломление) деп аталатын көбылыс байқалады (1б-сурет). Оптикалық қасиеттердің кристалдағы бағытқа осындай тәуелділігі **оптикалық анизотропия** деп аталады. Кристалдардың анизотропты қасиеттерін көрсететін бірнеше мысал қарастырайық.



1-сурет

Жарық сәулесінің қосарлана сынуы бойынша жүргізілген алғашқы тәжірибелердің біреуі сөлбалық (схемалық) түрде 1б-суретте келтірілген. Ақ жарық шоғы исландия шпатының кристалы арқылы өтеді де қалқада (экранда) интенсивтіктері бірдей екі ақ дақ алынады (2-сурет). Кристалды түсетін жарық шоғының осіне қатысты бөріанда қалқадағы бір дақ қозғалмайды, ал екінші дақ біріншіні айнала бөрылады. Поляроид көмегімен сәулелердің поляризациясын зерттегенде кристалдан шыққан сәуленің екеуі де сызықты поляризацияланған және бұлардың поляризация бағыттары өзара перпендикуляр болатындығы анықталған. Бұл әсіресе түсетін шоқ осіне қатысты кристалды айналдырғанда жақсы көрінеді. Осы

жағдайда кристалдан шығып және поляроид арқылы өткен жарық сәулелері өзінің интенсивтігін периодты түрде өзгертеді және шоқтардың біреуі толық «сөнгенн мезетте, екіншісінің интенсивтігі максимум болады. Дәл осындай сурет кристалды қозғалтпай, поляроидты айналдырғанда да байқалады.



2-сурет

Диэлектрлік өтімділік тензоры

Изотропты диэлектрик орта үшін \vec{D} электрлік индукция векторы мен \vec{E} электр өрісінің кернеулік векторының бағыттары бірдей және мына қатынаспен байланысқан

$$\vec{D} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{E}, \quad (1)$$

мұндағы ε_0 - электрлік тұрақты, ε - скаляр шама, ортаның диэлектрлік өтімділігі. (1) өрнегі анизотропты орта үшін де орындалады, бірақ изотропты ортадағыдан айырмашылығы анизотропты орталар үшін диэлектрлік өтімділік енді скалярлық шама

болудан қалады. Басқаша айтқанда, анизотропты орталарда диэлектрлік өтімділік \vec{E} электр өрісі қандай бағытта әсер етіп тұрғандығымен және \vec{D} электрлік индукция векторының құраушылары қандай бағытта бақыланатындығымен анықталады.

Анизотропты орта екінші рангі диэлектрлік өтімділік тензорымен сипатталады:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{yx} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{zx} & \varepsilon_{zy} & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Бұл \vec{D} электрлік индукция векторының әрбір құраушысы электр өрісі \vec{E} кернеулік векторының барлық үш құраушылары арқылы өрнектелетіндігін білдіреді:

$$\left. \begin{aligned} D_x &= \varepsilon_{xx}E_x + \varepsilon_{xy}E_y + \varepsilon_{xz}E_z \\ D_y &= \varepsilon_{yx}E_x + \varepsilon_{yy}E_y + \varepsilon_{yz}E_z \\ D_z &= \varepsilon_{zx}E_x + \varepsilon_{zy}E_y + \varepsilon_{zz}E_z \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Ескерту: Формулалардың ықшамдылығы үшін ε_0 өлшемділікті скалярлық коэффициент ε_{ij} тензорының әрбір құраушысында ескерілген деп есептейміз.

$$(3) \text{ өрнегін } D_i = \sum_j \varepsilon_{ij}E_j \text{ немесе } D_i = \varepsilon_{ij}E_j \quad (4)$$

түрінде жазуға болады, мұндағы j индексі бойынша қосындылау жүргізіледі және i индексі x, y, z мәндерін қабылдайды.

(4) өрнегінен электрлік индукция векторы мен өріс кернеулігі арасындағы қатынас анизотропты орталарда да сызықты болып қалатындығы, осының нәтижесінде осындай орталарда суперпозиция принципі дөрыс болып қалуы тиіс екендігі келіп шығады.

Магниттік индукция және магнит өрісі кернеулігі векторлары \vec{B} және \vec{H} екі жағдайда, изотропты да, анизотропты да орталарда, μ магниттік өтімділіктің бірге тең болуы себепті, оптикада (мөлдір диэлектриктерде) бағыттары бірдей болады.

Диэлектрлік өтімділіктің бас мәндері. Диэлектрлік өтімділік тензоры симметриялы, яғни $\varepsilon_{xy} = \varepsilon_{yx}$, $\varepsilon_{xz} = \varepsilon_{zx}$, $\varepsilon_{yz} = \varepsilon_{zy}$. Сондықтан оның тоғыз құраушысының тек алтауы тәуелсіз болып табылады. Кезкелген анизотропты денеде \vec{D} электрлік индукция векторы электр өрісінің \vec{E} векторына параллель болатын үш бағыт болады. Осы бағыттар диэлектрлік өтімділік тензорының **бас өстері** деп аталады.

ε_{ij} симметриялы тензорды кристалға қатысты бекітілген x, y, z бас өстеріне келтіргенде (4) өрнегі мына түрге келеді:

$$D_x = \varepsilon_{xx}E_x, \quad D_y = \varepsilon_{yy}E_y, \quad D_z = \varepsilon_{zz}E_z. \quad (5)$$

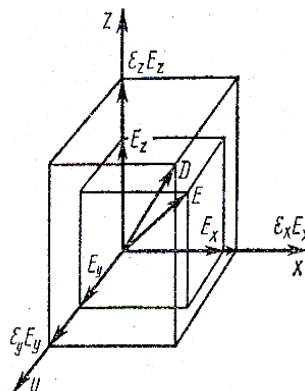
Осылайша алынған координаттар жүйесі **бас диэлектрлік өстер жүйесі**, ал $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_x$, $\varepsilon_{yy} = \varepsilon_y$, $\varepsilon_{zz} = \varepsilon_z$ шамалары-кристалдың диэлектрлік өтімділігінің бас мәндері (главные значения диэлектрической проницаемости) деп аталады.

(5) жүйесі диэлектрлік өтімділік мына түрге келтірілген дегенді білдіреді:

$$\varepsilon_{ij} = \begin{vmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{vmatrix}. \quad (6)$$

Бұл математикалық тәрғыдан (3) матрицаны диагоналдауға пара-пар. (5)-ды пайдаланып, жалпы жағдайда, $\varepsilon_x \neq \varepsilon_y \neq \varepsilon_z$ болатын анизотропты орталарда \vec{E} және \vec{D} векторларының коллинеарлық еместігіне оңай көз жеткізуге болады (3-сурет).

Шынында да, егер \vec{E} векторының бас өстер бойындағы құраушыларын, бұларға сәйкес өзара тең емес $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ -ке көбейтсе, онда \vec{E} векторымен бағыты бойынша дәл келмейтін \vec{D} векторының $D_x = \varepsilon_x E_x, D_y = \varepsilon_y E_y, D_z = \varepsilon_z E_z$ құраушылары шығады.



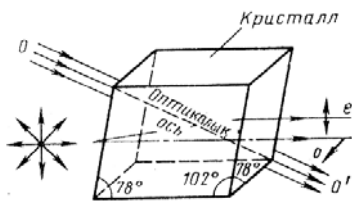
3-сурет

Жарық сәулелерінің қосарланып сынғанда поляризациялануы

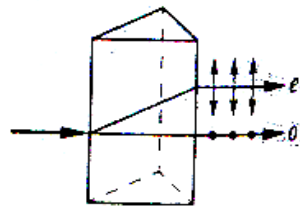
Табиғи жарық сәулесі исландия шпатының кристалы арқылы өткенде екі сәулеге бұлінетіндігі байқалды. Осы құбылыс **сәуленің қосарланып сынуы** деп аталды. Сәуленің қосарланып сынуы (двойное лучепреломление) – анизотропты заттардың түскен жарық сәулесін әртүрлі фазалық жылдамдықпен, әртүрлі бағытта таралатын өзара перпендикуляр бағыттарда поляризацияланған екі сәулеге бұлшектеу қабілеті туғызатын құбылыс. Заттардың анизотроптығы осы заттардың физикалық қасиеттерінің бағытқа тәуелдігі. Кристалдардың көпшілігі (кубтық жүйедегі кристалдардан басқалары) анизотропты: бұлардың салыстырмалы диэлектрлік өтімділігі мен сыну көрсеткіші жарық толқынындағы \vec{E} электрлік вектордың бағытына тәуелді болады. Жіңішке жарық шоғы жеткілікті қалың анизотропты кристалға, мысалы исландия шпатына, түскенде одан сәуленің қосарланып сынуы нәтижесінде кеңістікте ажыратылған бір-біріне және түскен сәулеге параллель екі сәуле шығады (4-сурет). Тіпті бастапқы сәуле кристалға нормаль түскенде сынған шоқ екіге жіктеледі: бұлардың біреуі бастапқы шоқтың жалғасы болады, ал екіншісі-ауытқиды (5-сурет). Осы сәулелердің біреуі Гюйгенс заманынан бері **кәдімгі «оң»**, екіншісі - **өзгеше «оң»** сәуле деп аталады.

Кез-келген анизотропты кристалда сәуленің қосарланып сынуы болмайтын кем дегенде бір бағыт болады, осы бағытта түскен сәуле екіге жіктелмейді және оның поляризация күйі де өзгермейді. Осы бағыт кристалдың оптикалық өсі деп аталады. Берілген жағдайда оптикалық ось деп кристалдың қандайда бір нүктесі арқылы өтетін түзу сызық жайында емес, бағыт жайында ғана айтуға болады.

Берілген бағытқа параллель өтетін кез-келген түзу кристалдың оптикалық өсі болып табылады, ал жарық шоғы оның бойымен таралғанда сәуленің қосарланып сынуына өшырамайды. Табиғатта бірөсті және екіөсті кристалдар болады. Біріншіге исландия шпаты [оның оптикалық өсі MN диагоналы бойымен бағытталған (4-сурет)], кварц, турмалин, ал екіншіге - слюда, гипс, топаз жатады.

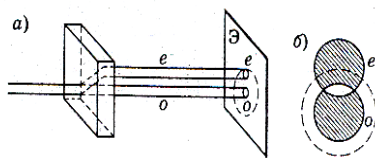


4-сурет



5-сурет

Жүргізілген зерттеулер бойынша кәдімгі және өзгеше сәулелердің өзара перпендикуляр жазықтықтарда поляризацияланған болатындықтары анықталған. Жарық сәулесінің бағыты және кристалдың оптикалық өсі арқылы өтетін жазықтық біресті кристалдың **бас жазықтығы** (главная плоскость одноосного кристалла) деп аталады.



5-сурет

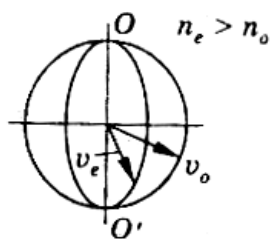
Тәжірибе жүзінде сәуленің екеуі де (кәдімгі және өзгеше) әрқашан кристалдың бас жазықтығында жататындығы тағайындалған. Егер қосарлана сындырушы кристалды түсетін сәуле бағытымен дәл келетін остен айналдыра бастаса, онда сынған кәдімгі сәуле қалпын өзгертпейді (өйткені кристалды осылай айналдырғанда түсу бұрышы өзгермейді), ал сынған өзгеше сәуле кристалдың бас жазықтығының бөрылуына ілесіп, орын ауыстыра бастайды (5-сурет). Осы амал сынған сәулелерді кәдімгі және өзгеше сәулелерге ажырату үшін қолданылады. Электрлік вектордың (\vec{E} векторы) тербелістері кәдімгі сәуледе бас жазықтыққа перпендикуляр, ал өзгеше сәуледе-бас жазықтықта (оған параллель) болады (демек, өзгеше сәуленің электрлік векторы оптикалық өспен қайсыбір бұрыштар жасайды).

Сәуленің қосарланып сынуы – кристалдардағы ε диэлектрлік өтімділіктің анизотропты болуының салдары: оптикалық ось бағытында және оған перпендикуляр бағыттарда ε мәні ε_{\parallel} және ε_{\perp} әртүрлі болады, ал басқа бағыттарда ε мәндері ε_{\parallel} және ε_{\perp} мәндерінің аралығында өзгереді. Сыну көрсеткіші $n = \sqrt{\varepsilon}$ болатындықтан, \vec{E} векторының бағыты әртүрлі болатын электромагниттік толқындарға сыну көрсеткішінің әртүрлі мәндері сәйкес келеді. Демек, жарық толқындарының $v = c/n$ жылдамдығы \vec{E} электрлік вектордың тербеліс бағытына тәуелді болады.

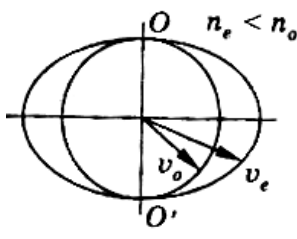
Электрлік вектордың тербелісі кәдімгі сәуленің таралу бағытына тәуелсіз кристалдың оптикалық осіне перпендикуляр болады, сондықтан кәдімгі сәуле кристалдағы барлық бағыттар бойынша $v_0 = c/n_0$ бірдей жылдамдықпен таралады, мұндағы $n_0 = const$ - кәдімгі сәуле үшін кристалдың сыну көрсеткіші. өзгеше сәуле үшін \vec{E} векторының тербеліс бағыты мен оптикалық ось арасындағы бұрыш тік бұрыштан өзгеше болады және ол сәуле бағытына тәуелді. Сондықтан өзгеше сәуле кристалдағы әртүрлі бағыттар бойынша \vec{E} векторы мен оптикалық ось арасындағы бұрышқа тәуелді $v_e = c/n_e$ жылдамдықпен таралады, мұндағы $n_e \neq const$ - өзгеше сәуле үшін кристалдың сыну көрсеткіші. Сірә, оптикалық ось бойымен сәуленің екеуі де бірдей жылдамдықпен ($v_e = v_0$; $n_e = n_0$) таралады.

Қайсыбір уақыт мезетінде кристалдың ішіндегі s нүктелік жарық көзі жарық толқынын шығара бастады деп ойғарайық. Осы жағдайда кәдімгі және өзгеше сәулелердің кристалда таралуы 6 және 7 суреттерде көрсетілген (бас жазықтық сурет жазықтығымен дәл келеді; OO' - оптикалық ось бағыты). Кәдімгі сәуленің (ол $v_0 = const$ жылдамдықпен

таралады) толқындық беті сфера, ал өзгеше сәуленің ($v_e \neq const$) толқындық беті айналыс



6-сурет



7-сурет

эллипсоиды (суреттерде осы беттердің сурет жазықтығымен қиылысуы келтірілген).

Кәдімгі және өзгеше сәулелердің толқындық беттеріндегі ең үлкен айырмашылық оптикалық оске перпендикуляр бағытта байқалады. Эллипсоид пен сфера біріне-бірі

OO' оптикалық осьпен қиылысу нүктелерінде жанасады. Егер v_e

мәндерінің бәрі v_0 -ден кіші ($n_e > n_0$) болса, яғни өзгеше сәуленің эллипсоиды кәдімгі сәуле сферасының ішіне сызылған болса (жылдамдықтар эллипсоиды оптикалық оске қатысты созылған болса), онда біресті кристалл **оң** деп аталады (6-сурет). Егер $v_e > v_0$ ($n_e < n_0$) болса, онда эллипсоид сфераның сыртына сызылған (жылдамдықтар эллипсоиды оптикалық оске перпендикуляр бағытта керілген) болады және біресті кристалл **теріс** деп аталады (7-сурет). Исландия шпаты - теріс кристалл.

Кәдімгі және өзгеше сәулелердің біресті кристалдағы таралу бағытын табу үшін Гюйгенс принципі пайдаланылатындығы бөрын айтылған болатын. Дегенмен оны еске сала кетейік. Жазық толқын біресті оң кристалдың сындырушы жағына нормаль түсетін болсын, ал OO' оптикалық ось онымен қайсыбір кез-келген бұрыш жасап төрсын. Центрлері A , C және D нүктелерінде болатын кәдімгі сәулеге сәйкес келетін сфералық толқындық беттерді және өзгеше сәулеге сәйкес келетін эллипсоидтық толқындық беттерді саламыз. OO' оптикалық ось бойында жататын нүктеде осы беттер жанасады. Гюйгенстің принципіне сәйкес, сфераларға жанама бет кәдімгі толқынның шебі ($a - a$), ал эллипсоидтарға жанама бет өзгеше толқынның шебі ($b - b$) болады. Жанасу нүктелері арқылы түзулер жүргізіп, кәдімгі «оң және өзгеше «ең сәулелердің таралу бағытын табамыз. Сонымен, берілген жағдайда кәдімгі сәуле бастапқы бағыт бойынша кетеді, ал өзгеше сәуле бастапқы бағыттан ауытқиды.

Жарық оң кристалдың бетіне нормаль түсетін болсын. Бір жағдайда оптикалық ось сындырушы бетке перпендикуляр, ал екінші жағдайда оған параллель. Бірінші жағдайда кәдімгі және өзгеше сәулелер оптикалық өстің бойымен таралады, сондықтан олар жіктелмейді, екінші жағдайда бір бағытта, бірақ әртүрлі жылдамдықпен ($v_0 > v_e$) таралады; кристалдан шығарда сәулелер фазалар айырымын қабылдайды.

Поляроидтар

Поляризаторлар ретінде поляроидтар да пайдаланылады. Поляроид - күшті іріктей жөту қабілеті бар герпатит кристаліктері жапсырылған пленка. Қалыңдығы шамамен 0,1мм болатын осындай пленка сәулелердің біреуін іріктеп жөтатындығы тағайындалған. Осының нәтижесінде бұл поляризатор бола алады. Поляроидтар арзанға түседі, апертуралық бұрышы 180^0 -қа жақын, оңай дайындалады және мөлшерін үлкен етіп жасауға болады. Исландия шпатынан жасалған призмалармен салыстырғанда поляроидтардың бір кемшілігі бұлардың мөлдірлігі жеткіліксіз және әртүрлі толқын өзіндіктерде іріктей жөтатындығы.