**ЛЕКЦИЯ 8. ОПТИКАЛЫҚ ТАЛШЫНЫҢ ГЕОМЕТРИЯЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІ.**

**8.1. Сыну көрсеткіштерінің салыстырмалы айырмашылығы**

Талшық өзек пен қабықшадан тұрады. Қаптау оптикалық ядроны қоршайды, ол талшықтың жарық өткізетін бөлігі болып табылады, 10.1-сурет. Біз өзекше пен қаптаманың сыну көрсеткіштерін сәйкес n1 және n2 арқылы белгілейміз. Талшықты сипаттайтын маңызды параметрлердің бірі Δ сыну көрсеткіштерінің салыстырмалы айырмашылығы:

 $∆=\frac{n\_{1}^{2}-n\_{2}^{2}}{2n\_{1}^{2}}$ (10.1)

Егер қаптаманың сыну көрсеткіші әрқашан тұрақты болса онда ядроның сыну көрсеткіші әдетте радиусқа байланысты болуы мүмкін. Бұл жағдайда талшықтардың әртүрлі параметрлерін бағалау үшін n1 орнына n1eff пайдаланылады.

Жарықтың талшық арқылы таралуын Снеллдің жарықтың сыну заңынан шығатын толық ішкі шағылу принципі негізінде түсіндіруге болады:

$n\_{1}sinθ\_{1}=n\_{2}sinθ\_{2}$(10.2)

мұндағы n1 – 1 ортаның сыну көрсеткіші, θ1 – түсу бұрышы, n2 – 2 ортаның сыну көрсеткіші, θ2 – сыну бұрышы.

Формальды есептеулер өзекшенің сыну көрсеткіші тұрақты шама (n1 = const) болатын сатылы талшық (сатылы сыну көрсеткіші профилі бар талшық) үшін жасауға ыңғайлырақ. 10.1Суретте. осындай талшықтағы сәулелердің жолын көрсетеді. Ядро қабықшаға қатысты оптикалық тығызырақ орта болғандықтан (n1 > n2), онда сынған сәуле ортаның шекарасы бойымен (θ2 = 90°) өтетін шекарадағы ішкі түсу бұрышы θС – критикалық түсу бұрышы болады. Снелл заңынан осы сыни түсу бұрышын табу оңай:

$θ\_{c}=arcsin⁡(\frac{n\_{1}}{n\_{2}})$ (10.3)

Интерфейстегі түсу бұрышы түсудің критикалық бұрышынан (сәуле 2) аз болса, онда әрбір ішкі шағылысу кезінде энергияның бір бөлігі сынған сәуле түрінде сыртқа шашырап, ақырында жарықтың әлсіреуіне әкеледі. Егер түсу бұрышы критикалық бұрыштан (1-сәуле) үлкен болса, онда шекарадан әрбір шағылу кезінде толық ішкі шағылысу есебінен барлық энергия өзекке қайта оралады.

*Траекториялары оптикалық тығызырақ ортада толығымен жататын сәулелерді бағыттаушы деп атайды.*Бағытталған сәулелердегі энергия сыртқа шашырамайтындықтан, мұндай сәулелер ұзақ қашықтыққа жүре алады.



10.1-сурет. Қадамдық профилі бар көпмодалы оптикалық талшықтағы сәулелердің жолы

**8.2. Сандық апертура.**

Талшықты сипаттайтын маңызды параметр – сандық апертура NA. Ол талшыққа енгізілген NА максималды бұрышымен байланысты бос кеңістіктің сәулеленуі, онда жарық толығымен ішке шағылысады, NА мынаформула бойынша таралады

$NA=sinθ\_{A}$(10.4)

Талшық өндірушілер эксперименттік түрде θA бұрышын өлшейді және берілген талшықтың әрбір түрі үшін сандық саңылаудың сәйкес мәнін көрсетеді. Қадамдық профилі бар талшық үшін сыну көрсеткіштерімен көрсетілген сандық саңылау мәнін алу оңай:

$NA=\sqrt{n\_{1}^{2}-n\_{2}^{2}}=n\_{1}\sqrt{2∆}$(10.5)

Градиент талшық үшін локальді сандық апертура түсінігі пайдаланылады.

$A(r)=\sqrt{n\_{1}^{2}(r)-n\_{2}^{2}}$оның мәні осьте максимум болады және өзек пен қаптама арасындағы интерфейсте 0-ге дейін азаяды. Градиент талшықтары үшін параболалық сыну көрсеткішінің профилі тиімділікті анықтайды сандық апертура, ол мынаған тең:

$NA\_{eff}=\frac{\sqrt{n\_{1}^{2}\left(0\right)-n\_{2}^{2}}}{2}$ (10.6)

Мұнда n1(0) – осьтегі сыну көрсеткішінің ең үлкен мәні.

**8.3. Нормаланған жиілік.**

Талшық арқылы таралатын жарықты сипаттайтын тағы бір маңызды параметр нормаланған жиілік V болып табылады, ол келесідей анықталады:

$V=π\*d\*\frac{NA}{λ}$(10.7)

мұндағы d – талшық өзегінің диаметрі.

# **8.4 Модa номенклатурасы.**

Жарықтың талшық бойымен таралу процесін мұқият қарастыра отырып, Максвелл толқындық теңдеулерін шешу керек. Дәл осы интерпретацияда сәулелер толқындармен байланысты, ал толқындардың әртүрлі типтері - теңдеулердің шешімдері - режимдер деп аталады. Режимдердің өзі n және m (Enm және Hnm) екі индексі бар E және/немесе H әріптерімен белгіленеді. n индексі толқынның азимутальдық қасиеттерін (өріс саны шеңбер бойымен өзгереді), m радиалды қасиеттерін (өріс саны диаметрі бойынша өзгереді) сипаттайды. Оптикалық талшық бойымен толқынның тек екі түрі таралады: бір ғана бойлық компоненті бар симметриялық (E0m және H0m) және екі бойлық құрамдас бөлігі бар асимметриялық (аралас) (Enm және Hnm). Бұл жағдайда электр өрісінің бойлық компоненті басым болса – Ez, онда толқынды EHnm деп белгілейді, ал магнит өрісінің бойлық құраушысы басым болса – Гц, онда толқын HEnm деп аталады. Толқындар теориясын геометриялық оптикамен салыстыра отырып, симметриялық режимдер Е0m және Н0m меридиандық сәулелерге, ассиметриялық режимдер Enm және Hnm қиғаш сәулелерге сәйкес келетінін атап өту керек.

Талшық тек бір режим ретінде тарай алады - бір режимді режим, сондай-ақ көптеген режимдер – көпмодалы режимі. Талшық арқылы өтетін жарықтың көпмодалы немесе бір режимдік сипаты дисперсия және, тиісінше, талшықтың өткізу қабілеті негізінен әсер етеді. Максвелл теңдеулеріне негізделген есептеудің бір режимінің таралуының қарапайым критерийін табуға мүмкіндік береді: V < 2,405 (теңсіздіктің оң жағындағы тұрақтының нақты мәні I0 Бессель функциясының бірінші нөлімен анықталады). Бұл HE11 гибридті мода. Нормаланған жиілік жарықтың толқын ұзындығына тікелей байланысты екенін ескеріңіз. 10.1 Кестеде (10.7) формула бойынша есептелген нормаланған жиіліктің мәндерін көрсетілген.

Кестеден көрініп тұрғандай. 10.1, 1550 нм жарық толқын ұзындығындағы бір режимді сатылы талшықта V < 2,405 критерийі орындалады, сондықтан тек бір режим таралады. 1310 нм толқын ұзындығында критерий орындалмайды, бұл осы толқын ұзындығында бір модты талшықта бірнеше режим тарай алатынын білдіреді. Бірақ іс жүзінде талшықты кабельге орналастырады, ол орнатылғаннан кейін көптеген иілулерге ие болады. Біріктіру қораптарындағы талшықтың қисаюы әсіресе өте жоғары . Талшықтың қисаюы кіші режимдердің тез әлсіреуіне әкеледі. Барлық басқа жағдайларда жарықтың таралуының мультимодалық сипаты байқалады. 850 нм толқын ұзындығында талшықтардың барлық түрлері үшін V < 2,405 критерийі бұзылатынын ескеріңіз. Осылайша, егер бір модты талшыққа толқын ұзындығы 850 нм сәулелену енгізілсе, онда көпмодалы жарықтың таралуы орын алады. Бұл жерде ешқандай қайшылық жоқ. Өйткені, 8/125 сатылы бір режимді талшық екі толқын ұзындығының спектрлік аймағында қолдануға арналған: 1310 нм және 1550 нм, мұнда ол шынайы мағынада бір режим ретінде көрінеді.

10.1-кесте талшықтардың негізгі оптикалық параметрлерінің мәндері және әртүрлі толқын ұзындықтары үшін V нормаланған жиілік

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **№№** | **оптикалық талшық** | **λ (нм)** |
| **Аты****және диаметрі** | **Δ(%)** | n1 | NA | **1550** | **1310** | **850** |
| 11 | step MMF 200/240 | - | - | 0,39 | *В*=158,09 | 187.06 | 288.29 |
| 22 | step MMF 100/140 | - | - | 0,29 | 58,77 | 69,54 | 107.18 |
| 33 | gradMMF62,5/125 | 2.1 | 1.47 | 0,28 | 35.46 | 41,96 | 64,67 |
| 44 | gradMMF50/125 | 1.25 | 1.46 | 0,20 | 20.26 | 23.98 | 36,95 |
| 55 | step SMF (SF) 8,3/125 | 0,36 | 1,468 | 0,13 | 2.187 | 2.588 | 3,990 |

*Белгілері:*қадамдық MMF (көп режимді талшық) - сатылы көпмодалы талшық; қадамдық SMF (бір режимді талшық) - сатылы бір модты талшық; grad MMF - Gradient Multimode Fiber

**8.5. Модалар саны**

Егер V < 2,405 кезінде бір ғана режим тарай алатын болса, онда V ұлғайған сайын режимдер саны күрт өсе бастайды және V белгілі бір сыни мәндерден өткенде режимдердің жаңа түрлері «қосылады», 10.2- Кестеде көрсетілген.

**Кесте 10.2 Төмен ретті режим номенклатурасы**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **Нормаланған жиілік V** | **Режимдер саны Nm** | **Мод түрлері** |
| 0 - 2,405 | 1 | HE11 – негізгі режим (жалғыз бір режимді талшық үшін рұқсат етілген) |
| 2,405 – 3,832 | 4 | HE11, H01, E01, HE21 |
| 3,832 – 5,136 | 7 | HE11, H01, E01, HE21, HE12, EH11, HE31 |
| 5,136 – 5,52 | 9 | HE11, H01, E01, HE21, HE12, EH11, HE31, EH21,HE41 |
| 5,52 – 6,38 | 12 | HE11, H01, E01, HE21, HE12, EH11, HE31, EH21,HE41, H02, E02, HE22 |
| 6.38 – 7.02 | 14 | HE11, H01, E01, HE21, HE12, EH11, HE31, EH21,HE41, H02, E02, HE22, EH31, HE51 |
| 7.02 – 7.59 | 17 | HE11, H01, E01, HE21, HE12, EH11, HE31, EH21, HE41, H02, E02, HE22, EH31, HE51, HE13, EH12,HE31 |
| 7,59 – 8,42 | 19 | HE11, H01, E01, HE21, HE12, EH11, HE31, EH21,HE41, H02, E02, HE22, EH31, HE51, HE13, EH12, HE31, EH41, HE61 |

V үлкенмәндеріүшінсатылыталшықрежимдерсанын Nmформулабойыншабағалауғаболады:

$N\_{m}=\frac{1}{2}V^{2}=\frac{2}{1}\left(\frac{πd}{λ}NA\right)^{2}\frac{2}{1}\left(\frac{πd}{λ}\right)^{2}n\_{1}^{2}-n\_{2}^{2}$ (10.8)

Бұлөрнектіңмәнібүтіннемесебөлшекболуымүмкін. Шындығында, режимдерсанытекбүтінсанболуымүмкінжәнебірмыңнанбірнешемыңғадейінауытқиды.

Параболалықөзекпрофилібарградиенттікоптикалықталшыққаарналғанрежимдерсанымынаформуламаенесептеледі:

$n\left(r\right)=\left\{\begin{array}{c}n\_{1}\sqrt{1-2Δ \frac{r^{2}}{a}}\\n\_{2}\end{array}\right.\begin{matrix}0\leq r\leq a\\a\leq r\leq b\end{matrix}$ (10.9)

(a - ядро ​​радиусы, b - қабықрадиусы) келесідейанықталады:

$ N\_{m}=\frac{1}{4}\left(\frac{πd}{λ}\right)^{2}n\_{1}^{2}-n\_{2}^{2}$ (10.10)

10.2-суреттежарықбағыттағыштарыныңәртүрлітиптеріарқылыжарықтыңтаралуыныңжалпыүлгісікөрсетілген: көпмодалысатылы, көпмодалыградиентжәнебіррежимдісатылыталшықтар.



10.2-сурет.Жарықтыңәртүрліталшықтарарқылытаралуы:а) көпмодалысатылыталшық,б) көпрежимдіградиенттіталшық,в) бірмодтысатылыталшық

**8.6. Кесілгентолқынұзындығы**

Талшыққолдайтынеңазтолқынұзындығыбіртаралурежимінкесутолқынұзындығыдепаталады. Бұлпараметрбіррежимдіталшыққатән. Егержұмыстолқыныныңұзындығыкесілгентолқынұзындығынаназболса, ондакөпмодалыжарықтыңтаралуыорыналады. Бұлжағдайдадисперсияныңқосымшаталшықтыңөткізуқабілеттілігініңтөмендеуінеәкелетінинтермоделдікдисперсиякөзіпайдаболады.

Талшықты кесу толқын ұзындығы (λCF) және кабельді кесу толқын ұзындығы (λCCF) арасында айырмашылық бар. Біріншісі әлсіз кернеу талшыққа сәйкес келеді. Іс жүзінде талшық кабельге орналастырылады, ол орнату кезінде көптеген иілулерден өтеді. Талшықтардың қатты қисаюы олар біріктірілген қораптарға салынған кезде пайда болады. Мұның бәрі бүйірлік режимдердің басылуына және λCF-мен салыстырғанда λCCF қысқа толқын ұзындықтарына ығысуына әкеледі.

Практикалық тұрғыдан алғанда, кабельді кесу толқын ұзындығы үшін үлкен қызығушылық тудырады.

Талшықты кесу толқын ұзындығын теориялық және эксперименталды түрде де бағалауға болады. Теориялық тұрғыдан, сатылы бір режимді талшық үшін - (10.7), (10.8) және (10.10) өрнектеріне сүйене отырып, біз біле аламыз

$λ\_{CF}=π\*d\*\frac{NA}{2.405}=1.847\*d\*n\_{1}\*\sqrt{∆}$ (10.11)

Толқын ұзындығы λCCF, λCF айырмашылығы, тек эксперименталды түрде бағалауға болады. Ұзындықтарды өлшеудің практикалық әдістерінің бірі λCF және λCCF кесу толқындарында берілетін қуат әдісі. Өлшенген берілген спектрлік қуат ұзындығы 2 м с бір модты талшық үлгісі үшін толқын ұзындығына байланысты көпмодалы талшық үлгісінде алынған ұқсас параметр. Қисық сызық салынады

$A\_{m}\left(λ\right)=10Lg\frac{P\_{s}(λ)}{P\_{m}(λ)}[дБ]$(10.11)

Мұнда Am – әлсіреу айырмашылығы; Ps – бір режимді талшықтың шығысындағы қуат; Rm көпмодалы талшықтың шығыс қуаты болып табылады.

Көпмодалы талшық сілтеме болып табылады. Бұл жағдайда реттелетін толқын ұзындығы бар бірдей сәулелену көзі бірмодалы және көпмодалы талшықтар үшін қолданылады. Am(λ) қисығы 10.3 суретте тұрғызылған, оның ұзын толқынды қимасы түзу (1) арқылы экстраполяцияланған. (1)-ден төмен 0,1 дБ-де параллель түзу (2) тұрғызылған. Түзу сызықтың (2) Am(λ) қисығымен қиылысу нүктесі кесілген толқын ұзындығымен сәйкес келеді.



10.3-сурет. Кесілген толқын ұзындығын анықтау

Талшықтың ұштары қорғаныш жабынынан тазартылады, кесіледі - бөлу бұрышы 2 ° аспауы керек. Сәулелену көзінен түсетін жарық нүктесінің диаметрі 200 микрон; кіріс сәулеленудің сандық апертурасы 0,20; жалпы сәулелену спектрінің ені <10 нм, жарты максимумда өлшенеді; өлшенетін толқын ұзындығы 10 нм қадаммен 1000 нм-ден 1600 нм-ге дейін.

Талшықты кесу толқын ұзындығы λCF өлшеу кезінде талшық үлгісі қажет ұзындығы 2 м және радиусы 140 мм бір ілмек пайда болатындай етіп орналастырыңыз, 10.4-Сурет бойынша радиусы 140 мм-ден аз талшықтардың қосымша иілісі болмауы керек .

Кабельдің кесілген толқын ұзындығын λCCF өлшеу кезінде сыналатын талшық үлгісінің ұзындығы 22 м болуы керек.

Талшықтың көп бөлігі ширатылған және кабельдік әсерлерді имитациялайтын радиусы кемінде 140 мм болатын катушкаға орналастырылған болуы керек. Содан кейін талшықтың әр ұшынан 1 м қашықтықта диаметрі 76 мм болатын бір ілмекті біріктіру керек ол қораптарындағы талшықтың иілу әсерін имитациялау үшін жасалады, 10.4б-Суреттегідейортаңғы бөлікте радиусы 140 мм-ден аз екі қосымша ілмектер қойылады.



10.4-сурет. Талшықты орналастыру: а) λCF анықтау кезінде;б) λCCF анықтау кезінде

**8.6. Tест сұрақтары**

* + 1. Салыстырмалы сыну көрсеткішінің айырмашылығы неде?
		2. Снеллдің сыну заңы қалай жазылған?
		3. Сандық апертура нені көрсетеді?
		4. Нормаланған жиілік дегеніміз не?
		5. Оптикалық талшықтарда қандай режимдер бар?
		6. Қандай жағдайларда оптикалық талшық бір режимде жұмыс істейді?
		7. Қандай жағдайда оптикалық талшық мультимодада жұмыс істейді?
		8. Жарық бағыттағышында тек бір режимнің таралу критериі қандай?
		9. Кесілген толқын ұзындығы дегеніміз не?
		10. Кабельді кесу толқын ұзындығы қалай анықта?