

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

Ақпараттық және телекоммуникациялық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

Өміртай Мағжан Серікұлы

Оптикалық байланыс жүйелерінде мәлімет ағындарын тарату

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

5B071900 – «Радиотехника, электроника және телекоммуникация» мамандығы

Алматы 2019

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

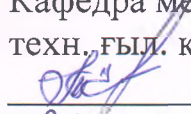
Ақпараттық және телекоммуникациялық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

ҚОРҒАУҒА ЖІБЕРІЛДІ

Кафедра меңгерушісі

техн. ғыл. канд-ы

 Е.Таштай

«26» апрель 2019 ж.

ДИПЛОМДЫҚ ЖҰМЫС

Тақырыбы: «Оптикалық байланыс жүйелерінде мәлімет ағындарын тарату»

5B071900 – «Радиотехника, электроника және телекоммуникация» мамандығы

Орындаған:

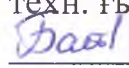


Өміртай М.С.

Пікір беруші

Алматы энергетика және байланыс
университетінің, ТКС каф. меңгерушісі,

техн. ғыл.канд-ы

 А.С.Байкенов

«21» 04 2019 ж.

Ғылыми жетекші

ЭТжҒТ кафедрасының

лекторы

 М.Б.Тирижанова

«23» 04 2019 ж.

Алматы 2019

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ БІЛІМ ЖӘНЕ ҒЫЛЫМ МИНИСТРЛІГІ

Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті

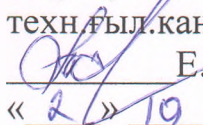
Ақпараттық және телекоммуникациялық технологиялар институты

Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасы

5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация

БЕКІТЕМІН

Кафедра меңгерушісі,
техн. ғыл. канд.

 Е.Таштай
« 27 » 12 2018 ж.

**Дипломдық жұмыс орындауға
ТАПСЫРМА**

Білім алушы Өміртай Мағжан Серікұлы

Тақырыбы «Оптикалық байланыс жүйелерінде мәлімет ағындарын тарату»

Университет ректорының «16» қазан 2018 ж. № 1162-б бұйрығымен бекітілген.

Аяқталған жұмысты тапсыру мерзімі “25” сәуір 2019 ж.

Дипломдық жұмыстың бастапқы берілістері:

1) Фотондық оптикалық байланыс арналарына жалпы сипаттама, 2)

Шектеулі қысқа импульстердің дисперсиялық жайылуы; 3) есептеу тәсілдері

Дипломдық жұмыста қарастырылатын мәселелер тізімі:

а) желілердің жалпы архитектурасы; ә) тарату әдістері, қызметтер мен хаттамалар; б) Оптикалық байланыс жолдарын есептеу; Релеевтік шашырау есебінен жарықтың әлсіреуін есептеу; в) Экономикалық тиімділігі; г) Еңбек қорғау шараларын ұйымдасытыру.

Сызбалық материалдар тізімі (міндетті сызбалар дәл көрсетілуі тиіс)

Сызба материалдары 11 слайдта көрсетілген: 1) Конвергенттік желілердің құрылымдық сұлбалары; 2) конвергенттік желілердің байланыс қызметтерін көрсетуіне арналған сұлбалар.

1 Ұсынылатын негізгі әдебиет 23 атау: Ким И., Коревар Е. Доступность атмосферных оптических линий связи (АОЛС) и гибридных АОЛС/радиочастотных систем связи, Москва, - 2010. Хан В.А. и т.д. Передача оптического излучения через атмосферные трассы// «Электросвязь», №8. - 2010. Крюков П. Лазер – замечательное достижение XX века //Квант. – 2007.

дипломдық жұмысты (жобаны) дайындау
КЕСТЕСІ

Бөлімдер атауы, қарастырылатын мәселелер тізімі	Ғылыми жетекшіге және кеңесшілерге көрсету мерзімі	Ескерту
Оптикалық байланыс арналарына жалпы сипаттама	20.01.2019 ж. - 01.03.2019	орындалды
Қысқа импульстердің сипаттамасы	02.03.2019 ж. - 02.04.2019 ж.	орындалды
Есептеу бөлімі	01.04.2019 ж. – 15.04.2019 ж.	орындалды

Дипломдық жұмыс (жоба) бөлімдерінің кеңесшілері мен
норма бақылаушының аяқталған жұмысқа(жобаға) қойған
қолтаңбалары

Бөлімдер атауы	Кеңесшілер (аты, әкесінің аты, тегі, ғылыми дәрежесі, атағы)	Қол қойылған күні	Қолы
Оптикалық байланыс арналарына жалпы сипаттама	М.Б.Тирижанова, ЭТжҒТ каф.лекторы	7.03.18	
Қысқа импульстердің сипаттамасы	М.Б.Тирижанова, ЭТжҒТ каф.лекторы	5.04.18	
Норма бақылау	PhD докторы, ЭТжҒТ каф.сениор-лекторы Тайсариева К.Н.	25.04.19	

Ғылыми жетекшісі

(қолы)

М.Б.Тирижанова

Тапсырманы орындауға алған білім алушы

М.Өміртай

Күні

“ 7 ”

03

2019 ж.

АҢДАТПА

Берілген дипломдық жұмыста атмосфера бойынша оптикалық сәулелерді тасымалдауды талдау барысы қарастырылған.

Жұмыста сонымен қатар, қысқа импульстерді жіберу жолдары, импульстер ағынын шығару мен күшейтуге арналған құрылғылардың құрылысы көрсетілген, осындай сигналдардың ұзақтығын өлшеу есептеулері, әлсіреудің әр түрі үшін атмосфера арқылы оптикалық сигналдың қуаты, ұзақтығы шектеулі импульстердің өзгерістер графиктері келтірілген.

Жұмыста, сондай-ақ, өмір тіршілік қауіпсіздігі мәселелері, ғылыми-зерттеу жұмыстарына арналған бөлмедегі сәулелену қауіпсіздігі қарастырылған.

АННОТАЦИЯ

В данном дипломном работе рассмотрен анализ передачи излучения через атмосферные дороги.

В работе также представлены пути выявления импульсов не высокой длительности, и состав оборудования, используемого для излучения и усиления импульсов, приведены расчеты измерения длительности нескольких импульсов, графики изменения оптического сигнала атмосферой для каждого вида ослабления, расширенного расплывания импульсов предельной длительности.

В работе также описаны вопросы безопасности жизнедеятельности, в том числе система безопасности лазерного излучения, освещение в кабинете, предназначенном для выполнения научно-исследовательской работы.

ANNOTATION

In this diploma work analysis of transmission of photonic radiation is considered through atmospheric routes.

The ways of forming of impulses of short duration, composition of the equipment used for a radiation and strengthening of impulses, are also presented in a project, calculations over of measuring of duration of such impulses are brought, charts of power of visual signal by an atmosphere for every type of weakening, dispersible running back of impulses of maximum duration.

The questions of safety of vital functions are also described in a project, including system of safety of laser radiation, illumination in the cabinet intended for implementation of research work.

МАЗМҰНЫ

Кіріспе	9
1 Оптикалық байланыс арналарына жалпы сипаттама	10
1.1 Импульстер қалыптасуы	10
1.2 Талшықты лазерлер	11
1.3 Ультрақысқа импульстер лазерлері	19
1.4 Тапсырманың қойылымы	14
2 Қысқа импульстердің сипаттамасы	19
2.1 Ұзақтығы шектеулі қысқа импульстер сипаттамасы	20
2.2 Лазерлік импульстерді өндіру	21
2.3 Интерференциялық ағын көмегімен мәлімет тарату	22
2.4 Оптикалық сәуленің атмосферада таралуы. Электромагнитті толқындар	24
2.5 Титан-сапфирлі лазерлер	28
3 Есептеу бөлімі	44
3.1 Қысқа импульстер ұзақтығын өлшеу	44
3.2 Оптикалық сигналдардың қуатының атмосфера арқылы әлсіреуі	45
3.3 Оптикалық сигналдың релеевтік шашырауы	46
3.4 Атмосферадағы бір түсті бөгеуілдер	56
3.5 Арнаны есептеу	57
3.6 Шектеулі қысқа импульстердің дисперсиялық жайылуы	60
Қорытынды	62
Пайдаланылған әдебиеттер тізімі	63
А қосымшасы	
Ә қосымшасы	
Б қосымшасы	

КІРІСПЕ

Мәліметтерді оптикалық сигналдар түрімен тарату адамзатқа бұрыннан бері белгілі (дабылдық от жағу, оптикалық телеграфтар және т.с.с.). Бірақ 1960 жылдары фотондық диапозонда сәулеленудің жаңа көздері – лазерлер пайда болғанда ғана қазіргі заманға сай оптикалық ақпараттық жүйелерін құру мүмкіндігі туды.

Соңғы уақытта атмосфералық оптиканың дамуы оның іс-жүзінде қолдану аясының кеңеюіне байланысты. Бұл оптикалық құрылғылар жасау және электромагниттік толқындардың инфрақызыл диапозонында «алыс» қашықтықтарды игеру саласындағы жетістіктерге жетумен ғана емес, сонымен қатар Жердің табиғи ресурстарын зерттеу мәселесі аясындағы инженер-мамандар қызығушылығының өсуімен де байланысты.

Атмосфералық жол арқылы фотондық сәулеленудің таралуын зерттеу тәжірибелік қызығушылық туғызады, себебі олар қоршаған ортаны қорғау мәселесімен тығыз байланысты. Атмосфералық жолдардың оптикалық сипаттамасын зерттеу үшін сәулелену ретінде лазерлерді қолдану, басқалармен салыстырғанда, олардың сәулеленуінің үлкен қарқындылығы әсерінен тиімдірек болады.

Байланыс жүйелерінің сенімділігін қамтамасыз ету – аппаратураларды қолдану барысында туындайтын басқа да шарттармен қоса, жедел жекешелеу және бұзылуларды жою әдістерін қолданумен байланысты кешенді тапсырма. Оптикалық сәулеленуді әлсірететін жолдың бөліктері арқылы байланыс арнасы бойынша дабылдың дұрыс өтуімен шартталған оптикалық сәулеленуді тарату әдісі маңызды орын алады.

Ақпарат тасушылар есебінде ұзақтығы 1 нс-тан аз болатын лазерлік импульстер қолданылуы мүмкін.

Қазіргі кезде оптикалық байланыс — бұл электромагниттік толқындардың оптикалық диапозонында электрліа байланыстың кез келген дабылын тарату және қабылдау да болып табылады. Байланыста оптикалық диапозондардың ең жиі қолданылатын аймағы – рентгенттік аумақтан бастап осы субмиллиметрлік (толқын ұзындығы λ 0,1-ден 100 мкм-ге дейін) аумақта жататын 0,4-ден 10,6 мкм-ге дейін аумақ болып саналады, және оның ішінде көрінетін ($\lambda=0,4...0,75$ мкм), инфрақызыл (ИК) ($\lambda=0,75...2$ мкм) және орта ИҚ ($\lambda=2...20$ мкм) диапозондары жатады. Оптикалық сигналдардың таралу ортасы ашық оптикалық тарату жүйесі (АОТЖ немесе FSO — Free Space Optics) үшін – бос кеңістік, атмосфера, су және толқынды оптикалық тарату жүйесі (ТОБЖ, FOTS — Fiber Optic Transmission System) үшін оптикалық кәбілдер қолданылады.

Менің дипломдық жобамның мақсаты – ашық оптикалық байланыс арналарының әлсіз бөліктері үшін оптикалық сәулеленудің тасымалдау ағынының мүмкіндіктерін талдап, тиімділігін бағалау.

1 Оптикалық байланыс арналарына жалпы сипаттама

Ашық атмосфералық оптикалық байланыс арналары (АОБА) бүгінгі таңда пайдалану аясы өте үлкен: резервті және тез орнатылатын уақытша арналардан – ұялы байланыста станса аралық байланыс орнатуға дейін. Алайда арнаға 99,999% қатынауды керек ететін күрежолды желіде АОБА-ны пайдалану тиімсіз.

Қолданылуын шектейтін АОБА-ның басты ерекшелігі – оптикалық сәулеленудің өтуінің атмосфера күйіне тәуелділігі. Осы жағдайда лазерлік желілердің жұмыс қабілеттілігіне кері әсерін ауа тығыздығының әртүрлілігінен болатын ауытқулар және аэрозоль бөліктерінде (мысалы, тұман) шашырау кезінде сәулеленудің қуатының шаршауы сияқты факторлар тигізеді.

Ауытқулар. Ауытқулардың болуы қабылдауыш антенна жазықтығында спектр-құрылымының – ашық және күңгірт дақтың бей-берекет пайда болуына әкеледі [1].

Ал енді төменгі тарауларда осындай оптикалық арналарда өшулерді азайту үшін ұзақтығы аз импульстерді аламыз.

1.1 Импульстердің қалыптасуы

Қысқа импульстерді көптеген толқындардан модалық синхронизация және интерференция, сондай-ақ сызықты емес ортада әр түрлі жиіліктегі толқын беттесулерінің есебінен қалыптастыруға болады. Төменде қысқа импульстердің интерференция және сызықтық емес ортада қалыптасуы жайлы айтып кетуге болады.

Жиіліктік модуляцияларды пайдалана отырып, бір немесе екі периодты тізбегі бар импульстерді қалыптастыруға болады. Осы кезде барлық импульстер тізбегі фотоқабылдағыш арқылы осы сәулеленудің импульстік уақытының берілген мезетінде бар ретінде қабылданатын болады. Осылай, лазерлік сәулеленудің спектрінің жиіліктік модуляциясы есебінен мәліметтерді тарату үшін екілік кодты қалыптастыруға болады.

Мысалы, ұзақтығы 1 нс-тан төмен лазерлік сәулелену импульстерінің турбуленттік атмосфера және аэрозольдік жүйелер арқылы таралу мәселелерін зерттеу өткен ғасырдың 90-жылынан бастап, бүгінгі күнге дейін жалғасын табуда.

Лазерлік импульстердің де аэрозольдік атмосфера арқылы таралуын зерттеу оптикалық байланыстар, суретті тарату және телеметрия, атмосфералық параметрлерді бөліктерге бөлу, ластанатын заттар диагностикасын жүргізу сияқты тапсырмалар үшін өте маңызды [2].

Осымен бірге осындай зерттеулер, есептеулер наносекундты және одан да қысқа импульстер қалыптасу кезінде модааралық соғуларды пайдалана отырып,

принциптік айырмашылық бар екенін көрсетеді. Осы соғулар сәулеленудің спектрлік құрамаларының модааралық интервалына ығысқан өзара әсерлесуден (интерференциялық әсер) тұрады.

1.2 Талшықты лазерлер

Қазіргі кезде оптиканың дамуы жаңа құрылғының, дәлірек айтқанда толық ішкі шағылысу құбылысына негізделген осы оптикалық талшықтардың пайда болуына әкелгенін айтқан кеткен өте маңызды. 1.1-суретте оптикалық талшықтың құрылысы атап көрсетілген.

Ол шыныдан жасалған жұқа жіпшеден (өзекшеден) тұрады, оның сыртын шынының басқа сортынан жасалған қабықша орайды. Өзекшенің шынысының сыну көрсеткіші сыртқы қабықшаның сыну көрсеткішінен бірнеше есе көбірек болуы керек. Қорытындысында өзекше бойынша таралатын жарық өзекше-қабықша өз шекарасында толық ішкі шағылысу болады және ондаған, жүздеген шақырымға дейінгі үлкен арақашықтықты өшуліксіз өте алады. Осыған бүкіл жер шарын орап жатқан талшықты-оптикалық байланыс негізделген.

Талшықты лазер белсенді ортасы – диаметрі бірнеше миллиметр және ұзындықтары бірнеше метрге дейін жететін цилиндрден тұрады.



Сурет 1.1– Оптикалық талшық

Осы белсенді ортаны толтырған кезінде пайда болатын жылу сыртқы қабықша материалына үлкен көлемде (қабықша диаметрі өзекше диаметрінен он есе үлкен) таратылады деген сөз [3].

1.3 Ультрақысқа импульстер лазерлері

Лазерлік ғылымның тамаша жетістіктерінің бірі – сәулеленуді ұзақтығы негізгі шекке – жарық толқынының периодына жақын ультрақысқа импульстер (УҚИ) түрінде өндіру болып табылады. Басқаша айтқанда, жарықты бірнеше фемтосекундқа ($1 \text{ фс} = 10^{-15} \text{ с}$) созылатын аралыққа жинақтау. Фемтосекундтың

қысқалығын елестету қиын. Табиғатта максималды мүмкін болатын жарық 0,3 мкм арақашықтықты (адамның шашы қалыңдығы 40 мкм-дей) 1 фс-та өтеді.

Лазерлік сәулеленудің қысқа импульсі неге керек деген сұрақ туады. Жарық шоғын қысқартуға ұмтылудың бірден бір себебі – тез ағып өтетін құбылысты зерттеу үшін пайдалану.

Тез өтетін құбылысты УҚИ лазерлері көмегімен зерттеу мына әдістеме бойынша өткізіледі. Жеткілікті қарқынды толқындар ұзындығы бар лазерлік импульс зерттелетін үлгіде молекула күйінде өзгерістер әкеледі.

Жартылай өткізгіш материалдардағы фотондар динамикасы қысқа импульстер көмегімен зерттелді. Осы компьютерлер мен телекоммуникациялар үшін керекті сигналдарды тез басқаратын жетілдірілген оптофотонды құрылғылар дамытуға мүмкіндік берді.

Лазерлік сәулелену ұзақтығы қысқа импульстер басқа саларларда айқындалды. Уақыттық аралықты айзайтқанда қуаттың, сәулеленуді фокустағанда – қарқындылықтың өсуін аламыз. Жоғары қарқындылық оптиканы негізімен өзгертті. Оптика жарыққа фотонның үн қатуы туралы ғылым. Оптикалық қасиеттер материалдағы жарық пен фотондардың өзара әсерлесу нәтижесі болып табылады.

Лазерлік сәулеленудің салыстырмалы түрде үлкен емес энергиясы, бірнеше джоуль және бірнеше фемтосекундқа «топталған» петаватта ($1 \text{ ПВт} = 10^{15} \text{ Вт}$) импульстік қуатты береді. Бүгінгі мезетте осындай қуатты лазерлік қондырғылар да пайда болды. Олардың сәулеленуін фокустауға және 10^{21} Вт/см^2 тең жылдамдықты алуға болады.

Жарық қарқындылығы 10^{18} Вт/см^2 -ге тең кезінде фотондардың жарыққа үн қатуы да түбегейлі өзгереді. Фотондар жылдамдығы жарық тездығына жақындайды және магниттік өріс те елеулі рөл ойнай бастайды (Лоренц күші жұмыс істейді). Релятивистік әсер едәуір бола бастайды, мысалы жылдамдыққа қарай массаның көбеюі. Ол тербелістің фазасына да, амплитудасына да әсер етеді. Фотондар тек жарық жиілігінде ғана емес, осы жиіліктің көптеген гармоникасында қайта сәулеленеді. Фотондарға магниттік өрістің күші әсер еткен соң ғана оның жолы жарық шоғының бағытында едәуір импульс алатындай қисаяды. Сондай жылдам жарықтың затпен әсерлесу режимдері релятивистік оптика деп аталады. Оның есебінен лазерлік сәулеленудің жоғары гармоникаларынан бастап, жұмсақ рентгенге дейін генерациялау және фотондар энергиясын ондаған мегафотон-вольтке дейін жылдамдату мүмкіндігі болып табылады [3].

1.4 Тапсырманың қойылымы

Қарапайым лазерде модалардың фазалары кез келген мәнді қабылдай береді. Алайда егер әрбір мода мен басқа модалар арасындағы фазаны жазып алсақ, онда ол лазерлік спектрде кездейсоқ немесе тұрақты қарқындылықты

болып көрінбейді. Оның орнына лазер жылдамдығы өте аз және қарқындылығы көп импульсті құра отырып, периодты түрде жиналады. Айтылған үрдіс модалар синхронизациясы болып табылады. Ол өте қысқа импульстерді генерациялау үшін де керек.

Модалар синхронизациясына негізделген өте қысқа импульстерді өндірудің екі мүмкін жолы бар. Біріншісінде өндіру барлық модада кездейсоқ фаза және қарқындылықпен басталып, сонан соң ғана еліктен өткізу жүреді. Үрдіс соңында барлық модалар қатты байланысқан және қарқындылығы бойынша үлестірілген, және резонаторда ұзақтығы өте қысқа бір ғана импульс қалады. Екіншісінде – өндіру бір модада басталып, алайда модаалық әсерлесу нәтижесінде өндіру керекті фаза айырмашылығы бар басқа модаларда да қозып, нәтижесінде түрі бірінші нұсқадағыдай болып шығады. Тағы да 10-20 өткелден (өтуден) кейін де импульстерді қысқарту және күшейту үрдісі жүреді, аяғында тұрақты УҚИ алынады.

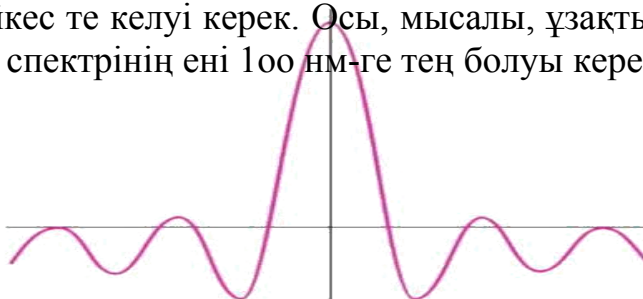
Жарық толқындарының периодына жақын жарық импульсінің шекті қысқа импульсін жарықтың толқындық жаратылыстары арқылы алуға болады екен. Жиіліктері жақын екі толқынды қосу құбылысы тербелістер соғуы деп аталатыны мәлім (1.2-сурет). Соғу периоды жиіліктер айырмасымен анықталады. Оптикада жарық толқындары амплитудамен ғана емес, толқын периоды бойынша ортақтастырылған амплитуда квадратымен анықталатын қарқындылықпен де сипатталады. Жарық толқындарының жағдайында олардың қосындысы мына қарқындылықтың периодты өзгерісіне әкеледі. Көрші толқындар арасында жиіліктерінің айырмасы бірдей үш немесе одан да көп толқындарды қосқанда да нәтиже фазалар қатынасына тәуелді болады. Егер барлық толқындардың амплитудасы сәйкес келсе, қосынды айқын көрсетілген максимумның пайда болуына әкеледі. 1.3-суретте жиіліктері $f_0, 2f_0, 3f_0, 4f_0, 5f_0$ және фазалары амплитудаларының сәйкес келуін қамтамасыз ететін бес толқынның қосындысының нәтижесі көрсетілген.



Сурет 1.2 – Екі толқынның соғылуы

Математикалық операцияның (Фурье талдауы) өзі периодтық функция жіктелетін синусоида амплитудаларын есептеуді білдіреді. Осыдан кері операцияны жүргізуге, яғни толқындардың сәйкес амплитудалары мен жиіліктерін қосу (синтез) және қосылған толқындардың санымен анықталатын импульстердің периодты тізбегін алуға болатыны шығады. Басқа сөзбен айтқанда, импульстердің периодты тізбек синтезін көптеген үзіліссіз толқындар қосындысымен жүргізуге болады.

Лазер резонаторы тендей алшақтатылған жиіліктері бар модалар жиынтығынан тұрады. Өндіру белсенді ортаны күшейту жолағына түсетін модаларда жүреді және лазерлер осы жиілікте көптеген толқындарды сәулелендіруге қабілетті. Осы жағдай ғана ультрақысқа импульстерді алу үшін бастысы болып табылады. УҚИ лазерлері мәні бойынша керекті жиіліктері, фазалары және амплитудасы бар көптеген толқын алынатын синтезатор болып табылады. Фурье түрлендіру формуласы бойынша ұзақтығы τ импульсті алу үшін ең үлкен және ең кіші жиіліктер айырмасы $\Delta\nu$ (спектр ені) $\tau \cdot \Delta\nu = 1$ қатынасына сәйкес те келуі керек. Осы, мысалы, ұзақтығы 10 фс импульсті алу үшін сәулелену спектрінің ені 100 нм-ге тең болуы керек дегенді білдіреді.



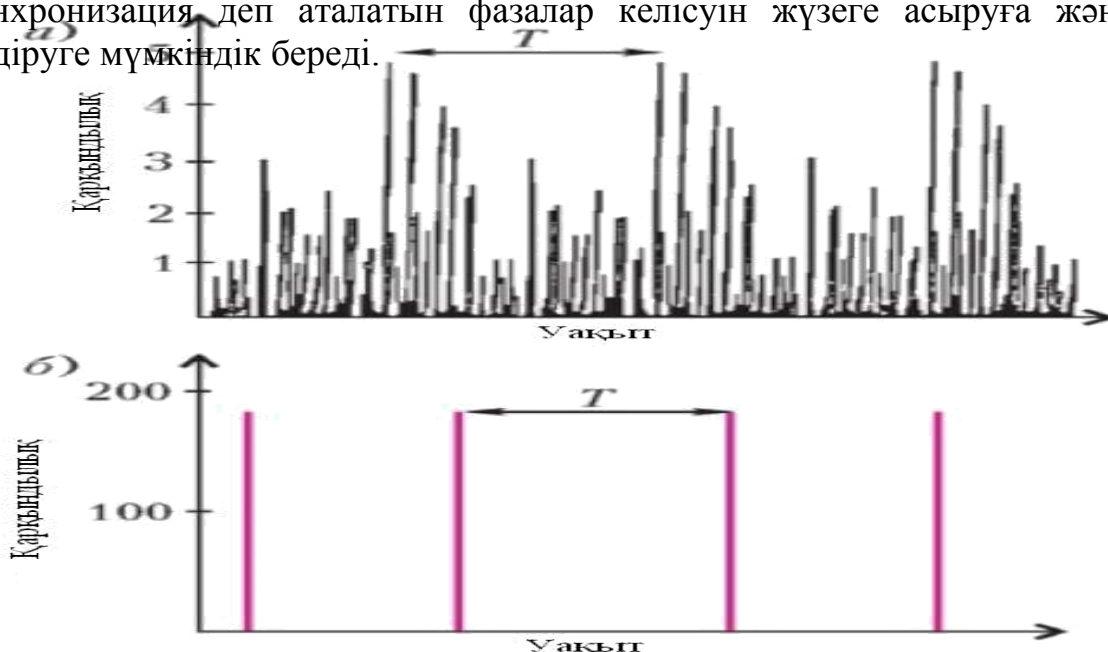
Сурет 1.3 – Бес толқынның қосындысының нәтижесі

Мода селекторы көмегімен лазерді бір модамен ғана жұмыс істетуге болады. Алайда енді, керісінше, оны күшейту жолағына түсетін көптеген модада жұмыс істеуге мәжбүр ету керек. Ұзындығы 1 м-ге тең резонатор кезінде сапфирдің күшею жолағына миллионға жуық модалар келіп түседі. Осылайша, күшейту жолақтарының ені үлкен белсенді ортамен жұмыс жасайтын лазер эквидистантты жиілік қосындысы ұзақтығы $\tau \cdot \Delta\nu = 1$ қатынасымен анықталатын импульсті бере алатын толқынның үлкен санын сыртқа шығаруға қабілетті.

1.4а және 1.4б-суреттерінің ордината осі бойынша әртүрлі масштабта салынғанына көңіл аударыңыз. Келісілген осы фазада алынған оңаша импульстің қарқындылығы осы флуктуационды импульстердің қарқындылығынан көп есе асып түседі.

Жарық қарқындылығын (фотондар саны) ұлғайтқан сайын жарықтың

жұтылуы азаяды. Лазерлік сәулелену үшін қарқындылыққа байланысты өткізу коэффициентін өзгерту – сызықты емес оптика үшін қарапайым әсер. Қарқындылыққа байланысты өзінің жұту коэффициентін өзгерте алатын заттар жарқыраушы жұтушылар деп аталады. Міне осының көмегімен модалар синхронизация деп аталатын фазалар келісуін жүзеге асыруға және УҚИ өндіруге мүмкіндік береді.

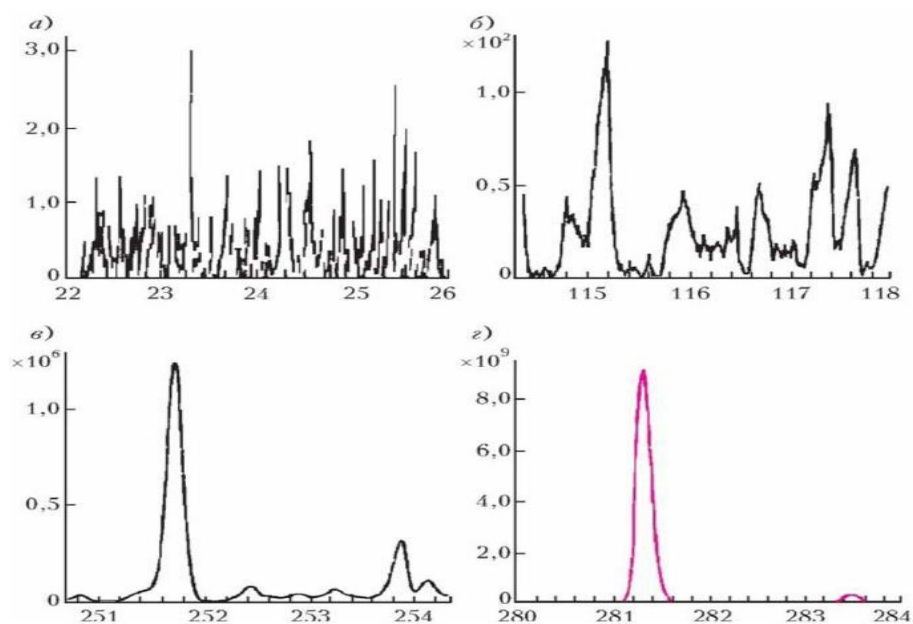


а) фазалар кездейсоқ таралған; б) фазалар толықтай келісілген

Сурет 1.4 – Амплитудалары бірдей және тұрақты аралыққа өзгеріп отыратын жиілікті толқынның қосылу мысалы

Өзін-өзі қоздыру шарты орындалғанда (күшейтудің толық коэффициенті 1-ден үлкен) флукуационды импульс пайда болуы бар көптеген модала өндіру басталады. 1.5-суретте компьютерлік моделдеу жолымен алынған осындай даму үрдісі көрсетілген. Флукуационды импульстен тұратын сәулелену белсенді орта арқылы тізбектеліп өткізіледі. Импульстер жолында периодындағы қалыптасу қалай өтіп жатқаны көрсетілген және осы модалар синхронизациясы туралы куәлендіреді. Шындығында, лазерлер энергиясын осындай импульсте шоғырлағанды «қалайды» және осымен моданың өзін-өзі синхрондауға жетеді.

Алайда олардың кемшіліктері бар. Нақты айтқанда, қарқынды импульспен әсер еткенде осы күй импульстер өткеннен кейін де біраз уақыт (осы уақыт негізгі деңгейдің бастапқы қоныстану қалпына келтіру үшін керек) сақталып тұрады.



Сурет 1.5 – Жарқыраушы жұтқышы бар лазерде УҚИ қалыптасу үрдісінің компьютерлік үлгісі

Қарқынды импульс өткенінен кейін оның соңынан қарқындылығы азырақ импульс «тез өтіп кетеді», содан оңаша УҚИ-тің айрықша келісті суреті бұзылады. Осы кемшілікті жою үшін сызықты емес оптиканың басқа өзін-өзі фокустау құбылысына негізделген жасанды жарқыраушы жұтушы ойлап табылды. Ол мөлдір заттың сыну көрсеткішінің сол зат арқылы өтетін жарықтың қарқындылығына тәуелділігіне де негізделген:

$$n = n_0 + n_2 I \quad (1.1)$$

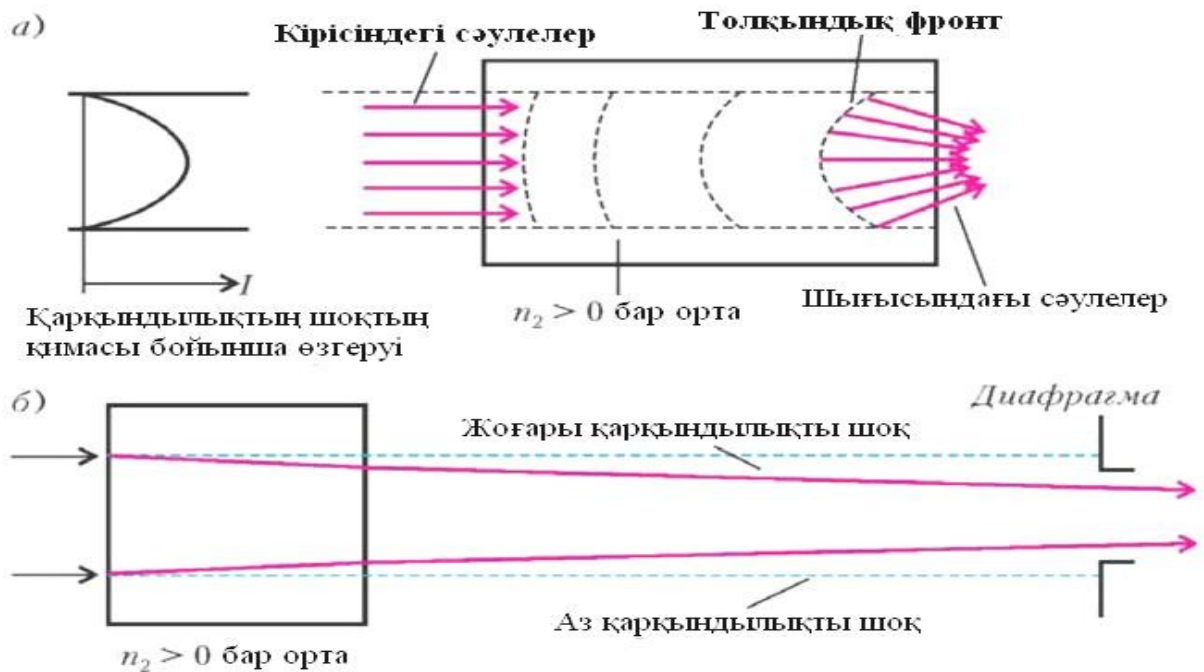
мұндағы n_0 – әлсіз қарқындылығы үшін сыну көрсеткіштері;

n_2 – белгілі бір зат сыртқы қабаты үшін коэффициент.

Мұндай әсерлер тек қана лазерлік сәулеленуге тән үлкен қарқындылық кезінде ғана айқындалады.

1.6 а-суретінде орталығында ең үкен және шетіне қарай нөлге жақындай беретін көп қарқындылығы бар лазерлік сәуле шоғы зат қабаты арқылы өтетіні көрсетілген. Егер де $n_2 > 0$ болса, толқындық фронттың қисаюы шығады және сәулелер шоқтың тура осіне қарай ауытқиды. Басқа сөзбен айтқанда, жеткілікті қарқындылық кезінде мөлдір заттың жазық параллельді қабыты жинағыш линзаға айналады, оның оптикалық күші шоқтағы ең үлкен қарқындылыққа

тәуелді (1.6б-сурет). Жоғары қарқындылығы боса шоқта жарық түгелдей диафрагмалар арқылы өтетін, ал төмен қарқындылық кезінде аздап диафрагмамен ұсталып қалатынын көру оңай. Осылайша, өзін-өзі фокустау әсері диафрагмамен үйлесіп, жарқыраушы жұтқыш сияқты жұмыс жасайды.



а) Өзін-өзі фокустау әсері; б) диафрагма үйлескен өзін-өзі фокустау
Сурет 1.6– Қарқындылық кезіндегі жарықтың диафрагмасы

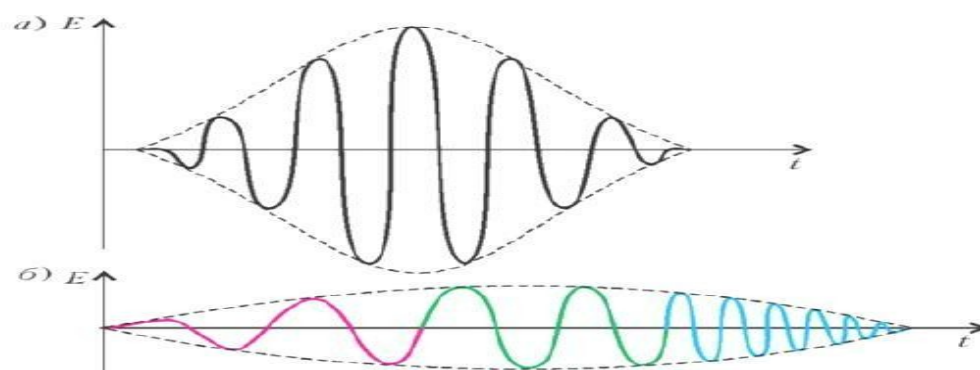
Алайда шекті қысқа импульстерді алуға тағы да бір жағдай кедергі болады. Себебі, жарық өтетін заттардың дисперсиясы (импульстың кеңеюі) бар, яғни сыну көрсеткішінің толқын (жиілік) ұзындығына да тәуелділігі. Осы әртүрлі жиіліктегі жарықтың әртүрлі жылдамдықпен таралуына әкеледі.

Сыну көрсеткіштері n жиілікке тәуелді болғандықтан, әртүрлі модалар толқындары әртүрлі жылдамдықпен де тарайды, сондықтан ол фазалардың келісуі бұзылады. Жоғарыда айтқанымыздай, импульс ұзақтығы ол спектр енімен байланысты:

$$\tau \cdot \Delta \vartheta \cong 1 \quad (1.2)$$

Осындай үлкен спектрлі импульс дисперсиясы (импульстер бұзылуы) бар ортада таралады. Әр түрлі жиіліктер «аяғына қарай» жүрмейді. Сыну көрсеткіші көбірек толқындар, сыну көрсеткіші де азырақ толқындардан артқа қала бастайды. Қорытындысында импульстің ұзақтығы ұлғайып – ол «жайылады». Импульстің алдыңғы жағында таралу тездығы жоғары жиіліктер, ал импульстің соңында – таралу жылдамдығы төмен жиіліктер болады. Сондықтан ұзақтық көлемінде жиіліктің осы уақытқа қарай өзгеруі, яғни

жиіліктік модуляцияны аламыз. 1.7-суретте импульстің пішінінің өзгерісі көрсетілген және ол дисперсияланған (импульсы кеңейген) ортада жол ұзындығы көп болған сайын ұлғая түседі.

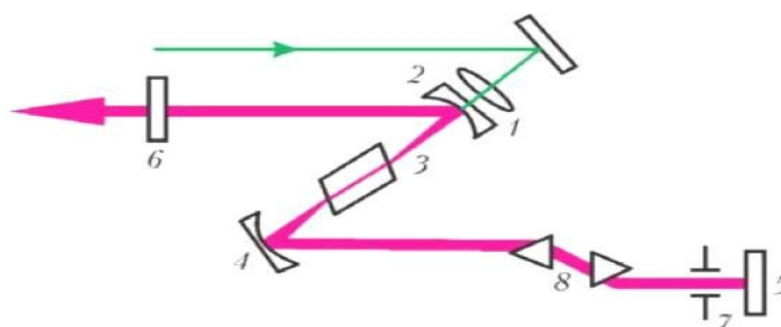


Сурет 1.7 – Дисперсия (импульстың кеңеюі) әсері а) импульстің бастапқы пішіні; б) дисперсиялы (импульстың кеңеюі) заттың қабатын өткеннен кейінгі импульс

Нәтижесінде модалар синхронизациясы есебінен фемтосекундты импульстерді өндіруші лазер 1.8-суретте көрсетілген. Үздіксіз режимде жұмыс істейтін шығару лазердің жасыл жарығының шоғы айна (2) арқылы линзамен (1) сапфир кристаллына (3) инверсті (терістеу) қоныстану мен күшейтудің керекті деңгейіне жету үшін фокусталады. Резонатор ол төрт айна – резонатордың соңында екі жазық (5 және 6) және лазерлік жарықты осы сапфир кристаллына фокустаушы екі ойыс айна (4) арқылы құрылады. Сапфир кристаллының тек өзінде өзін-өзі фокустау әсерін де қамтамасыз ету үшін диафрагма (7), ал дисперсияның (импульс кеңеюі) орнын толтыру үшін призма жұбы (8) енгізіледі.

Лазердің элементтерін дұрыс іріктеп алу және тиімді қалыпқа келтіру кезінде ұзақтығы 5 фс-ке дейін импульсті алуға мүмкіндік туады.

Импульстердің жиілігі резонатордың айналары арасындағы оптикалық ұзындық арқылы анықталады және әдетте 80 МГц-ті құрайды. Спектр ең үлкен толқын ұзындығы 750 нм-ге (қызыл түсті жарық) сәйкес келеді. Лазердің өз жұмысына керекті әсер 1 Вт-тан аз шектелген орта шығыс қуаты бар кезде ғана болады. Осы импульстегі энергия 10 нДж-ден аспайды деген сөз [3].



Сурет 1.8 - УҚИ лазер сұлбасы

2 Қысқа импульстердің сипаттамасы

Осы бөлімде жарық өрісінің бірнеше тербелісінен ғана тұратын импульстердің мұндай сызықты емес динамикасын сипаттайтын толқындық теңдеулердің құрылу қағидалары туралы жазылған. Соншалықты шектеулі қысқа импульстердің оптикалық құбылыстары қарастырылған: олардың дисперсиялық (импульстердің кеңеюі) жайылуының әртүрлі сценарийлері, шектеулі қысқа солитондардың қалыптасуы және т.б. Мұндағы солитон деп отырғанымыз сызықты емес ортада таралатын құрылымы тұрақты оңашаланған толқын. Солитондар осы бөлшектерге тән (бөлшекке ұқсас толқын) әрекет етеді: бір-бірімен әсер еткенде олар бұзылмайды, қайта өзінің құрылымын өзгеріссіз сақтай отырса, шарықтап кетеді.

Соңғы төрт «лазерлік» онжылдықта уақыт масштабтардың қысқаруы – микросекундты (10^{-6} с) ұзақтықты бос өндіруден бастап жақында ғана қиял болып көрінетін фемтосекундты (10^{-15} с) аймаққа дейінгі жолды өтті. Соңғы жылдары зертханалардың бәрінде жарық өрісінің 2-3 толық тербелісінен ғана тұратын бірнеше фемтосекундты ұзақтығы бар сигналдарды алуды үйренді [4]. Олардың ұзақтығын есептеу өте қиын техникалық тапсырма болып табылады. Өрістің ондаған осцилляциясынан ғана тұратын импульстерді шектеулі қысқа импульстер (ШҚИ) деп атауға болады, себебі осылайша оларды «өте қысқа импульстер» деп аталатын өрістің көптеген тербелісінен тұратын пико- және фемтосекундты импульстардың арасынан бөліп қарауға болады. Шектеуі аз деп айтқанда осы импульстердің өздерінің ұзақтығын емес, өрістің осцилляция саны туралы ұғым екенін ерекше айта кету керек. Басқаша айтқанда, ШҚИ-ке ИҚ аймағында спектрлі электромагниттік өрістің бірнеше тербелісінен тұратын субпикосекундты импульстері, әрі аттосекундты аумақты ұзақтығы бар УК аймақ спектрінің импульстері жатады [5].

ШҚИ-тің техникада ары қарай дамуы өз кезегінде олардың затпен өзара әсерлесу теориясының пайда болуымен шартталған. Электромагниттік өрістің саны аз осцилляциясынан ғана тұратын жарық импульстері үшін импульс жинақтағышы дағдылы түсінігі – физикалық тұрғыдан қарағанда өз мағынасын жоғалтады. Сондықтан жарық импульсінің жай өзгеретін жинақтағышы әдісі тиімді бола бермейді. Осыған байланысты соңғы жылдары оптикалық ортада таралу кезінде мынадай лазерлік импульстер өрісінің динамикасы талдауының жаңа теориялық әдістерін қазір жете зерттеуге үлкен назар аударылды. Төменгі тарауда мөлдір изотропты ортада осы ШҚИ өрісінің сызықты емес динамикасын сипаттайтын оптика үшін жаңа мынадай теңдеулерді құрастыру қағидалары ұйымдастырылған. ШҚИ затта таралғанда осы пайда болатын

әртүрлі әсерлер қарастырылған.

2.1 Ұзақтығы шектеулі қысқа импульстер сипаттамасы

Шектеулі қысқа импульстер (ШҚИ) жарық импульстерін әдетте сызықты емес оптиканың әдістерімен [4,5] алады, яғни мына өрістері жеткілікті мықты және классикалық сипаттамаға жол береді. Осындай көптеген фотондардан тұратын бос фотондар лазерлерінде өндірілетін ШҚИ үшін де әділетті. Сондықтан оптикалық ортада ШҚИ дамуын Максвеллдің классикалық теңдеулерімен сипаттауға болады.

2.2 Лазерлік импульстерді өндіру

Модаларлық соғуларға шартталған құбылыстар импульстік сәулеленудің қалыптасуына әкелетінін жоғарыда айтып кеткен болатынбыз. Осылайша, ұзақтығы 1 нс немесе одан да аз лазерлік сәулелену импульстері модалық құраушылары синхронизациясы және олардың таралу трассасында когерентті өзара әсерлесу есебінен қалыптасады.

Өте қысқа оптикалық импульстерді лазерде өндіруді бойлық модалар синхронизация көмегімен де жүзеге асыруға болады. Бойлық мода – ашық резонатордың айналары арасында тік тұрған электромагниттік толқын. Осы бекітілген ұштары шектегі тік тұрған толқынды еске салады. Егер айналар арасындағы қашықтық мысалы l -ге тең болса, онда моданың жиілігі $f_m = mc/2l$ c – жарық тездығы, m – бүтін сан).

Жиіліктері күшейту сияқты спектрлі жолағына түсетін модаларды резонатордың ішіне салынған белсенді зат қоздырады (1.10-сурет). Модалар интерференциясы нәтижесінде осы лазер резонаторынан шығатын оптикалық импульс қалыптасады. Егер бір ғана осы бойлық мода қоздырылса, онда біз монохроматтың ең үлкен дәрежесі бар сәулеленуді беретін бірмодалы лазермен айналысамыз. Өте қысқа импульстерді өндіру үшін үшін көпмодалы режим қолданылады. Осы бағытта лазерлік техника 1965 жылдан бері дами бастады. Осылайша, лазерлік импульсті $\Delta f = 2^{\circ}l$ аралық жиілігі бойынша бөлінген, монохроматты толқындардың (бойлық модалардың) N жиынтығы түрінде келтіруге болады. Сонда резонатордың шығыс айнасындағы импульстік сәулеленудің электрлік өрісі үшін өрнек келесідей жазылады [3]:

$$m = N - 1$$

$$E = \sum^2 A_m \cos[(\omega_0 + \Delta\omega m)t + \varphi_m] \quad (2.1)$$

мұндағы $\omega_0 = 2\pi f_0$ – орташа жиілік (тасымалдаушы);

$\Delta\omega = 2\pi\Delta f$ – жиіліктер айырымы;

m – бүтін сан;

N – бойлық мода саны.

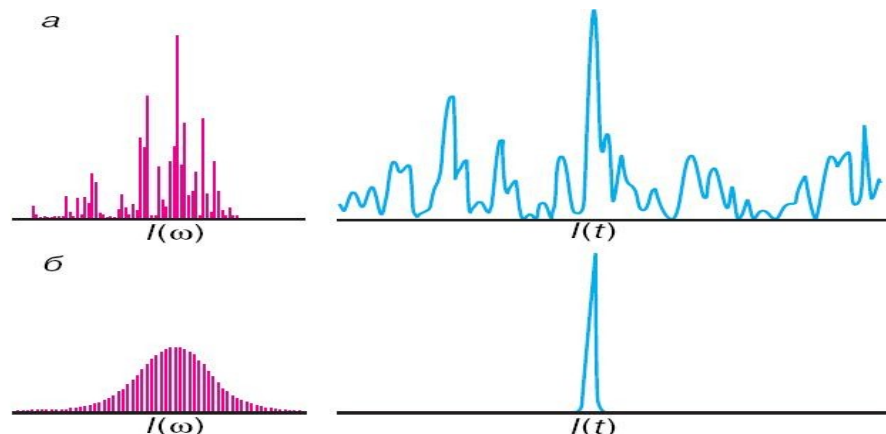
Модалар интерференциясы нәтижесі φ_m фазалар арасындағы қатынасқа тәуелді. Егер фазалардың кездейсоқ мәнді қабылдаса, онда лазерлік сәулеленудің бей-берекет амплитудалық модуляциясы бар болады (10а-сурет).

Егер барлық фазалар осы бір мәнді қабылдаса, мысалы, $\varphi_m = 0$, онда жағдай модалар синхронизациясымен байланысты болады. Ыңғайлық үшін модалар амплитудасын бірдей қылып ($A_m = E_0$), (1.6) қатарды қосындылауға болады және мына қарапайым өрнекті аламыз:

$$E = A \cos(\omega t), \quad A = E \sin N\Delta\omega t \operatorname{cosec} \frac{\Delta\omega}{2} \quad (2.2)$$

(2.4) талдауы бойлық модалар синхронизациясы бар лазер жеке моданың амплитудасынан N есе көп амплитудасы бар импульстер периодты тізбегін сәулелендіретінін көрсетеді (1.10б-сурет). Импульстер резонаторда бір импульстің толық өтуіне керекті $\Delta T = \frac{2l}{c}$ уақыт өткеннен кейін, бірінен соң бірі жүріп отырады. Импульс ұзақтығы $T = \frac{\Delta T}{N}$, яғни ол көршілес импульстер арасындағы аралықтан N есе аз болады.

Модалар синхронизациясын сондай-ақ электрооптикалық кристаллда жарық толқындарының фаза модуляциясы көмегімен оған айнымалы электр өрісін қосу арқылы жүзеге асыруға болады. Модалар синхронизациясы тағы да модааралық соғулар жиілігінде ашық резонатордың айналарының біреуінің дірілі кезінде болады. Ақырында, модалар синхронизациясын қатты оптикалық өрісте жарқырайтын (азырақ жұтады) заттары бар ұяшықты лазердің резонаторының ішіне салу көмегімен алуға болады. Сол кезде ең аз шығынмен ұяшық арқылы қозатын бойлық тік модаларды синфазды қосу кезінде пайда болатын өте қысқа импульстер өтеді.



Сурет 2.1 - Синхрондалмаған модалары бар лазер сәулеленуінің (а) және N=101 болғандағы модалардың толық синхронизация режиміндегі (б) спектрлері (сол жағында) және уақыттық жүрісі (оң жағында)

Ұзақтығы 100 пс өте қысқа импульстер олар да ғылыми зерттеулер мен әр алуан қосымшаларда үлкен қолданыстар тапты. Осы жерде айта кету керек нәрсе, қысқа импульстер қуаты да тығыздығы жоғары болады. Соңғы жағдайда оптикалық сәулеленудің басқа затқа әсері кезінде өте маңызды. Алайда, тез өтетін үрдістердің қатарын талдау субсекундтық және фемтосекундтық ұзақтығы бар, немесе одан да қысқа импульстерді де пайдалануды да қажет етеді. Лазерлерде мода синхронизациясы көмегімен осындай тапсырмаларды шешу мүмкін емес болғандықтан, пикосекундты, жарық импульстерін компрессиялау әдістері жасала басталды. Осы мақсат үшін де талшықты яғни жарық өткізгіштерде, дифракциялы торларда, призма және т.б. сияқты импульстік орталарды пайдалану керек екен.

Тағы бір мына ескерту орынды. Оптикалық импульстердің ұзақтығы аз болған сайын оның жиілік спектрі аз болады (монохроматтық дәрежесі азырақ). Осыдан қысқа импульстерді алу үшін де үлкен спектрлі сәулелену болу керек және сәулеленудің спектрлі шектелген импульс деп аталатын, яғни фазалық модуляциясы жоқ импульске түрлену механизмдерін тандап алу керек екені белгілі. Міне осы тапсырманы модар синхронизациясы мен импульстер компрессиясы кезінде шешіледі.

2.3 Интерференциялық ағын көмегімен мәлімет тарату

Бүгінгі мезетте интерференциялық құбылыстарды түсіндіру үшін «интерференциялық ағын» термині қолданылады.

Энергетикалық тұрғыдан, интерференция құбылысының мәні – үлкен кеңістікте бір уақытта таралатын екі немесе бірнеше когерентті толқындардың бір-бірі амплитудаларын өзара күшейтуі, әлсіретуі. Екі монохроматты когерентті толқындардың энергияларының ағынының орташа тығыздық векторы мына түрде жазылады:

$$S = S_1 + S_2 + S_{\text{int}}, S_j = \tau \operatorname{Re}(e_j \times h_j^*), \quad (2.3)$$

$$S_{\text{int}} = \tau \operatorname{Re}[(e_1 \times h_2^*) + (e_2 \times h_1^*)] \quad (2.4)$$

мұндағы S_j – әрбір оңаша толқынның энергия ағыны ($j=1,2$);

S_{int} – интерференциялық ағын (ИА);

$$e_j = Z_j a_j \exp[i(\omega t + \chi_j + \zeta)] \quad (2.5)$$

$$h_j = a_j \exp[i(\omega t + \chi_j)] \quad (2.6)$$

мұндағы a_j – амплитудалық коэффициенттер;
 Z_j – электрлік және магнит өрістер амплитудаларының қатынасы;

j – фазалық та қосылғыштардың координатасына тәуелділер, $j=1,2$;

χ_j – электрлік және магниттік өрістер құраушылары арасындағы фазалық ығысу.

Сондай-ақ әлсіз орталарда қалыптасқан интерференциялық өрісте оптикалық энергияның шығындары тек ақшыл жолақтар аймағында болатыны белгілі. Интерференцияның қадамы $a = 2\pi^{-2}$ ал интерференциялық жолақтардың орын ауыстыру тездігі $\vartheta = \Delta\omega k^{-2}$ құрайды. Мұндағылар, $k = k_1 - k_2$ – векторлық шамалар, k_1 және k_2 – интерференцияланатын сәулелердің толқындық векторлары. Осы кезде интерференциялық суреттің ең үлкендері топтық тездікпен орын ауыстырады.

Бөлек спектрлік осы құраушылардың толқындық векторлары бір-біріне параллель. Сондықтан спектрлі құраушылар үшін де (қысқа толқындарды қалыптастыру үшін) модааралық интервалы 10 МГц-ті құрайтын жұтылу сызығынан алыс ауадағы топтық тездігі фазалық тездікпен сәйкес келеді. Екі интерференциялаушы толқын үшін қосындылық толқындардың жанаушысы синусоидамен сипатталады, ал құраушылардың сандары көбейгенде интерференциялық жолақтардың ең үлкен жанындағы тар облыста толқын энергияларының жергілік жүйесі жүреді.

Сәулелену ағындарының әртүрлі жиілікте соқтығысуы лазер резонаторында тәрізді, таралу күрежолында да байқалады. Резонатордың модааралық интервалын $\Delta f = c$ қатынасынан анықтауға болады, мұндағы, $L - 2L$ резонатор ұзындықтары, c – жарық жылдамдығы. Бір жиіліктік режимде лазер өндіруші сызығының теориялық жарты ені (бір модальдық құраушының сызығы ені):

$$\Delta\nu = 2\pi h\nu (\Delta\vartheta_p) p \quad (2.7)$$

мұндағы p – лазер қуат мөлшері;

$\Delta\vartheta_p = \vartheta$ – резонатор өткізу жолағының жарты ені;

$Q = 2\pi L\lambda(1 - r_1 r_2)$ резонатор сапалығы;

мұндағы r_1 және r_2 – резонатор айналарының шағылысу коэффициенттері;

λ – сәулеленудің толқын ұзындығы.

Көлденең модалардың кең таралу бұрыштары:

$$\Theta_m = m\lambda L \quad (2.9)$$

мұндағы $m=1,2,3 \dots$ модалық құраушының нөмірі.

Лазердің оптикалық остеріне бұрышпен кең таралатын көлденең модалар ашық трассалар бойынша біраз жер өтіп барып, шоқтан шығып кетеді. $L=1,0$ м және сәулеленудің толқын ұзындығы $0,8$ мкм үшін осы ара 10 м-ден аз және осы топтық жылдамдықтың (интерференциялық жолақтардың орын ауыстыру тездігі) жарық жылдамдығымен сәйкес келуі туралы қорытындыны растайды [11].

2.4 Оптикалық сәулеленің атмосферада таралуы. Электромагнитті толқындар

Бүгінгі оптикада, атмосфера оптикасын қоса алғанда, негізінде сәулеленуді әрі электромагниттік толқындардың, әрі фотондар ағыны ретінде қарастыруға болады. Электромагниттік (ЭМ) толқын көлденең және вакуумда жарық жылдамдығымен таралатын сияқты электр E_r және магниттік H_r өрістердің өзара ортогональ таралуы болып табылады.

ЭМ толқын ұзындығы ұзындықтың өлшем бірлігінде өлшенеді, әдетте атмосфералық оптикада осы микрометр, нанометр, ангстерм ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$). Оптикалық аумақтың толқын жиілігі өте үлкен, сондықтан оларды өте сирек қолданады. Көбінесе спектрлік сипаттамалары толқын ұзындығы кері шамалар – толқындық сандар түрінде жазады.

Бір ғана жиілігі (толқын ұзындығы) бар электромагниттік сәулеленуді монохроматтық деп аталады. Толқын ұзындығына (жиілігіне) қарай электромагниттік толқындарды диапазон қатарына бөледі – 2.1-кестені қараңыз.

Кесте 2.1 - Электромагниттік сәулеленудің спектрінің диапазондары

Диапазон	Сипаттамалы толқын ұзындығы, мкм	Сипаттамалы жиілік, Гц
Гамма сәулесі	10^{-5}	$3 \cdot 10^{19}$
Рентгендік сәуле	10^{-2}	$3 \cdot 10^{16}$
Ультракүлгін толқын	$3 \cdot 10^{-1}$	10^{15}
Көрінетін диапазон	$0,4-0,7$	$(4,3 - 7,5) \cdot 10^{14}$
Жақын (ЖИК)	$1-4$	$(3 - 0,8) \cdot 10^{14}$
Орта (ОИК)	$4-50$	10^{14}
Теледидарлық толқын	10^7	$3 \cdot 10^7$

Атмосфераның бүгінгі оптикасы осы ультракүлгін (УК) диапазоннан бастап радиотолқынды диапазондағы ЭМ толқындарға дейінгі олардың таралуын, өзгеруін, сондай-ақ өндіруін зерттейді. 1.1-кестеде көрсетілген спектрден бөлек осы атмосфералық оптикада электромагниттік сәулеленудің барлық спектрін күндік және жылулық облысқа бөлу қалыптасқан. Күндік облыс өзіне ультракүлгін, көрінетін және жақын инфрақызыл (ЖИК) диапазондарын қосады. Осы аймақтарда күндізгі мезетте күннің сәулелену энергиясы атмосфераның және оның бетінің өзінің сәулелену энергиясынан (жеке алғанда, жылулық) асып түседі. Жылулық аймақ ЖИК-тен радиотолқынға дейінгі аймақта жатады. Мұнда, басқаша, жылулық сәулеленудің энергиясы (күндіз және, әрине, түнде) күндізгі сыңарынан асып түседі. Жердің атмосферасында күндізгі және жылулық сәулеленудің энергиясы шамамен бірдей болатын спектрлік аймақ 3-4 мкм жақта жатады. Басқа ғаламшарлар үшін осы шекара Күннен қашықтықтарына және ғаламшардың радиационды температурасына қарай қысқа толқынды және ұзын толқынды аймаққа ығысқан. Күндік және жылулық сәулелену электромагниттік сәулеленудің барлық аймағында жататын белгілей кету керек, алайда сәулеленудің өрісін қалыптастыру үрдісінде олардың рөлі әртүрлі [12].

Фемтосекундты лазерлер

Өте қысқа импульстер лазерлері, УҚИ (ШҚИ) лазерлері, фемтосекунд лазерлері — лазерлік сәулеленудің импульстерін өндіруге қабілетті оптикалық кванттық өндіргіштер.

Жалпы жағдайда ультрақысқа лазерлік импульстер болып 100 пикосекундтен қысқа импульстерді атаймыз. Алайда, жаңа жүйелерді құрғаннан кейін 1 пикосекундтен аз импульстерді құру облысындағы зерттеулер маңызды болды, себебі ұзақтықтары 50 пикосекунд құрайтын импульстерді талдауды лазерлік диод негізіндегі арзан жүйелер пайдаланумен жетуге болады.

Қазіргі кездегі бар ультрақысқа импульстер лазерлері ұзақтығы 5 фемтосекунд импульстер зерттеліп жатыр.

Фемтосекундты осы лазерлік импульстер алғаш рет шынайы мезетте тез өтетін элементарлы молекулалық процестердің серпінділігін бақылауға және химиялық қосылыстардың әр түрлі кезеңдерінде молекулалар мен атом топтарының лездік бейнелерін түсіріп алуға, сондай-ақ оларды басқаруға мүмкіндік берді. Фемтосекундты осы лазерлік импульстер қамтамасыз ететін уақыттық рұқсат кез келген, тіпті молекулалық динамиканың ең тез процестерін зерттеуге жеткілікті болып табылады. Алайда, атомдар ішіндегі фотонды жүйелердің серпінділігін сараптау үшін бір фемтосекундтан аз – аттосекундты импульстерді ($1 \text{ ас} = 10^{-18} \text{ с}$) пайдалануға тура келеді. Аттосекундты импульстердің өндірілуі ХХІ ғасырдың басында жоғары қарқындылықты шектеулі қысқа да лазерлік импульстердің сызықсыз-оптикалық әсерлесуі негізінде ғана мүмкін болды. Ұзындығы 12 ас ең қысқа

импульс 2010 жылы Кокель және Гребинг атты ғалымдармен алынған болатын [13].

Жалпы мәліметтер. Осындай лазерлердің сипаттамасы:

1 Импульстің ұзақтығы (электрлік индукцияның векторы өзінің мәнін импульс ұзақтығы кезінде бірнеше рет қана өзгертіп үлгереді);

2 Импульстің әрекеті кезінде (аз ұзақтық есебінен) жоғары орташа қарқындылық;

3 Сәулеленудің ең үлкен жолағы (толқын ұзындығы бірден жүзге дейін нанометр);

4 Жоғары уақыттық когеренттік (импульстердің тізбегі);

5 Үлкеністіктік когеренттік.

Жұмыс жасау принциптері. УҚИ лазерлері жұмыс істеу принципі лазерлік резонатордағы модалар синхронизациясына негізделген. УҚИ өндірудің екі нұсқасы бар: біріншісі – өндіру барлық модаларда кездейсоқ фаза және қарқындылықпен жүреді, сонан кейін електен өткізу, нәтижесінде барлық модалар байланысады (резонаторда белгілі жиіліктері және қарқындылықтары бар модалар ғана қалады), осылайша резонаторда өте қысқа ұзақтығы бар бір импульс қалады; екіншісі – өндіру бір модада басталады, алайда сонан соң модаларлық әсерлесуден кейін өндіру керекті фаза айырымы және салыстырмалы қарқындылығы бар модаларда қоза бастайды, қорытындысында сурет бірінші нұсқадағыдай болып шығады. Импульсті пішіндеу әдетте резонатордың 10 өткелінен кейін болады. Тағы да 10-20 өткелден кейін импульстерді қысқарту және күшейту үрдісі жүреді, аяғында тұрақты УҚИ алынады. Импульстерді қысқарту, күшейту үрдісінде сызықты емес процесстер үлкен рөл атқарады. Осылай алдыңғы бөлігі жарықтандырғыш жұтқышты өткеннен кейін (белсенді ортада өзін-өзі фокустау (Керр линзасы) және тек қана импульстің «қарқынды» бөлігін алу нәтижесінде) тіке болады. Артқы бөлігі қоныстану инверсиясы импульс белсенді ортаны өту уақытында қалпына келтірмей үлгермеу нәтижесінде қысқарады. Күшейту және қысқарту үрдістері тиімдірек болу үшін белсенді ортаны жұқарақ, ал толтыру қуатын көбірек етіп (алайда импульстерді тұрақты өндірудің шегінен шықпай-ақ) алу керек.

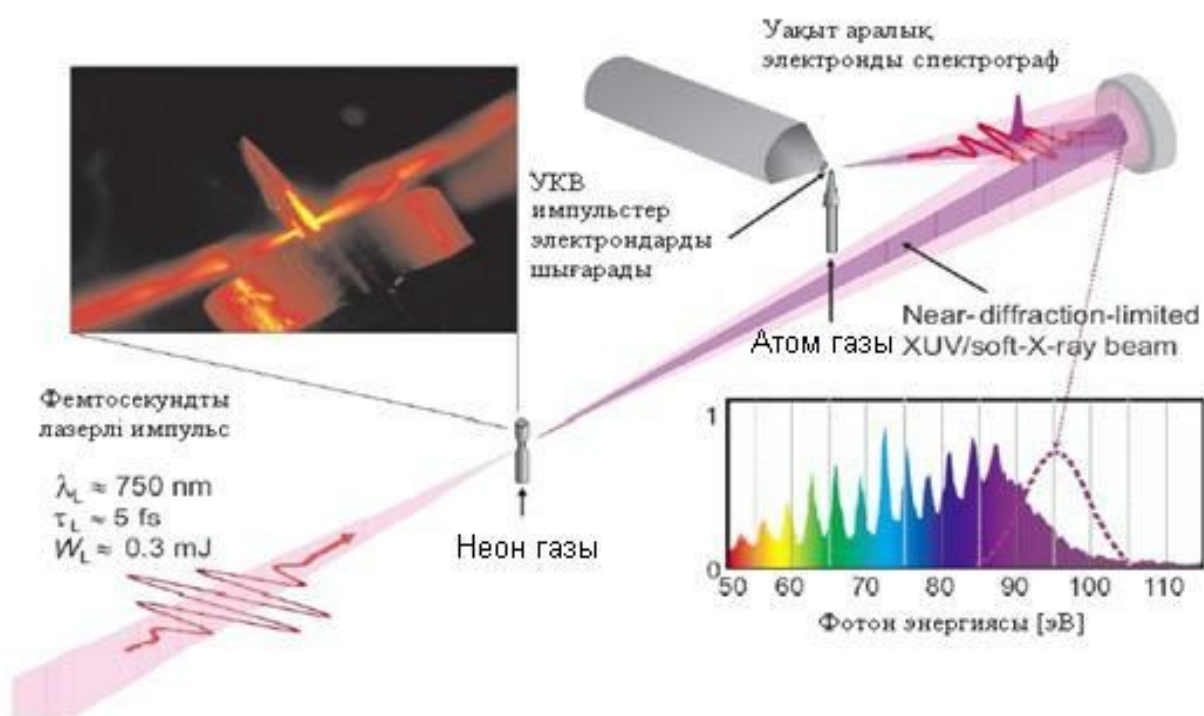
Модаларды синхронизациялаудың активті және пассивті түрі бар. Осылай, модаларды активті синхронизациялау жағдайында модаларды тікелей синхронизациялаушы (синхронды толтыру, немесе беріктілік модуляциясы – Q-модуляция режиміндегі негізгі модулятор) арнайы құрылғы керек, себебі пассивті синхронизация кезінде де осы құрылымның ерекшелігіне қарай автоматты түрде жүреді.

Беріктілік модуляциясы – лазердің жұмысының импульсті режимін алу үшін қолданылатын әдіс. Беріктілік модуляциясын пайдалану кезінде лазер импульсті режимде де жұмыс жасайды. Әдістің негізі – толтыру кезінде оптикалық резонатордың қасиеттерін әдейілеп «төмендетіп», лазерге сәулеленуге жол бермейді. Осылайша сәулеленуге қуат шығындалмайды және белсенді ортаның энергетикалық деңгейлерінің қоныстанушылары инверсиясының жоғары деңгейін жасауға мүмкіншілік туады. Ары қарай

резонатордың қасиеттерін тез «жаксартарды» және барлық жиналған энергия қысқа, қуатты импульстер түрінде де жүзеге асырылады [14].

Активті синхронизациясы бар лазерлер синхронизацияның құрылғыларын дайындаудың қиыншылығы кесірінен бүгінгі мезетте қолданылмайды. Пассивті синхронизациясы бар лазерде өндірудің екі шегі бар. Біріншісі – қарапайым, УҚИ лазерінің бірінші шегінен асып кететін де толтыру кезінде қарапайым қайта құрылатын лазер секілді жұмыс жасайды. Екінші шектің толтыру қуатын асып кеткенде УҚИ-ті қалыптастыруға қолайлы жағдайлар туғызылады, алайда өндіру бастау үшін қосымша әсерлесу керек болуы мүмкін, мысалы тез қозғалыс немесе ТЖД (Топтық тездік дисперсиясы) компенсатор соққысы, әдетте осы ары қарай УҚИ қалыптасуы жүретін шуылдық алып тастауды пайда етуге үшін керек.

2.2-суретте аттосекундты импульстерді өндірудің оптикалық сұлбасы көрсетілген. Ұзақтығы 5 фс, энергиясы 0,3 мДж фаза бойынша тұрақталған фемтосекундты импульс қысымы 160 мбар неонмен толтырылған газдық түтікке фокусталады (фокусталанған импульстің қарқындылығы $7 \cdot 10^{14}$ Вт/см²).



Сурет 2.2 - Импульстерді өндірудің оптикалық сұлбасы

Қарқынды лазерлі сәулеленудің де неон атомдарымен әсерлесуі негізгі жиіліктің жоғары гармоникаларының өндірісіне әкеледі. Көп қабатты айна ультракүлгін вакуумның фотондарын сүзгілейді, фемтосекундты және аттосекундты импульстер арасындағы белгіленген кідірісті енгізеді және екі сәулені де келесі нысанаға фокустайды. Нысана ультракүлгін вакуумның фотондары лазерлік импульс бар кезде фотонды шығарып тастайтын атомдық

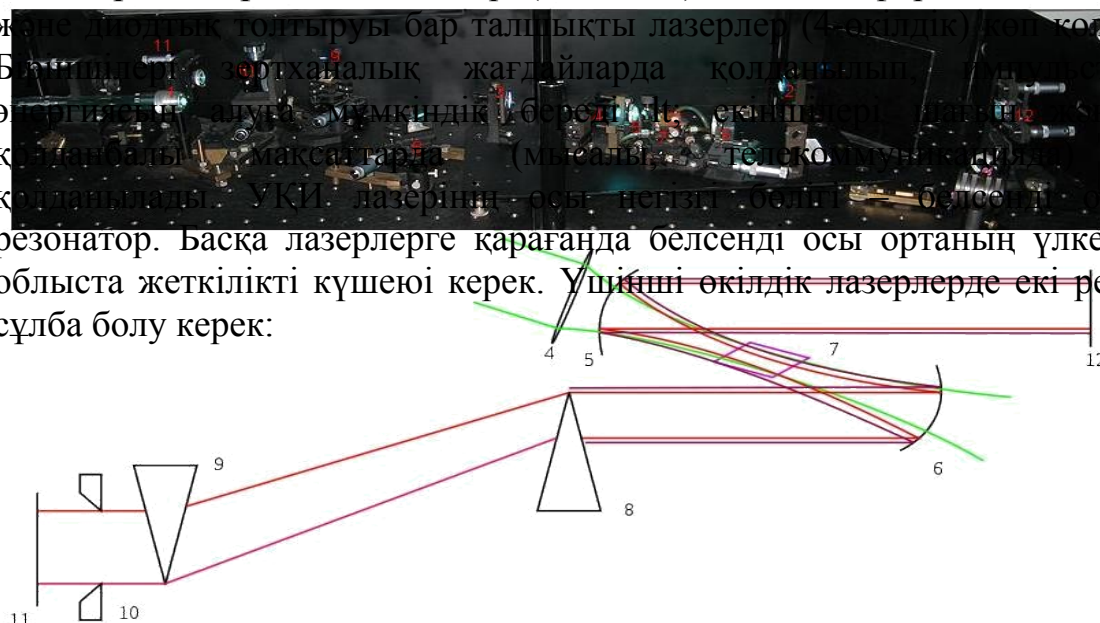
газ ағынынан тұрады. Фотонның энергия бойынша таралуы импульс ұзақтығымен анықталады. Фотонның энергия бойынша таралуын уақыт аралық фотондарды спектрограф көмегімен талдай отырып, импульстің ұзақтығын анықтауға болады.

Қақтығысып қалатын импульстері бар бояғыш негізіндегі лазер. Бояғыш лазерлер – белсенді орта ретінде қолданылатын органикалық бояғыш ерітіндісі қолданатын лазерлер. Олардың сәулеленуі жақын жатқан спектрдің ультракүлгін, көрінетін, инфрақызыл аумақтарын қайта жауып қалады. Бояғыштар негізіндегі лазерлер толқын ұзындығын өзгертуге болатын лазерлерді құру үшін қолданылады. Титан-сапфирі лазерлерінің пайда болуына дейін олар жарықтың пико- және фемтосекундты импульстерін өндіру үшін қоланылған.

2.6 Титан-сапфирлі лазерлер

Титан-сапфирлі лазер (Ti:Sapphire лазер, Ti:Sa лазер) — өндіру жолағы үлкен (700—1100 нм) лазерлер. Титан-сапфирлі лазер белсенді ортасы сапфирдің монокристаллы мен Ti^{3+} иондары қоспасынан тұратын қысқа (2—10 мм) (дисктің) өзек түрінде де орындалады. Қоспа қоюлылығы толтыру сәулеленуінің 90% дерлігі жұтылады деген шарт бойынша таңдалады. Күшейтудің ең үлкен жолағы лазерлік өндірунің толқын ұзындығы немесе өте қысқа импульстердің генерациясының қайта құрылуын жүзеге асырады [15].

Бүгінгі күні линзасы бар (3-өкілдік) титан-сапфир негізіндегі лазерлер және диодтық толтыруы бар талшықты лазерлер (4-өкілдік) көп қолданылады. Бөлімдері зертханалық жағдайларда қолданылып, олардың үлкен энергиясын алуға мүмкіндік береді. Бірақ екіншісі ағылшынға үнемді, қолданылып, максималды (мысалы, телекоммуникация) белсенді қолданылады. УКИ лазерінің осы негізгі бөлігі белсенді ортасы бар резонатор. Басқа лазерлерге қарағанда белсенді осы ортаның үлкен спектрлі облыста жеткілікті күшеюі керек. Үшінші өкілдік лазерлерде екі резонаторлы сұлба болу керек:



Сурет 2.3 - Үшінші өкілдік лазер

2.3-суретте жоғарғысында үшінші өкілдік лазердің – керрлік линза есебіндегі модалардың пассивті синхронизациясы бар титан-сапфирлі лазер. Төменгі суретте осы лазердің сұлбасы салынған (нөмірлеу сәйкес келеді). Осы конструкция Завойский атындағы Казань Физика-Техникалық Институттың Молекулярлы Фотохимия зертханасында орнатылған. Осы құрылғыда ұзақтығы 50-60 фс және жиілігі 80 МГц, ал орталық импульсі 780—800 нм аумағында жатқан және жарты ені 20 нм-ге тең УҚИ импульстер тізбегі алынған. Басқа зертханаларда осындай типті құрылғыларда ұзақтығы 5,4 фс-ке дейінгі импульстер алынған болатын (жарық толқынының екі периодынан аз).

Осы суретте УҚИ лазердің барлық негізгі элементтері көрсетілген:

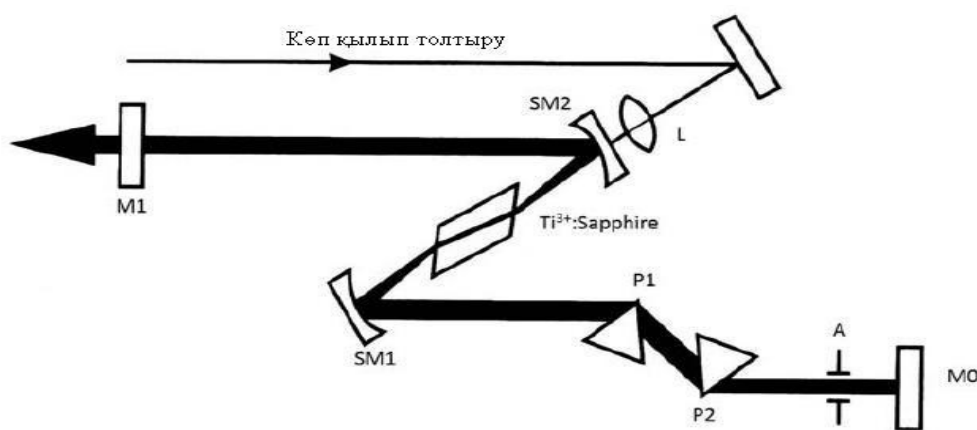
- 1 – Толтыру лазерінің шығысы. Толтыру лазері ретінде аргонды лазерлер қолданылады;
- 2 – Жазық айналар;
- 3 – Екінші жазық айналар;
- 4 – Линзалар
- 5 – Ішкі резонатордың (ойыс) мөлдір айнасы (толтыруды сәулелендіру үшін);
- 6 – Ішкі резонатордың саңырау айнасы (ойыс);
- 7 – Белсенді орта (Ті: сапфир).
- 8 – топтық тездық дисперсиясы компенсаторының бірінші призмасы;
- 9 – ТЖД компенсаторының екінші призмасы;
- 10 – Диафрагма (Толқын ұзындығының қайта құру элементі);
- 11 – Сыртқы резонатордың саңырау айнасы (жазық);
- 12- Сыртқы резонатордың жартылай мөлдір айнасы (жазық)

Сұлбада лазердің барлық негізгі элементтері де көрсетілген: қалыптасқан шоқ (ашық қызыл) және өте қысқа импульстерді де пішіндеуге қатысатын әлсіз (күңгірт қызыл) шоқ, ТЖД призмалық компенсаторы да, толқын ұзындығы бойынша қайта құру үшін диафрагма да, ішкі және сыртқы резонатор, толтыру (жасыл). Сызықсыз оптикада қолданылатын барлық оптика міндетті түрде жарықталғанын айта кету керек. Ал қарапайым металл айналардың орнына диэлектрлік қолданылады. Бұдан басқа, одан да қысқа импульстерді алу үшін арнайы, «жиілігі баяу өзгертін импульстер» айналары қолданылады.

Титан-сапфирдің кристаллы негізіндегі фемтосекундты лазерлер көрінетін және таяу инфрақызыл аумағында өндіріледі. Титан-сапфир

кристалдарының ұзақтығы 5 фс-ке дейінгі импульстерді өндіруге мүмкіндік беретін ең үлкен спектрлі күшейту жолағы (600-1100 нм) бар. Сондай-ақ титан-сапфир кристалдарының шағын көлемді осы лазерлік жүйелерден тұратын импульстерде жеткілікті жоғары энергия алуға мүмкіндік беретін қанығудың жоғары шегі бар. Ұзақтығы 7 фс-тен аз Femtolasers (Австрия) фирмасының титан-сапфирлі лазерлері бағасы жағынан қол жетімді.

2.4-суретте титан-сапфир кристалындағы фемтосекундты лазердің оптикалық сұлбасы берілген. Аз көлемде инверсті импульстің қоныстанушылығын құруға керекті қуаттың жоғары тығыздығын алу үшін толтыру сәулеленуі айнадан шағылысып, қысқа фокусты линза L көмегімен сфералық дихроизмдік айналар SM2 арқылы титан-сапфирлі кристалға фокусталады. (Дихроизм – оптикалық ось бойымен және оған перпендикуляр бойынша өтетін ақ жарықта бір осьті кристалдың әр алуан түске боялуы).



Сурет 2.4 - Титан-сапфирлі лазердің оптикалық сұлбасы

Резонаторда шығындарды да азайту үшін белсенді элементтің жақтаулары SM1-SM2 айналарында шоқтардың көлбеуімен шығынын өтейтін резонатордың астигматизміне (астигматизм – суреттің өзгеруіне әкелетін сынатын ортаның ауытқуы) әкелетін Брюстер бұрышымен орналастырылған. SM1-SM2 сфералық айналары белсенді ортаның да аз каустикасымен резонатор модасын пішіндейді. Шоқтың белсенді ортасындағы аз диаметрі керрлік линзаның пішіндеуі және функциялануына керек жоғары қарқындылыққа және толтырудың аз қуаты бар инверсті қоныстануға жету үшін керек. Лазер резонаторы SM1-SM2, Мо-M1 айналар жүйелерімен құрылған.

Титан-сапфир кристалындағы импульстердің фазалық өзін-өзі модуляциялауы және кристалл затының дисперсиясымен енгізілетін топтық тездықтың дисперсиясының орнын толтыру үшін лазер резонаторының да ішіне ең аз ауытқу бұрышымен орналасқан P1-P2 балқытылған кварцті екі призмадан тұратын дисперсияны, құбылысты өтемдеуіш орнатылған. Призмалық дисперсияны өтемдеуіштің теріс таңбалы топтық жылдамдықтың

дисперсиясы бар. Сфералық айналар арасындағы арақашықтықты кейбір тұрақсыздықты енгізгенде, мысалы, Р2 призмасын оның осі бойынша шұғыл орнын ауыстырғанда, модалар синхронизациясы режимі пайда болатындай етіп, таңдау керек. Осыдан кейін Р2 призмасының бір қалыпты орын ауыстыруымен импульстің ең аз немесе керекті ұзақтығына қол жеткіземіз. Мо резонаторының саңырау айнасының алдындағы А саңылауы толқын ұзындығы бойынша өндіруін қайта құру үшін, сондай ақ модалар синхронизациясы үшін қатты диафрагма ретінде қолданылуы мүмкін [16].

Талшықты лазер — оптикалық талшықтың негізгі элементтері болып табылатын лазер, белсенді орта немесе резонаторлар. Толық талшықты жүзеге асыру кезінде мұндай лазер бүтін талшықты, ал талшықты және лазер құрылымының басқа да элементтерін аралас қолданғанда ол талшықты-дискретті немесе аралас деп атайды. Олардың басты артықшылықтары — сәулеленудің ең жоғары оптикалық сапасы, шағын көлемі және талшықты желілерге енгізу мүмкіндігі де болып табылады.

Талшықты лазердің қолданылуына қарай оның көптеген түрлері бар. Оларды дайындауға осы Фабри-Перо резонаторы және сақиналы резонаторлар қоланылады. Арнайы әдістермен бір поляризациялы, өте қысқа импульстер және тағы басқа лазер жасауға болады. Барлық талшықты лазерлерде оптикалық толтыруды жүзеге асыратын бір немесе бірнеше толқын өткізгіштерден тұратын оптикалық талшықтардың арнайы түрлері қолданылады.

Бүгінгі уақытта дүние жүзіндегі коммерциялық фирмалардың көбісі пайдалану аясының көп бөлігінде титан-сапфирлі лазерлерді ығыстырып шығарып жатқан 100 фс-тен 1 пс-ке дейін ұзақтығы бар талшықты лазерлерді шығарады. Ең көп тараған фемтосекундты талшықты лазер болып Er және Yb лазерлері табылады, олардың өндіретін толқын ұзындықтары сәйкесінше 1.55 мкм және 1.05 мкм. Титан-сапфир лазермен салыстырғанда олардың келесі артықшылықтары бар:

- көлемі шағын;
- бағасы арзан;
- 1,55 мкм толқын ұзындығындағы генерация оптикалық байланыс арналарының мөлдірлік терезесіне түседі.

Жұмыс істеу принципі. Жалпы сұлбасы. Талшықты лазер өндіру жүретін жарық өткізгіштен, толтыру модулінен (әдетте, үлкен жолақты жарық өткізгіштер немесе лазерлік диодтар) және резонаторлардан тұрады. Жарық өткізгіш белсенді заттан (қоспаланған оптикалық талшық — қарапайым оптикалық толқын өткізгіштерге де қарағанда қабықшасы жоқ өзекшеден тұрады) және толтыру толқын өткізгішінен тұрады [18].

Резонатордың құрылымы ол техникалық тапсырыс бойынша анықталады, алайда ең үлкен таралған класстары мыналар: Фабри-Перо типті резонаторлар және сақиналы резонаторлар [19].

Өндірісте шығыс қуатын көтеру үшін ол бірнеше лазерді бір құрылғыға біріктіреді.

2.5-суретте толықтай талшықты фемтосекундты эрбийлі лазердің суреті, ал 1.15-суретте талшықты лазердің қарапайым сұлбасы көрсетілген.

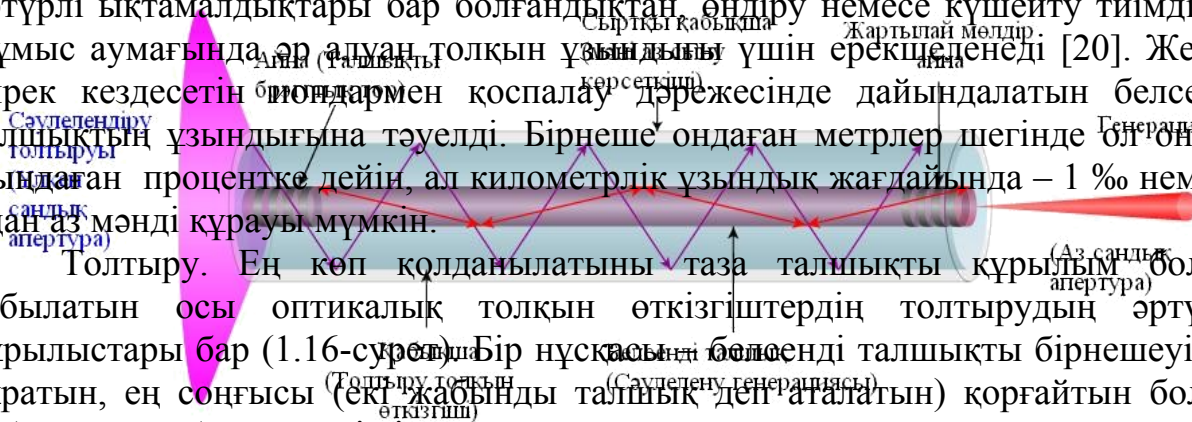


Сурет 2.5 - Толықтай талшықты фемтосекундты эрбийлі лазер
1 – белсенді талшық; 2 – Брэгг айналары; 3 – толтыру блогы

Сурет 2.6 - Талшықты лазердің қарапайым сұлбасы

Белсенді зат. Оптикалық талшықтың негізгі материалы болып табылатын өте таза балқытылған кварцтың мөлдірлігі өте жоғары болуы керек. Кварцқа қоспалаумен енгізілетін қоспалар оны жұтқыш ортаға айналдырады. Сәулеленуге керекті жиілікке және толтырудың аз шекті қуатына қарай отырып, қоспалауды лантаноид топтарының жерде сирек кездесетін элементтер арқылы жасалады. Талшықтың үлкен таралған түрлерінің бірі – жұмыс диапазоны 1530—1565 нм толқын ұзындығында жатқан, лазерлік және күшейткіш жүйелерде қолданылатын эрбийлі талшықтар болып табылады. Метатұрақты деңгейлердің қосымша деңгейлерінен негізгі деңгейлерге өтуінің әртүрлі ықтамалдықты бар болғандықтан, өндіру немесе күшейту тиімділігі жұмыс аумағында әр алуан толқын ұзындығы үшін ерекшеленеді [20]. Жерде сирек кездесетін биондармен қоспалау дәрежесінде дайындалатын белсенді талшықтың ұзындығына тәуелді. Бірнеше ондаған метрлер шегінде ол оннан мыңдаған процентке дейін, ал километрлік ұзындық жағдайында – 1 % немесе одан аз мәнді құрауы мүмкін.

Толтыру. Ең көп қолданылатыны таза талшықты құрылым болып табылатын осы оптикалық толқын өткізгіштердің толтырудың әртүрлі құрылыстары бар (1.16-сурет). Бір нұсқасы белсенді талшықты бірнешеуінен тұратын, ең соңғысы (екі жабынды талшық деп аталатын) қорғайтын болып табылатын қабықшалар ішіне орналастырылады.



Сурет 2.7 - Екі жабынды талшық негізіндегі лазердің толтыру сұлбасы

Бірінші қабықшасы диаметрі жүздеген микрометр таза кварцтан, ал екіншісі – сыну көрсеткіші кварцтыкіне қарағанда өте аз болып таңдалатын полимерлі материалдан да жасалады. Осылайша, бірінші және екінші қабықша үлкен көлденең қимасы мен толтыру сәулесін жіберетін сандық апертурасы бар көпмодалы толқындық өткізгішті құрайды. Жерде сирек кездесетін элементтердің иондарының тиімді қозуы белсенді өзекшенің және толтыру толқын өткізгішінің диаметрін таңдаумен жүзеге асырылады. Осындай технологиямен 100 Вт-қа дейін де жететін шығыс қуатын алуға мүмкіндік береді.

Толтырудың үлкен қуатына GTWave технологиясының көмегімен көмегімен жетуге болады. Бір сыртқы қабықшаға біреуі белсенді орта және басқалары – толтыру толқын өткізгіш болып табылатын осы толқын өткізгіштің бірнеше өзекшелері кіргізіледі. Толтыру белсенді ортаға оның қабырғалары арқылы өтетін эванесцентті өрісі көмегімен жүзеге асырылады. Технологияның ерекшелігі – толқын өткізгішінің әрқайсысының екі жағы арқылы толтырудың сәулеленуін енгізу мүмкіндігі және WDM-тармақтағышының керек еместігі болып табылады.

Толтырудың рұқсат қуатын сәулеленудің шектік қуаты затты бұзылуынсыз сақтайтын етіп оны бірлік ауданға сәйкес шектейді. Таза кремний үшін ол 10^{10} Вт/см²-ті құрайды да (1 мкм толқын ұзындығындағы ұзақтығы 1 нс импульс үшін 22 Дж/см²). Осылай, қабықша диаметрі 8 мкм оптикалық талшық үшін толтырудың да қуатының жоғарғы шегі 5 кВт-қа жуық мәнді құрайды [21].

Фабри-Перо резонаторлары. Фабри-Перо интерферометрі негізіндегі резонаторлар ең үлкен таралғандардың бірі болып табылады (1.17-сурет). Олардың арасындағы айырмашылығы резонатордың айналарын құру әдісіне негізделген. Бір ось бойында, параллель және бір-біріне қаратылып орналастырылған екі айна арасында резонансты тік оптикалық толқын қалыптасады. Лазерлерде айналардың біреуі ғана осы бағытта сәулелендіруді жіберу үшін өткізуі жоғарырақ етіп жасалады [22].

Сурет 2.8 - Фабри-Перо оптикалық резонаторлардың түрлері
 1- Жазық-параллель; 2 – Шоғырланған; 3 – Жартылай сфералық; 4 –
 Ортақ фокусы бар; 5 – Дөңес-ойыс

Диэлектрлік айналсы бар резонатор. Алғашқы талшықты лазерлерде Фабри-Перо резонаторларын құру үшін 1,088 мкм генерация толқын ұзындығында жоғары шағылысу коэффициентін сақтай отырып, 0,82 мкм толтырудың толқын ұзындығында диэлектрлік айналарды мөлдір етіп құруға болатындықтан қолданылған (Nd^{3+} ионмен қоспаланған талшық қолданылған лазер параметрлері осындай). Басында талшық айналар арасында орналасты, бірақ мұндай құрылымды юстирлеу қиын болды (юстирлеу – бөлшектері мен түйіндерінің дұрыс орналасуы мен өзара әрекеттестігін орнатудағы құралдар мен механизмдерді тексеру мен жөндеу). Осы мәселені бөлшектеп шешу үшін талшықтың жан-жағына да диэлектрлік айналарды қондыру, алайда осы олардың толтырудың қуатты фокусталған осы сәулесімен зақымдануының ықтималдығын жоғарылататын және оптикалық талшықтың 3-4 жақтарын өңдеуге деген талаптарын қатайтады. Айналар қорғау кейде WDM-тармақтағышымен шешілетін.

Талшық брэггты торды қолданылуы бар резонатор. Оптикалық талшықтың ішіндегі резонаторлар талшықшілік брэггтық торлардың жұбымен – модульденген сыну көрсеткіші бар құрылымды құрылатын оптикалық толқын өткізгіштің бөліктерінде де құрастырылады. 1.18-суретте талшықты лазерге арналған екі әртүрлі оптоталшық көрсетілген: оң жағындағы және сол жағындағы осы оптоталшықтардың құрылысы көрініп тұрғандай әр алуан. Өзгертін сыну көрсеткіші бар осы бөліктер толқын өткізгіштің осіне перпендикуляр орналасады.

1 – Жерде сирек кездесетін иондармен қоспаланған өзекшелер; 2 – Толтыру толқын өткізгіштері; 3 – Жалпы қабықшасы; 4 – Қорғаушы қабықшасы

Сурет 2.9 - Талшықты лазерлерге арналған екі әртүрлі типті оптоалшық

Мұндай құрылымнан шағылысу мына толқын ұзындығында жүреді:

$$\lambda_B = n_{eff} \Lambda_B \quad (2.11)$$

мұндағы n_{eff} — негізгі моданың тиімді сыну көрсеткіші;

Λ_B — тор периоды.

Шағылысу сипаттамасы (толық немесе бөлініп) оның параметрлеріне тәуелді. Шағылысудың спектр ендері штрихтің саны көп кезде шағылысу коэффициентімен келесі қатынаспен байланысқан байланыс коэффициентіне k пропорционал болады:

$$R = \tanh^2 kL \quad (2.12)$$

мұндағы L — тор ұзындығы.

Тәжірибеде талшық ішіндегі брэггтық тордың өзгешелеу параметрлері бар, себебі оның пайда болуы тордың орналасқан жерінде тиімді сыну көрсеткішін, осылайша оның резонансты толқын ұзындығын өзгертеді. Талшық арасындағы торлар үшін жоғары температура қауіпті болып табылады. Алайда жалпы алғанда, тордың температурасы оны жасау әдісіне және талшықтың материалына тәуелді, критикалық температуралар 300—600 С аумағында жатады. Брэгг тордың жиілік бойынша таңдауы генерацияның тар жиіліктік жолағы бар бір модада жұмыс істейтін лазерді алуға мүмкіндік береді. Талшықты МКШ лазерлерде кейде шашыраудың көбірек ретіне жету үшін әртүрлі толқын ұзындықтары үшін осы брэгг торларының бір жұптан көбірек жұбын құрайды (шашыраудың әрбір келесі реті фотондардың толқын ұзындығын өзгертеді, осылайша толқын ұзындықтың керекті мәніне жетуге мүмкіндік береді).

Сақиналы резонаторлар. Ол – жарық бір бағытта тұйықталған аймақ бойынша таралатын оптикалық резонаторлар. Үлкен көлемді сақиналы резонаторлар үш немесе одан да көп айналардан тұрады, жарық олардың әрқайсысынан толық айналыс жасай отырып, тізбектеліп шағылысады. Сақиналы резонаторлар лазерлік гироскоптар мен лазерлерде үлкен қолданыс тапқан.

Талшықты лазерде толтырудың сәулеленуін енгізу мен генерацияланатын сәулеленуді шығару үшін WDM-тармақтағышы бар сақинаға тұйықталған осы оптикалық талшықтың түрі бар талшықты сақиналы резонаторлардың арнайы

құрылыстарын қолданады.

Сақиналы резонаторлардың қарапайым құрылысы – белсенді талшығы бар WDM-тармақтағышын қосу болып табылады. Талшықты сақиналы резонаторлардың ерекшеліктері – кейбір резонанстық жиіліктерді санамағанда, жарықты жиілікке тәуелсіз бір ғана бағытта өткізу болып табылады.

Мұндай резонаторда фазаның ауысуы келесі өрнекпен жазылады:

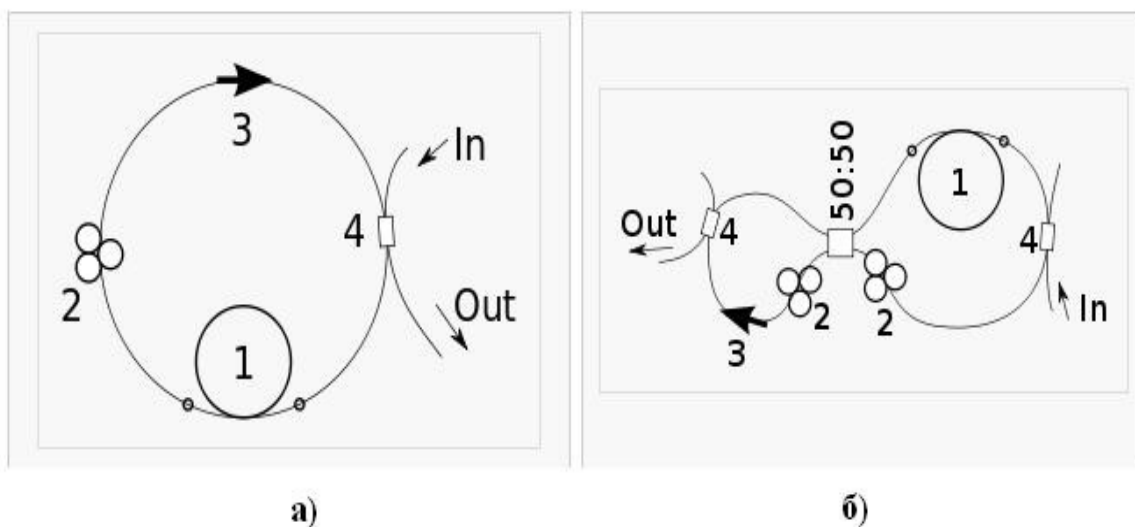
$$2tg^{-1} = \pi + \varphi + \sin \varphi \quad (2.13)$$

мұндағы φ – резонатор ұзындығына қарай фазаның жүгіруі;

$p = P_{out} / P_{in}$ – резонатор құрайтын талшықтың кесіндісіндегі шығыс және кіріс қуаттың қатынасы.

2.10-суретте талшықты лазердегі сақиналы резонаторлар кескіні берілген. Әдетте сақиналы резонаторда сәулелену поляризациясының сақталуын және оның таралуының бағыттылығын қамтамасыз ететін қосымша оқшаулағыштар мен поляризатор қолданылады. Бұған ұқсас конструкциялар неодимді талшықты лазер үшін 1958 жылы пайда болды. Модалар синхронизациясы лазері үшін талшықты қосу пішіні бойынша сегізге ұқсас қалпындағы резонатор қолданылады. Сегіз түріндегі резонатордың ілмектері Саньяк ілмегі ролін атқарады. Белсенді талшық қарама-қарсы толқын арасындағы фазалардың сызықсыз айырмашылығын құрып, шектік қуатын көтерген кезде модалар синхронизациясын қамтамасыз ететін резонаторлар ілмегіне қарай симметриялы емес етіп орналастырылады.

Сақиналы резонаторды қолданатын лазерлер талшықты сапасы мен температурасына өте сезімтал, алайда фемтосекундты импульстерді қаныққан жұтқышсыз-ақ өндіруге мүмкіндік береді, ал ол өз кезегінде лазердің құрылымын жеңілдетеді.



- а) Талшықты лазерге орнатылған қарапайым сақиналы резонатор; б) сақиналы резонаторы бар талшықты лазер.
- б) In: толтыру сәулеленуі. Out: шығыс сәулелену; 1 – белсенді талшық; 2 – поляризаторлар; 3 – оптикалық оқшаулағыштар; 4 – WDM-тармақтағыш; 50:50 – 50/50 бөлгіштері

Сурет 2.10 - Талшықты лазерлердегі сақиналы резонатор

Оптикалық талшық бойымен таралатын осы сәулеленудің поляризациясын сызықты және сызықсыз өзгертуі көптеген талшықты лазерлердің фемтосекундты импульстерін өндірудің негізі болып табылады. Оларда бірдей аз шығынды осы екі сызықты ортогоналды поляризациясы бар сәулелену таралатын сынушы оптикалық талшық қолданылады. Оптикалық талшықтың поляризациялық қабілеті екі поляризация арасындағы фазалық кідіріс 2π -ге жететін ұзындықтармен сипатталады және келесі өрнекпен анықталады:

$$\Lambda = \lambda / \Delta n \quad (2.14)$$

мұндағы Δn – екі поляризация үшін сыну көрсеткіштерінің айырымы.

Осы екі поляризациялар арасындағы байланысты азайту үшін Δn 10^{-4} -тен аз болуы керек. Алайда, үлкен сәулесі сыну кезінде оптикалық талшықта модалары арасында өзара әсерлесу болуы да мүмкін.

Сәулеленудің үлкен энергиясы P кезінде осы оптикалық талшықтың сыну көрсеткіші осы энергияға тәуелді.

$$n = n_0 + n_2 P A_{\text{эфф}}$$

мұндағы $n = 2,2 \cdot 10^{-22} \text{ м}^2 / \text{Вт}$ – кварцтың сызықты емес сыну көрсеткіші;
 $A_{\text{эфф}} = (\int I_n^2 da)^{-1}$ – тиімді мода облысы.

мұндағы I – талшықтағы мода интенсивтілігі;
 a – талшықтың жүрекшесінің радиусы.

z ұзындықтағы оптикалық талшықта сынудың сызықты емес көрсеткіші келесі өрнекпен сәйкес сызықты емес фазаның кідірісін өндіреді:

$$\varphi_{\text{сыз}} = \frac{\lambda A}{2\pi n_2 P z_{\text{эфф}}} \quad (2.19)$$

2.11-суретте талшықты лазерлерде қолданылатын оптикалық сұлба келтірілген. 2.10а-сұлбасы бойынша құрастырылған лазер Фабри-Перо сызықты резонаторларын, ал 1.20б-сұлбасы бойынша – сақиналы резонаторды қолданады.



а) Қаныққан жұтқышты сызықты резонаторлары бар лазер; б) Модалар пассивті синхронизациясы бар сақиналы лазер

Сурет 2.11 - Модалар синхронизациясы бар талшықты лазер сұлбасы

Импульстерді күшейту

Импульстерді күшейту қағидалары. Өте қысқа импульстерді күшейту үшін импульстерді күшейту деп аталатын арнайы техника қолданылады. Өте қысқа импульстерді қатты күшейту оптикалық элементтердің зақымдануына әкелетіндіктен, күшейту алдында импульсті уақыт бойынша «созады», ал күшейткеннен соң «сығады». Терраватты және петаватты лазер үшін күшейту кезінде лазерлік шоғының диаметрлері телескоп көмегімен (мысалы, бірі фокусы екіншісінің ішіндегі екі ұлғайтқыш линза көмегімен) ұлғаяды. Импульсті уақыт бойынша «созу» үшін импульс ұзақтығы 10 немесе одан да көп есе ұлғаятын фазалық модуляция жүргізетін екі дифракциялық тордан тұратын құрылым қолданылады.

Чирпирленген импульстерді күшейту (CPA) — күшейту алдында үлкен жолақты импульсті дисперсиялы оптикалық жүйеде созу (әдетте призма жұбы) және кері дисперсиялы оптикалық жүйеде (жоғары қуатты импульстер үшін мұндай жүйе ретінде тек дифракциялық тор және мүмкін болса, айналар қолданылады). CPA бүгінгі уақытта жоғары қуатты импульстерді алудың негізгі техникасы болып табалады.

Осындай қуатты қысқа жарық импульстерін генерациялау 1985 ж. американ ғалымы CPA-лазер деп аталатын арнайы типті лазерді ойлап тапқаннан кейін мүмкін болды. Осы әріптер – “chirp pulse amplification” ағылшын сөзінен шыққан, “жиілігі баяу өзгереді импульстерді күшейту” деп аударылатын сөздердің алғашқы әріспері. Осы сөздерде лазердің жұмыс істеу қағидасы айтылған. CPA-лазер төрт блоктан тұрады: генератор, созушы, күшейткіш және сығушы (компрессор). Сұлба түрінде осы 2.12-суретте келтірілген [23].

Сурет 2.12 - СРА-лазерінің жұмыс істеу қағидасы

Қысқа әлсіз лазерлік импульс өндірушіден созушыға түседі, онда оның ұзындығы да мың есе өседі, ал сәулелену жиілігі импульс ұзындығы бойынша баяу бірқалыпты болып өзгереді (чирпирленген импульс деп аталады). Сонан соң импульс оның энергиясын көп өсіретін күшейткіш арқылы өтеді. Күшейткіштен кейін импульс ұзақтықтарынан бастапқы мәніне дейін сығатын сығушыға келіп түседі.

Өндіргіш – аз қуатты ультрақысқа импульстерді жасайтын қарапайым импульсті лазер. Әдетте осындай импульстердің ұзақтығы ондаған-жүздеген фемтосекундты құрайды. Ал импульстің энергиясы өз аз, 10^{-6} Дж-ге тең болады.

Өндіргіштен осындай әлсіз және қысқа импульс мың есе созылатын «созушы» деп аталатын құрылғыға келіп түседі. Міне осы жерде СРА-лазер жұмысы негізделген лазерлік импульстің басты ерекшелігі орнатылады. Импульстар созылғанда, оның сәулелену жиілігі ұзындығы бойынша баяу өзгередіндей болып созылады. Мұны ойыс және шығыңқы арасындағы арақашықтығы ұзындығы бойынша баяу бірқалыпты өзгертін сырнай түрін елестету оңай. Сәулелену жиілігі осылай таралатын импульс ағылшын сөзінің «chirp» сөзінен аудармасы шырылдау, сайрау, мағынасын білдіретін чирпирленген деп аталады. Сәулеленудің толқын ұзындығының өзгерісі импульс басынан соңына дейін қатты үлкен емес және пайыздың үлесін ғана құрайды.

Мұндай созылған импульс күшейткішке – атомдары қозған күйде болатын белсенді ортаға түседі. Импульс осы ортаға өту арқылы атомдарды қалыпты, қозбаған күйіне келтіреді және атомдардың энергиясын жинайды. Нәтижесінде импульс энергиясы көп өседі, алайда энергия тығыздығы (бірлік көлемдегі энергия) импульстің үлкен ұзындығынан аз болып қалады. Қысқа импульсті тікелей күшейту энергияның өте жоғары тығыздығына әкелетін еді және нәтижесінде импульстің де, күшейткіштің де зақымдалуына әкеледі.

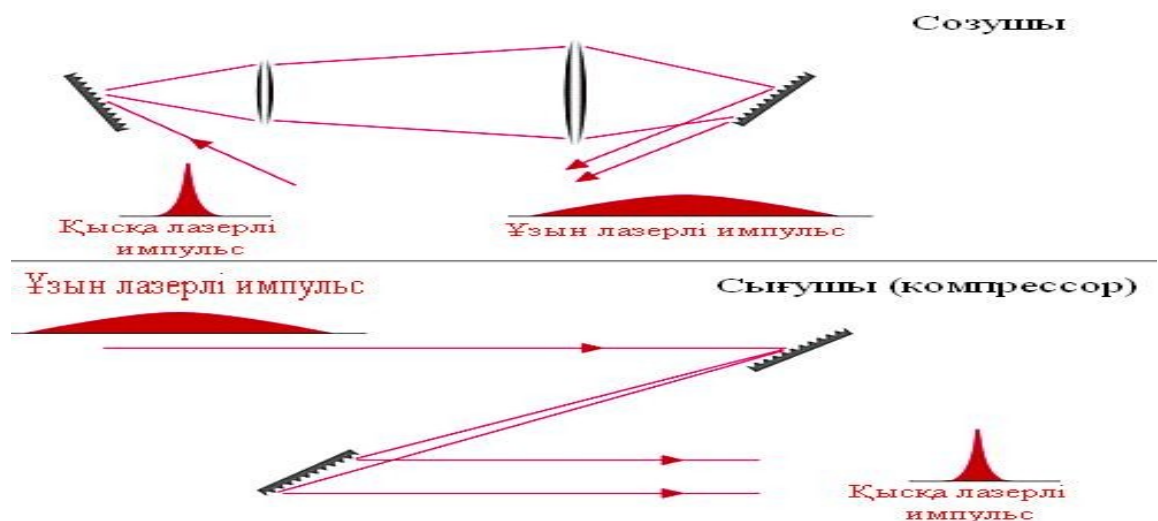
Сонан соң энергиясы көп, ұзын, импульс сығушы (компрессор) деп аталатын құрылғыға түседі. Соңғысының тапсырмасы импульсті бастапқы

ұзындықтарына дейін қайта сығу болып табылады. Импульс созылғанға кері әсермен қол жеткізуге болады.

Енді созушы мен сығушының (компрессор) қалай құрылғаны туралы қысқаша тоқталайық.

2.13-суретте лазерлік импульсті құратын әртүрлі жиіліктік құраушылар дифракциялық тордан әртүрлі бұрышпен шағылысады. Біріншісіне қарағанда, екінші дифракциялық тордан ары қарайғы шағылысу кезінде импульс созылады (жоғарғысы) немесе сығылады (төменгісі).

Импульстің созу, әрі сығу үшін екі дифракциялық тордан тұратын құрылғылар керек (1.22-сурет). Тордың әрқайсысы жұқа параллельді сызықтармен сырылған белгілі бір материалдың жұқа қабатпен қапталған шыны пластинадан тұрады. Сызықтар ені, сондай-ақ олардың арасындағы арақашықтық 1 мкм-ге тең. Осындай пластинаға келетін жарық одан шағылысады, ондағы шағылысу бұрышы түсетін жарықтың жиілігіне тәуелді.

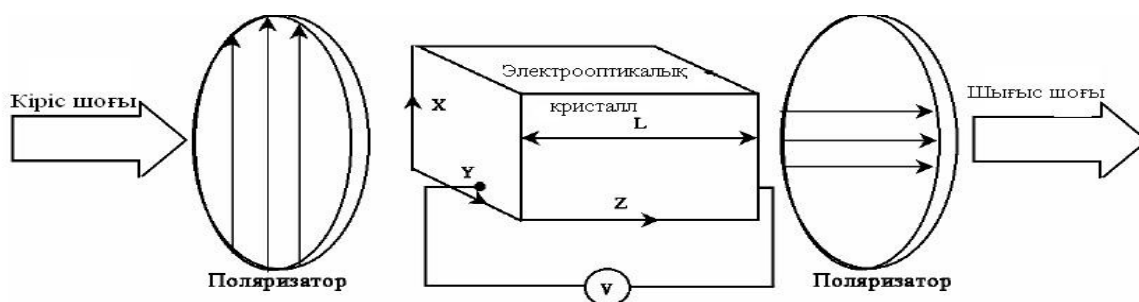


Сурет 2.13 - Созу және сығу (компрессор) құрылғылары

Қысқа лазер импульс пластинкадан әртүрлі бұрышпен шағылысатын түрлі жиіліктері бар жарықтан тұрады. Егер шағылысқан жарықты бірінші дифракциялық торға қарағанда белгілі орналасқан басқа да дифракциялық пластинаға бағыттасақ, әртүрлі жиіліктегі осы толқынмен өтетін жолды айыруға болады. Нәтижесінде осы екі дифракциялық тордан шағылысқан әртүрлі жиіліктегі толқындар жерге уақыт бойынша әртүрлі кідіріспен келеді. Бір дифракциялық торды басқасына қарап бағдарлағанда импульсті осы жолмен созу болады және қысқа импульстен ұзын импульс жасауға болады, ал басқаша жөн сілтеу кезінде оны қайтадан қысқа қылуға болады.

Бүгінгі уақытта әлемде жүзге жуық СРА-лазерлер жұмыс жасайды. Олардың көмегімен көбісі тәжірибелік пайдалану тапқан әртүрлі физикалық әсерлер зерттеледі. Төменде мен СРА-лазерінің кейбір пайдалануына тоқтала кетейін.

Поккельстің электрооптикалық ұяшығы және Фарадей оқшаулағышы. Оңаша импульстің энергиясы бірнеше нДж кезінде фемтосекундты лазерлердің импульстерді қайталау жиілігі бірнеше ондаған МГц-ті құрайды. Импульс энергиясын мДж-ге дейін ұлғайтуға импульстің пайдалану жиілігі 10кГц, 100 мДж-10 Гц-ке дейін азайтылуы керек. Осы үшін сызықты электрооптикалық–Поккельс әсерін қолданатын Поккельстің электрооптикалық ұяшығы қолданылады (2.14-сурет).



Сурет 2.14 - Поккель әсері негізіндегі электрооптикалық ысырма жұмысы сұлбасы

Тік сызықты-поляризация сәулелену поляризатор және екі сәуле сындырушы кристаллдар арқылы, мысалы KDP арқылы өтеді. Егер кристаллға тіке бойлы электрлік өріс қосымша қосылмаса, онда сәулеленудің кез келген поляризациясы үшін осы бағытта сыну көрсеткіші бірдей болады. Осы жағдайда сәулелену поляризациясы кристалл шығысында да өзгеріссіз қалады және екінші поляризатордың (талдаушы) тік поляризациясын өткізбейді.

Егер кристаллға сәйкес жоғарғы кернеу берсек, онда қосымшаланған екі сәуле болғандықтан, кристалдың шығысында поляризация 90° бұрылады және сәулелену осы екінші поляризатордан өтеді.

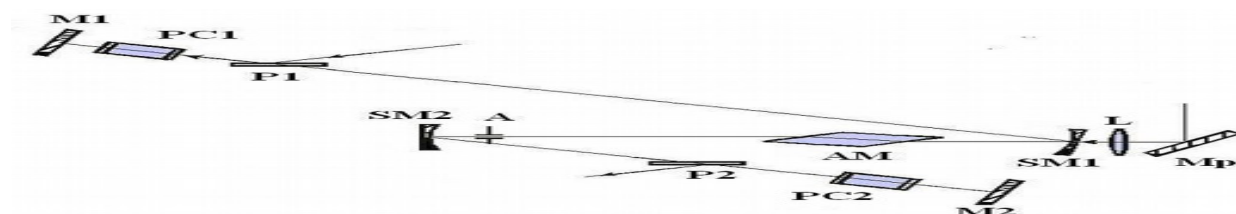
Фарадей оқшаулағышы – сызықты поляризацияланған сәулеленуді бір бағытта өткізетін оптикалық құрылғылар. Фарадей изоляторлары чирпирленген импульстерді де күшейту жүйелерінде таңдаушы өндіргішті оптикалық сұлбаның басқа элементтерінен, сондай-ақ шашыраушы сәулеленуден қорғау үшін қолданылады. Түсетін сәулелену қуаты бірнеше ретке (10^4 - 10^6) әлсірейді. Қарапайым құрылымдар тізбектей орналасқан: поляризатор – Фарадей поляризация айналдырушы – фазалық пластина ($\lambda/2$) – шығыс поляризаторы. Фарадей поляризация айналдырушы бағыты жарықтың тарату бағытымен бағыттас тұрақты магниттік өріс орналастырылған оптикалық магнитті-қабілетті материалдан тұрады.

Поляризация бұрылысы магнитті-қабілетті материалдың ұзындығына және магнитті өріс кернеулігіне пропорционал. Жүйе оқшаулағыш сияқты жұмыс істеу үшін айналдырушылар арқылы өткенде сызықты поляризацияның

бұрылысы 45° тең болуы керек. Фазалық жыртылай толқындық пластинка поляризация бұрышын тағы да 45° -қа бұрады және поляризация ортогональды кіріс болады.

Жарық кері қарай таралғанда поляризация өзгермейді, себебі фазалық пластинка мен Фарадей айналдырушысы поляризацияны әртүрлі бағытқа айналдырады.

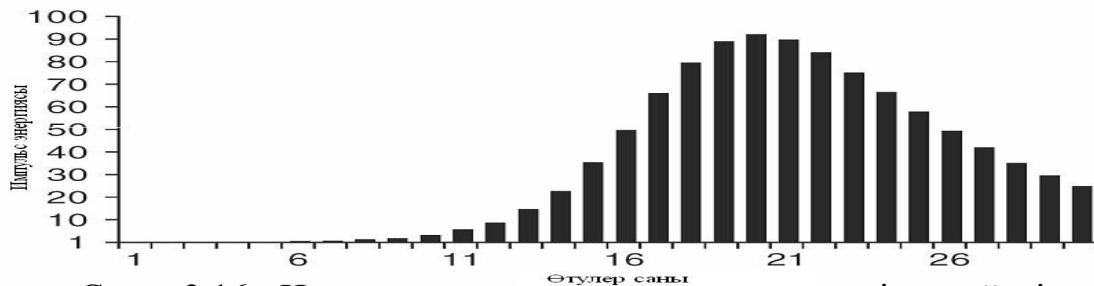
Регенеративті күшейткіштер. Регенеративті күшейткіштер фемтосекундты импульстерді күшейту (күшейту коэффициенті 10^7 -ге дейін) үшін арналған. Регенеративті күшейткіштер – күшейткіштен фемтосекундты импульске энергияны берудің тиімді әдістері. 1.24-суретте регенеративті күшейткіштің оптикалық сұлба келтірілген.



Сурет 2.15 - Регенеративті күшейткіш оптикалық сұлбасы

Фемтосекундты импульстер таңдаушы өндіргіштен (лазерден) кейін стретчер мен Фарадей изоляторын өтіп (стретчер – топтық жылдамдықтың үлкен дисперсиясы бар кірісі желісі) P1 поляризаторына түсіп, Поккельс ұяшығынан өтеді және M1 айнасымен шағылысады. Егер Поккельс ұяшығына кернеулік берілмесе, сәулелену поляризациясының күйін өзгертпейді және M1 айнасы және P1 поляризаторымен шағылысып, күшейткішке түспейді. Егер Поккельс ұяшығына сәйкес кернеу берсе, онда поляризацияның күйі өзгереді және импульс регенеративті күшейткіштердің ішінде құлыпталып қалады. Осы импульс инъекциясы (енгізу) деп аталады. Лазермен өндірілетін фемтосекундты импульстердің тізбегінен күшейткіш резонаторында бір ғана импульс болу үшін Покельс ұяшығын басқаратын жоғары вольтті импульс фемтосекундты импульстердің жүру жиілігіне қарағанда қысқа болу керек (ереже бойынша 10 нс). Күшейткіштер резонаторы екі жазық M1, M2 және SM1, SM2 екі сфералық айнадан тұрады. Толтыру деңгейін төмендету үшін инверсті қоныстанушылықты аз алады. Күшейту резонаторында шығынды төмендету үшін AM белсенді ортасы (кристалл) Брюстер бұрышымен орналасқан. Астигматизмді компенсациялау үшін сфералық айналар белгілі бір бұрышпен еңкейтілген. Толтыру сәулеленуі Mr айнасымен шағылысады және белсенді ортасына L линзасы көмегімен де фокусталады. Толтыру үшін ұзақтығы ондаған немесе жүздеген наносекунд импульстер және сапалылық модуляциясы бар лазерлер қолданылады. Инжекцияланған импульстар қанығуға жету үшін күшейтіледі (әдетте, 20-30 өту) (1.25-сурет), сонан соң оны Покельс ұяшығына PC2 сәйкес кернеулік беріледі – M2 айнасынан шағылысып, Покельс ұяшығынан өтіп, поляризацияның күйін ортогоналдыға P2

поляризаторларынан шағылысқаннан кейін күшейтілген импульсті регенеративті күшейткіштерден шығып, келесі күшейткішке немесе сығушыға (компрессорға) түседі.



Сурет 2.16 - Импульс энергиясының регенеративті күшейткіш арқылы өту санына тәуелділігі

Покельс ұяшығы толтыру импульсін және таңдаушы өндіргішімен генерацияланатын фемтосекундты импульстер тізбектерін синхронизациялау үшін күшейткіштегі импульстің инжекция және осы күшейткіштен импульстің шығу уақытын басқару үшін синхронизациялау және Покельс ұяшықтарын басқарудың арнайы осы фотонды сұлбалары қолданылады. Күшейтудің бірінші каскады үшін осы белсенді орта арқылы 8-ден 10-ға дейін және екінші каскад үшін 4-тен 8-ге дейін өткізулер қолданылады. Көп өткелді күшейткіштің оптикалық сұлбасы 1.26-суретте келтірілген.

Фемтосекундты импульстер таңдаушы өндірушіден (лазерден) кейін стретчер (топтық жылдамдықтың үлкен дисперсиясы бар кірісі желісі) мен Фарадей изоляторынан және жеке импульсті бөлу жүретін Покельс ұяшығынан өтеді. Оңашаланған импульс M_0 айнасы арқылы осы көп өткелді күшейткіштің кірісіне келіп түседі. Көп өткелді телескоп күшейткіші екі сфералық айна M_1 , M_2 және қос айнаның фокустары жанында орналасқан белсенді ортадан тұрады. Бос генерацияларды басу үшін сфералық айналарға арнайы пішінді осы маска кигізіледі. M_1 және M_2 айналар қисығының радиусы әртүрлі, осының арқасында шоқтың диаметрі осы белсенді ортасы өткен сайын азаяды, ал белсенді ортада созу сәйкесінше ұлғаяды. Осы белсенді элементті зақымдау қаупінсіз инжекциялаушы импульстің ең үлкен күшеюін алуға мүмкіндік береді. M_1 сфералық айнасы ортасында күшейтілген сәулені шығару үшін саңылауы бар. Толтыру сәулеленуі L линзалары көмегімен белсенді ортаға фокусталады, M_2 айнасының қиығына тығыздалып келеді.

Сурет 2.17 - Телескопты күшейткіштердің оптикалық сұлбасы

Фемтосекундты импульстер таңдаушы өндірушіден (лазерден) кейін стретчер (топтық жылдамдықтың үлкен дисперсиясы бар кірісі желісі) мен Фарадей изоляторы және оңаша импульсті бөлу жүретін Покельс ұяшығынан өтеді.

3 Есептеу бөлімі

Бұл бөлімде Гаусс пішінді сигналдар үшін ультрақысқа импульстердің ұзақтықтарын, оптикалық сигналдың атмосферада қуатының азаюын, оның релеевтік шашырауларын, аэрозольді әлсіреу, молекулалық жұтудың әсерін, оптикалық сигналдардың атмосферада таралғанда турбуленттіктің әсерін, сызықты емес әсерін, атмосферадағы өзге көздерден болатын бөгеттер, атмосфералық арнаны, ауа райының әсерін есептедім.

3.1 Қысқа импульстер ұзақтығын өлшеу

Енді осындай қысқа импульстердің ұзақтығы қалай өлшенетіні туралы сұрақты қарастырған жөн. Бұл импульстердің қалай пайда болатыны жайлы 1.4 тарауда айтылып кеткен болатын.

Мұндай импульстер келесі аралықпен бөлінген және ол толқынның резонатордың бір толық айналымын өту уақыты болып табылады [16]:

$$T_p = L/c \quad (3.1)$$

мұндағы L – лазерлі резонатордың ұзындығы;
 c – жарық жылдамдығы.

Мода арасындағы қашықтықтар $\Delta \nu = 1$ -ге тең, демек амплитуданың мұндай ұлғаюы осы периодпен қайталана береді.

Импульс ұзақтығы және сәулелену қуаттары синхронизацияланған модалар санымен анықталады. Мысалы, $\Delta \nu$ модалар аралық қашықтығы бар N модалар синхрондалса, ондағы жалпы синхрондалған өткізу жолағы $\nu \Delta N$ -ге тең болады. Соңғы аталған шамалар кең болған сайын лазерлік сәулеленудің импульс ұзақтығы да қысқарақ болады. Ал тәжірибеде импульс шынайы ұзақтығы импульс өзінің пішініне тәуелді. Мысалы, Гаусс пішінді сигнал үшін импульс ұзақтығы

$$\tau = \nu \Delta N = N \quad (3.2)$$

Мысалы, лазерлік резонатордың 1000 модасын толықтай синхрондағанда алынатын импульс ұзақтығын есептеңіз. Лазерлік резонатордың ұзындығы – 1 м, импульс орайжанаушысы Гаусс пішінді болып келген.

Шешуі:

Бастапқыда толқындардың резонатордың бір толық айналымын өту уақытын есептеп алайық:

$$T=2L/c=2 \cdot 1/3 \cdot 10^8 = 6,67 \cdot 10^{-9} \text{ c}$$

Импульстар ұзақтығы:

$$\tau = 0,44 / \nu \Delta N = 0,44 T_p / N = 0,44 \cdot 6,67 \cdot 10^{-9} / 1000 = 2,93 \cdot 10^{-12} \text{ c}$$

(3.2) қатынасын қолданып отырып, берілген белгілі бір лазер өндіретін импульстің ең аз ұзақтығын есептеуге болады. 1,5 ГГц өткізу жолағы бар лазері үшін

$$T = 1/f = 1/1,5 \cdot 10^9 = 0,667 \cdot 10^{-9} \text{ c}$$

$$\tau_p = 0,44 / \nu \Delta N = 0,44 T_p / N = 0,44 \cdot 6,67 \cdot 10^{-9} / 1 = 0,2948 \cdot 10^{-9} \text{ c} = 300 \text{ пс}$$

Ал 128 ТГц өткізу жолағы бар титан-сапфирлі лазері үшін

$$T_p = 1/f = 1/128 \cdot 10^{12} = 7,8110^{-15} \text{ c}$$

$$\tau_p = 0,44 / \nu \Delta N = 0,44 T_p / N = 44 \cdot 7,81 \cdot 10^{-15} / 1 = 3,44 \cdot 10^{-15} \text{ c} = 3,44 \text{ пс}$$

3.2 Оптикалық сигнал қуатының атмосфера арқылы әлсіреуі

Оптико-электронды жүйелер мен бақыланатын объекттер арасында атмосфера бар болуы әдетте негізгі бөгеуілдердің себепкері болып табылады. Объекттен шығатын сәулелену энергиясы осы атмосфера арқылы өткен кезде әлсірейді, оның спектрлі құрамы өзгереді.

Таза сапалық белгілеріне қарап, оларды үш негізгі топтарға бөлуге болады:

а) Жұту (фотон сәулесінің атмосфераның молекулаларымен тікелей әрекеттестігі);

б) Аэрозольде (шаң, қар, жаңбыр, тұман) шашырау;

в) Молекулалық шашыраудан болатын ауытқулар [24].

Атмосферада шығын коэффициенттерін α есептеу үшін әртүрлі физикалық физикалық құбылыспен анықтайтын үш құраушыны табуымыз қажет: жұту (α_{II}), молекулалық шашырау (α_M) және аэрозольді шашырау (α_A). Шығынның толық коэффициенті мынадай түрмен анықталады:

$$\alpha = \alpha_{II} + \alpha_M + \alpha_A \quad (3.3)$$

Осы құбылыстардың әрқайсысын жеке қарастырамыз және атмосфералық

лазерлік байланыс жүйелеріндегі шығындарын есептейміз.

3.3 Оптикалық сигналдардың релеевтік шашырауы

Ауаның тығыздығының молекула ауытқулары жарық толқындарының шашырауын болдырады. Жарықтың бір бөлігі бұрынғы бағыттармен, ал қалған бөліктері – осы бастапқы бағытқа барлық бұрышпен түрлі қарқындылықпен таралады (жарықтың кейбір бөліктері артқа қарай шашырайды). Шашыраған жарық жылдамыдылығының шашырау бұрышына тәуелділік функциясы (яғни, бастапқы алғашқы бағыт пен шашырау бағытының арасындағы бұрыш) шашырау индикатрисасы деп аталады.

Оптикалық сигналдардың аэрозолдық және молекулалық (релеевтік) шашыраулары әсерінен энергетикалық шығындары сигналдың бұрмалануын анықтайтын басты әсерлердің бірі болып саналады. Жарықтың молекулалық (релеевтік) шашыраулары теориясынан газда шашырау коэффициенті үшін төмендегі өрнек шығады. Шашыраудың индикатрисасы үшін жарық толқын ұзындықтарымен салыстырғанда шашырайтын бөлшектердің өлшемдері аз болған жағдайдағы формуланы алғаш рет Релеев (Rayleigh) алған. Шашырау теориясын (молекулалар анизотропы есебі) ары қарай анықтау нәтижесінде бірнеше рет өзгертілген осы формулалардан бір молекула үшін шашыраудың көлденең қимасы σ_R мынаған тең [25]:

$$\sigma_M(\lambda) = 8\pi^3(n^2-1)/3N\lambda^4 \cdot 6 + 3\delta/6 - 7\delta \quad (3.4)$$

мұндағы N – көлем бірліктеріндегі молекула саны (Лошмид саны); n – ортаның (ауаның) сыну көрсеткіштері; λ – сәулеленудің толқын ұзындықтары; δ – 0.005^2 -қа тең шашыраған сәулеленудің деполяризация факторлары [26].

Лошмид саны мынадай:

$$N = 2,687 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$$

$n \approx 1$ және $n^2 - 1 = (n - 1)(n + 1) \approx 2(n - 1)$ болғандықтан және ауа үшін деполяризация факторы бар мүше $1,002$ -ке тең болып, (3.4) формуласын мына түрде жазуға болады:

$$\sigma_M(\lambda) = 1,00204 \cdot 8\pi^3(n^2 - 1)/3N\lambda^4 \quad (3.5)$$

(3.4)-ге сәйкес молекулалық шашыраулардың көлемдік коэффициенті σ_p жарық толқын ұзындықтарының төртінші дәрежесіне кері пропорционал. Бұл заң Релеев заңы атына ие. Релей заңына сәйкес жарықтың ашық көк және көк сәулелері (осы шамамен алғанда $0,45$ мкм) қызғылт және қызыл сәулелерге қарағанда (шамамен 0.64 мкм) ауада едеуір көбірек шашырайды. Міне осымен, ашықкөк пен көкшіл сәуле басым түсетін күннің шашыраңқы сәулеленуімен

анықталатын бұлтсыз аспан ашық көк түсі түсіндіріледі; арайдың қызыл түсі, сонымен қатар батып бара жатқан Күн мен Айдың қызыл түсі: үлкен аспан биігі бұрышы кезінде атмосферадағы әлсіреу үлкен болады, сондықтан тура және шашыраңқы сәулеленудің спектрінде көбінесе қызыл және қызғылт сәулелер «қалып қояды».

Енді $t = 15^\circ \text{C} = 288\text{K}$ температурасы және қысым $p = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$ кезінде жерге жақын қабатта әртүрлі толқын ұзындықтары үшін барлық атмосфераның тік қабаты оптикалық қалыңдығы $\tau_p(\lambda)$ үшін $\sigma_p(\lambda)$ коэффициенттері мәнін есептейік.

$$\sigma = 8\pi^3 (n^2 - 1) / 3N\lambda^4 \cdot 1,00204 = 8 \cdot 3,14^3 (1,000292^2 - 1) / 3 \cdot 2,687 \cdot 10^{19} \cdot 0,3^4 \cdot 10^{-24} \cdot 1,00204 =$$

$$= 0,14466 \cdot 1,00204 / 1024,183 \cdot 0,0081 = 0,00599 \cdot 10^5 / 0,0081 = 0,1296 \text{ км}^{-1}$$

Релеев шашырауы оптикалық қалыңдықтың $\tau_p(\lambda)$ мәнін алу үшін, барлық атмосфера үшін теңіздің деңгейінен h биіктіктен бақылағанда шашыраудың көлденең қимасын ауадағы сәуле жолында бөлшектер санына көбейтеміз:

$$\tau_p(\lambda, h) = \sigma(\lambda) N(h, t) dh = \int \beta_R(\lambda) dh$$

$$\beta_R = \sigma(\lambda) N(h, T) \quad (3.6)$$

мұндағы T – ауа температурасы;

$\beta_R = \sigma(\lambda) N(h, T)$ – ауадағы жарықтың әлсіреуінің көлемдік (экспоненциалдық) көрсеткіштері.

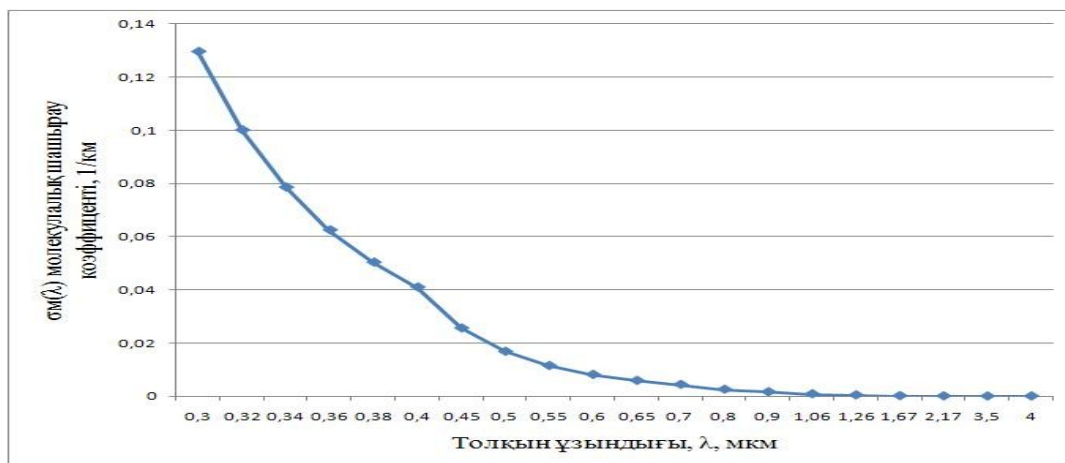
$$\sigma_M(\lambda) = 8\pi^3 (n^2 - 1) / 3N\lambda^4 \cdot 6 + 3\delta / 6 - 7\delta \quad (3.7)$$

Кесте 3.1 - Барлық атмосфера тік қабатының оптикалық қалыңдығының $\tau_p(\lambda)$ молекулалық шашырауының коэффициенттерінің $\sigma_p(\lambda)$ жарық толқын ұзындықтарына тәуелділігі

$\lambda, \text{мкм}$	$\sigma_M(\lambda), \text{км}^{-1}$	τ_p	$\lambda, \text{мкм}$	$\sigma_M(\lambda), \text{км}^{-1}$	τ_p
0,3	0,12962963	1,2237	0,65	0,005882147	0,0499
0,32	0,1001358	0,929	0,7	0,004373178	0,0369
0,34	0,07857305	0,7188	0,8	0,002563477	0,0215
0,36	0,06251429	0,5653	0,9	0,001600366	0,0072
0,38	0,05035643	0,4508	1,06	0,000831698	0,0034
0,4	0,04101563	0,3641	1,26	0,000416588	0,0011
0,45	0,02560585	0,2238	1,67	0,000134997	0,0004
0,5	0,0168	0,1452	2,17	4,73533E-05	0,0001
0,55	0,01147463	0,0984	3,5	6,99708E-06	0,0034

0,6	0,00810185	0,069	4	4,10156E-06	0
-----	------------	-------	---	-------------	---

Ары қарайғы есептеулерді MS Excel бағдарламасында кесте құру арқылы жасауға болады. Алынған нәтижелерді 2.1-кестеге енгіземіз және график аламыз (3.1-сурет).



Сурет 3.1 - Молекулярлық шашырау коэффициенттерінің $\sigma_p(\lambda)$ жарық толқын ұзындықтарына тәуелділік графигі

Осындай графикті біз Mathcad бағдарламасында ала аламыз. Ол А қосымшасында көрсетілген (3.2-сурет).

Келтірілген кесте мен суреттерден көріп отырғанымыздай, егер тығыздықтың биіктік бойынша таралуы белгілі болса, молекулярлық шашыраумен шартталған оптикалық сигналдардың энергетикалық шығындары үлкен тура дәлдікпен табуға болады. Әдетте, 30 км-ге дейін атмосфераның стандартты моделінің шарты орындалады, сондықтан көрсетілген шығындар үшін сандық баға беру мәселесі шешілген болып саналады. Үлкен биіктікте атмосфера тығыздығы орын мен уақытқа қарай өзгеруі мүмкін, тиісінше молекулярлық шашыраудың коэффициенттері де өзгеріп отырады. Алайда әрбір өзгеріс кезінде біз әрқашан инфрақызыл облыста релеевтік шашырау есебінен болатын энергетикалық шығындарды есепке алмай-ақ қойсақ болады.

Ауа температурасы, қысымы және биіктікпен бірге ылғалдылықтың сыну көрсеткіші шамасы әсерін есепке алмау қателікті (ең болмаса, жүзден бір болса да) береді, ал оны қазіргі фотометрлердің аппаратуралық дәлдікпен салыстырмалы дәлдікті алғыңыз келсе, есепке алу керек.

Осы мәліметті пайдаланумен $\sigma(\lambda)$ мәндерінің жуықталуы алынған болатын:

$$\sigma(\lambda) = 4,02 \cdot 10^{-28}$$

мұндағы, x мәні $0,2 < \lambda < 0,55$ мкм үшін; $x = 0,398\lambda + 0,09426/\lambda - 0,3228$

ал x мәні $0,55 < \lambda < 1$ мкм үшін $x=0,04$.

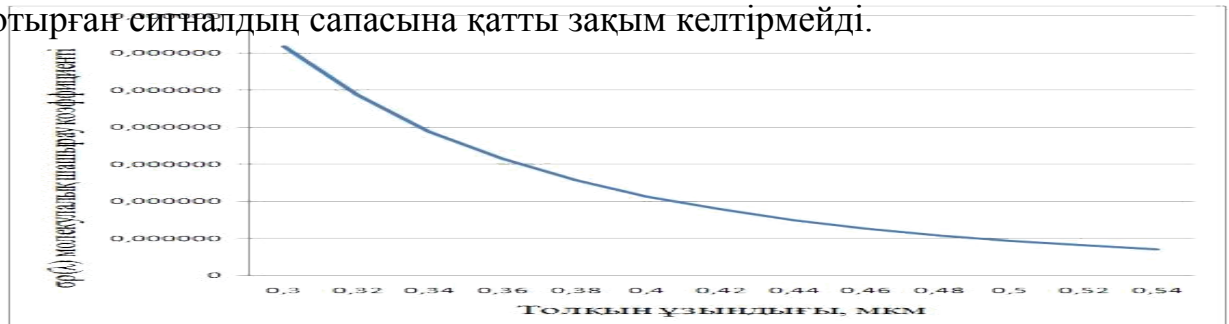
Есептелген мәндер 2.2-кестесінде көрсетіледі.

Кесте 3.2 - Жаңа тәжірибе негізіндегі алынған шашырау коэффициентінің толқын ұзындығына тәуелділік кестесі

λ , мкм	X	$\sigma_p(\lambda)$, км ⁻¹	λ , мкм	x	$\sigma_p(\lambda)$, км ⁻¹
0,3	-0,292008076	6,18E-07	0,5	-0,2920085	9,30E-08
0,32	-0,292008119	4,86E-07	0,52	-0,2920085	8,04E-08
0,34	-0,292008162	3,89E-07	0,54	-0,2920086	6,99E-08
0,36	-0,29008204	3,14E-07	0,56	0.04	7,27E-06
0,38	-0,292002247	2,57E-07	0,58	0.04	6,31E-06
0,4	-0,29200829	2,13E-07	0,6	0.04	5,50E-06
0,42	-0,292008333	1,77E-07	0,62	0.04	4,82E-06
0,44	-0,292008375	1,49E-07	0,8	0.04	1,72E-06
0,46	-0,292008418	1,27E-07	0,9	0.04	1,07E-06
0,48	-0,292008461	1,08E-07	1	0.04	6,99E-07

Төменде (32.3-сурет) осы кестенің графигі және (2.8) өрнегінің Mathcad бағдарламасындағы жүзеге асуы Θ қосымшасында көрсетілген (2.4-сурет).

Жаңадан алынған тәжірибеге қарап отырып, мынаны айтуға болады: жуықтаудың қателігі 0,5% ды құрайды, демек, ондай қателіктерді қатты елемесек те болады, себебі қателік үлесі өте аз және біздің тасымалданып отырған сигналдың сапасына қатты зақым келтірмейді.



Сурет 3.3 - Жаңа тәжірибелер негізіндегі алынған молекулалық шашырау коэффициентінің толқын ұзындығына тәуелділік графигі

(3.6) формуласындағы интеграл шешілсе немесе біртекті атмосфераның жуықтауы қабылданса, онда релеев шашырау есебінен жарықты әлсірететін атмосфераның спектрлі өткізуіне мынаған тең:

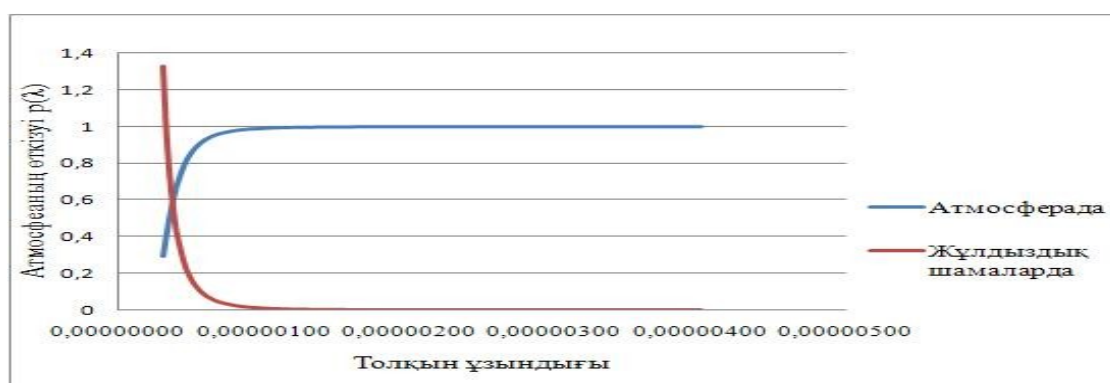
$$p_R(\lambda) = e^{-\tau R(\lambda, h)} \quad (2.9)$$

немесе жұлдыздық шамаларда

$$\Delta m_R(\lambda) = -2,5 \lg p_R(\lambda) \approx -1,086 \tau_R(\lambda, h) \quad (3.10)$$

3.3 Кесте - Релеевтік шашырау есебінен жарықтың әлсіреуі

τ_p	$P_r(\lambda)$	$\Delta m_r(\lambda)$	$\lambda, \text{мкм}$	τ_p	$P_r(\lambda)$	$\Delta m_r(\lambda)$
1,22	0,29	1,32	0,65	0,049	0,951	0,054
0,92	0,39	1,00	0,7	0,036	0,963	0,040
0,71	0,48	0,78	0,8	0,021	0,978	0,023
0,56	0,56	0,61	0,9	0,013	0,986	0,014
0,45	0,63	0,48	1,06	0,007	0,992	0,007
0,36	0,69	0,39	1,26	0,003	0,996	0,003
0,22	0,79	0,24	1,67	0,001	0,998	0,001
0,14	0,86	0,15	2,17	0,0004	0,999	0,0004
0,09	0,90	0,10	3,5	0,0001	0,999	0,001
0,06	0,93	0,07	4	0	1	0



Сурет 3.2 - Атмосфераның өткізуінің толқын ұзындықтарына тәуелділігі

Осы 3.5, 3.6-суреттерде Б қосымшасында көрсетілген, релеевтік шашырау есебінен жарықты әлсірететін атмосфера спектрлі өткізуі шамалардағы мәндерге қарама-қарсы өзгереді.

Едәуір мәнді шығындар осы көзбен бақылауды шектейтін аэрозольді шашырау (атмосферадағы бөлшектердің де шашырауы) арқылы пайда болады.

Атмосферада жиі кездесетін аэрозольдер сұйықтар және қатты түрдегі су тамшылары, жалпы айтқанда, гидрометеорлар түрінде болады (жаңбыр, тұман, қар және т.б.).

Аэрозольдер – бұл атмосфера қалыпты құраушысы; Жер бетінде оның құрамы таза ауда бірнеше мкг/м³-ден ластанған атмосферада 100 мкг/м³-ге дейін өзгеріп тұрады. Атмосферадағы аэрозольге желмен ұшып өтетін шаң және теңіз тұзының бөлшектері, жану өнімдері (күйе және күл), атмосферада химиялық реакция нәтижелерінде пайда болатын сульфаттар, нитраттар, герпенттер және т.б. қосылыстармен бірге сұйытылған органикалық қалдықтар мен заттар жатады. Макробөлшектер көбіне атмосферадан бөлшектерде қоюлану, гравитациядан кейін жаңбыр және қар жауу нәтижесінде жойылады [27].

Атмосфералық аэрозоль бөлшектерінің химиялық құрамы,

концентрациясы, өлшемдері кең көлемде өзгеретініне қарамастан, аэрозольдің кейбір түрлерін бөліп қарастыруға болады (бұлттар, тұман, түтін, жауын-шашындар, шаң-тозаң). Инженерлік есептеулер үшін тура дәлдікпен аэрозоль құрамы 10 км биіктікке дейін де азаятынын айтуға болады.

Аэрозольді шашырау кезіндегі шығын көрудің метеорологиялық алыстықпен (КМА) тығыз байланысты, алайда мұндай байланыс біртекті емес және аэрозоль өлшемдеріне тәуелді.

Сөйтіп, α_p шығын коэффициенттерін КМА шамасы бойынша бағалау ыңғайлы. α_p мен КМА (V_M) байланысын әдетте келесі формула арқылы көрсетіледі:

$$\alpha_p \approx 3,91 V_M^{0,55} \text{ мкм} \quad (2.11)$$

мұндағы $q = 0,585 \cdot \sqrt[3]{V} V_M < 10 \text{ км}$ кезінде;

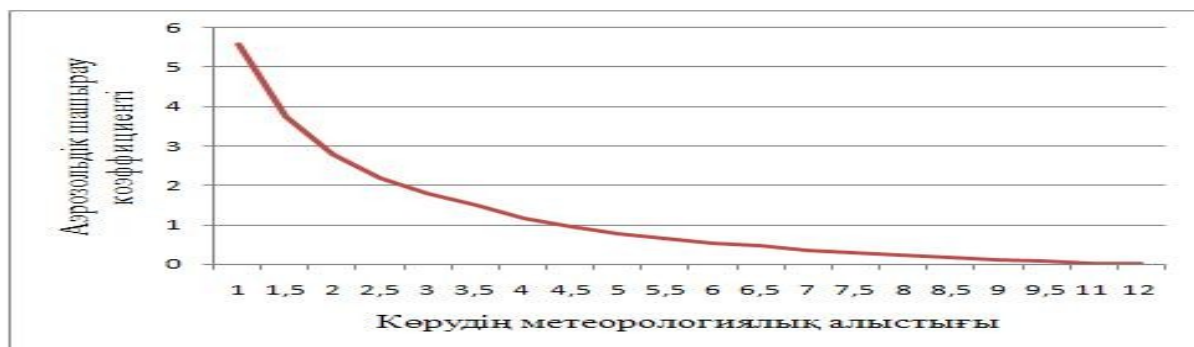
$q = 1,3 V_M > 10 \text{ км}$.

Мәндерді есептеп төмендегі 3.4-кестеде көрсетілген.

Кесте 3.4 - α_p шығындар коэффициентінің V_M шамасына тәуелділігі

V_M	λ	q	α_p	V_M	Λ	q	α_p
1	0,3	0,58	5,574	6,0	0,65	1,063	0,5456
1,5	0,32	0,669	3,746	6,5	0,7	1,09180	0,4623
2,0	0,34	0,737	2,786	7,0	0,8	1,1191	0,3673
2,50	0,36	0,79	2,189	7,5	0,9	1,1451	0,2966
3,0	0,38	0,843	1,780	8,0	1,06	1,17	0,2268
3,5	0,4	0,888	1,482	8,5	1,26	1,1939	0,171
4,0	0,45	0,928	1,177	9,0	1,67	1,2168	0,1125
4,50	0,5	0,965	0,952	9,5	2,17	1,239	0,0751
5,0	0,55	1,000	0,782	11,0	3,5	1,3	0,0321
5,50	0,6	1,032	0,649	12,0	4	1,3	0,0247

Ал 3.4-осы кестелерге қарап, график тұрғызамыз және 2.8-суреттері Mathcad-тағы графигі В қосымшасында көрсетілген..



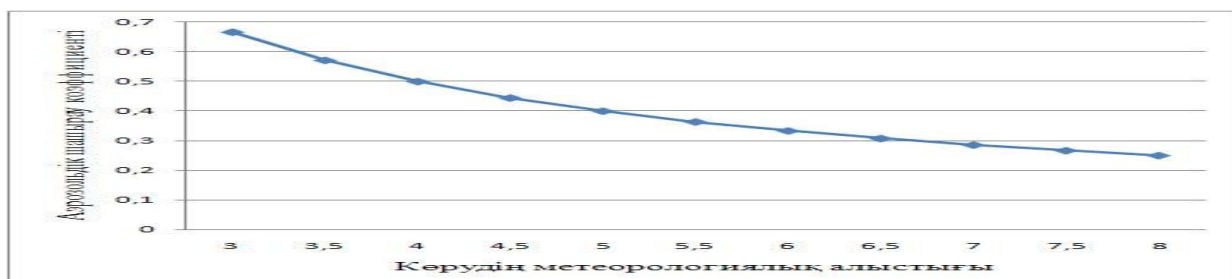
Сурет 3.7 - Аэрозольдік шашырау коэффициентінің α_p көрудің метеорологиялық алыстық шамасына V_M тәуелділік графигі

Дәлдіктері жағынан артта, бірақ оңайырақ өрнекті қолдануға болады (графиктері 3.6 және 3.7-суреттері Mathcad бағдарламасында Γ қосымшасында көрсетілген).

$$\alpha_p \cong V_M [\text{км}] \quad (3.12)$$

Кесте 3.5 - Толқын ұзындықтары 1,06 мкм үшін V_M шамасы 3-8 км аумағындағы аэрозольдік шашырау

V_M	λ	Q	α_p
3	1,60	0,843	0,6667
3,5	1,60	0,888	0,5714
4	1,060	0,928	0,5
4,5	1,060	0,965	0,4444
5	1,060	1,003	0,4
5,5	1,060	1,032	0,3636
6	1,060	1,0630	0,3333
6,5	1,060	1,091	0,3077
7	1,060	1,119	0,2857
7,5	1,060	1,145	0,2667
8	1,060	1,170	0,25



Сурет 3.9 - Толқын ұзындықтары 1,06 мкм үшін V_M шамасы 3-8 км аумағындағы аэрозольдік шашырау V_M шамасына тәуелділік графигі

Сынақтар тәжірибелері бірнеше километр қашықтықта орналасқан ашық жарық фондағы (ақ қардың фонында) күңгірт нысаналар мұнар немесе тұман жағдайында анық пішіндері жоқ әрең айырып танылатын дақ түрінде көрінеді, егер

$$V_M \geq 1,2L \quad (3.13)$$

Бұл кезде (2.12) формуламен анықталатын шашыраудағы шекті шығындар шамасы көрінетін қашықтықта 3-8 км-де орналасқан нысанаға дейінгі қашықтыққа қарамастан, мынаны құрайды:

$$\alpha_p L(30 \pm 10) \text{есе} \quad (3.14)$$

Сол нысананың пішіні мына кезде ажыратыла бастайды:

$$V_M \geq 1,5L \quad (3.15)$$

Бұл шығынның шамасы мынаған сәйкес келеді:

$$2\alpha_p L \cong (15 \pm 5) \text{есе} \quad (2.16)$$

(3.12)-формулаларды лазерлі алыс қашықтықты өлшеуіштер ғана үшін қолданылады, олардың нысанаға жету $L < V_M$ шарты кезінде де нысананы көзбен бақылауды қамтамасыз ететін оптикалық қадалағыш көмегімен жүзеге асады және (3.12)-формулалар бойынша анықталған α_p -дің шамасы осы жағдайда (3.11)-формулалар бойынша анықталған α_p шамасына қарағанда елеулі қателер көзі болуы мүмкін.

Молекулалық жұтудың әсері.

Кесте 3.6 - Құрғақ ауа құрамы

Атмосфераны құраушылар	Тропосферадағы орташа көлемдік шоғырлануы, %	Ескерту
N_2	78,0840	Жоғарғы ионосферада бөлініп ыдырайды; төменірек деңгейлерде аралас
O_2	20,9460	95 км-ден жоғары бөлініп ыдырайды; төменірек деңгейлерде ыдырайды; төменірек деңгейлерде аралас
CO_2	$3,30 \cdot 10^{-7}$	100 км-ге дейін аралас; жоғары – бөлініп ыдырайды
He	$5,240 \cdot 10^{-4}$	110 км-ге дейін аралас; жоғары – диффузиялық бөліну
CH_4	$1,60 \cdot 10^{-4}$	Тропосферада аралас; стратосферада тотығады; мезосферада ыдырап бөлінеді
Kr	$1,140 \cdot 10^{-4}$	100 км-ге дейін аралас; жоғары – диффузиялық бөліну
H_2	$5,0 \cdot 10^{-5}$	Тропосферада және стратосферада аралас; жоғарырақ – ыдырап бөлінеді
H_2O	$3,50 \cdot 10^{-5}$	Жер бетінде елеусіз өзгереді; стратосфера мен мезосферада біртіндеп ыдырай бастайды
CO	$7,0 \cdot 10^{-6}$	Тотықтыру өнімі, құрамы өзгереді
O_3	10^{-6}	Қатты өзгерістерге ұшырайды, болады фотохимиялық үрдістен пайда
NO_2	$2 \cdot 10^{-6}$	Тропосферада өнеркәсіптік; мезосфера мен ионосферада – фотохимиялық үрдістен пайда болады

Алдыңғы бөлімдерде біз сәулеленудің ортамен әсерлесуінің түрлі сипаттамаларын енгіздік: әлсіреу, жұту және шашырау коэффициенттері шашырау индикатрисасы, сәулелену коэффициенті. Осы және кейінгі тарауларда мен осы процестерді болдыратын белгілі физикалық механизмдерді қарастырамын. Бұл бізге ортаның физикалық күйінің параметрлеріне – температура және қысым, әртүрлі газдардың шоғырлануы, аэрозоль бөлшектер саны және т.б. әртүрлі сипаттамалардың тәуелділіктерін анықтауға мүмкіндік береді. Бұл тәуелділік атмосфералық ғаламшарлардың сәулелену өрістерінің әр түрлі сипаттамаларына есептеу жүргізуге қажет.

Атмосфера ең алдымен азот, оттегі және аргоннан тұрады, оның пайыздық мөлшері 3.6-кестеде көрсетілген. Одан басқа, кестеде атмосфераның су буынан басқа құрамы туралы мәліметтер келтірілген.

Атмосферада осымен бірге көрінетін және инфрақызыл толқындарына елеулі әсер етпейтін басқа газдардың орындары бар. Жеке жергілікті аудандарда көрінетін және инфрақызыл газды жұтатын, бірақ 2.6-кесте келтірілмеген газды кездестіруге болады. Мұндай аудан қосыша тағы да зерттелуі керек.

Қысымды биіктікпен азайту үшін экспоненциалды заңмен жақсы сипатталады. Су буының шоғырлануы уақыт, кеңістік бойынша өте қатты өзгереді. Алайда биіктік өскен сайын (10 км-ге дейін) ол кеміп отырады.

Бірінші жуықтауда оңашаланған молекула энергиясын мына түрде жазуға болады:

$$E = \frac{E_p + E_e + E_k + E_v}{\nu} \quad (3.17)$$

мұндағы, E_p – қозғалу жылдамдығына тәуелді және кез келген мәнді қабылдайтын қозғалыстың энергиясы;

E_e – электрон энергиясы;

E_k, E_v – тербелмелі және айналмалы энергия.

E_e, E_k және E_v тек дискреттік мәндерді қабылдайды. Олардың өзгерісі белгілі жиілікті жарықтың квантының жұтылуы немесе сәулелену қоса жүретін секіrmелі түрде жүреді.

Электрондық, тербелмелі және айналмалы энергия шамаларының реттері әр түрлі. Мысалы, электрондық өтулердің энергиясы бірнеше электрон-вольтпен, тербелмелі осы энергия электрон-вольттің ондаған және жүздеген үлесімен, ал айналмалы энергия электрон-вольттің мыңдаған және оң мыңдаған үлесімен өлшенеді. Молекулалардың электронды спектрлерінің энергия шамасы спектрдің ультракүлгін, көрінетін, тербелмелі – жақын инфрақызыл, айналмалы – алыс инфрақызыл, микротолқынды бөлігін алады.

Электрондық, тербелмелі, айналмалы спектрдің өзі жолақтар жинағына тұрады. Екі электрондық күйдің арасындағы молекула өтулерінің жиынтығына тербелмелі-айналмалы жолақ жиынтығынан тұратын электронды жолақ сәйкес келеді. Әрбір жолақтың ақырғы ені бар, спектрлі сызықтардың пішіндері үш әсердің әрекеті арқылы анықталады:

- радиациялық өшулер;
- Доплер әсерінен;
- молекулалардың соқтығысуы әсерлері.

Негізгі газдардың спектрлерін қысқаша қарастырайық.

Су булары. Су буларының тербелмелі-айналмалы спектрінің талдауы молекуланы жұтудың ең қарқынды және кең жолағы 5,5 мкм-ден 7,5 мкм-ге дейінгі аралықта жатқандығын көрсетеді. Жұтудың келесі қуатты жолағы 2,6 мкм-ден 3,3 мкм-ге дейінгі аралықта жатыр. Бұл жолақтарда атмосфераның тік бағаналарында күнгей сәулелену толық жұтылады. Жұтудың басқа тербелмелі-айналмалы жолақтарының толқын ұзындықтары басқа: 1,87; 1,38; 1,1; 0,94; 0,81; 0,72 мкм. Бірнеше әлсіз жолақ спектрдің көрінетін облыстарында бар.

Көміртегі. Толқын ұзындығы 15 мкм, жоғарғы күйдің 14 жолағынан тұратын негізгі тербелмелі-айналмалы жолақтардың бірі өте кең ауқымды, 12-ден 20 мкм-ге дейін спектр аралығында жатады. Осы жолақтың орталық бөлігінің (13,5–16,5 мкм) ауданында атмосфераның тік бағанасы күннің сәулеленуін толқы жұтады. Әдебиеттерде бұл жолақтардың жиынтығы жиі 15 мкм жолағы деп аталады. Орталығы 4,3 мкм-де тағы бір негізгі тербелмелі-айналмалы жолақтың ені 4,2-ден 4,4 мкм аралығында жатыр, оның қарқындылығы сондай жоғары, тіпті 20 км биіктікте күннің сәулеленуін толық жұтады.

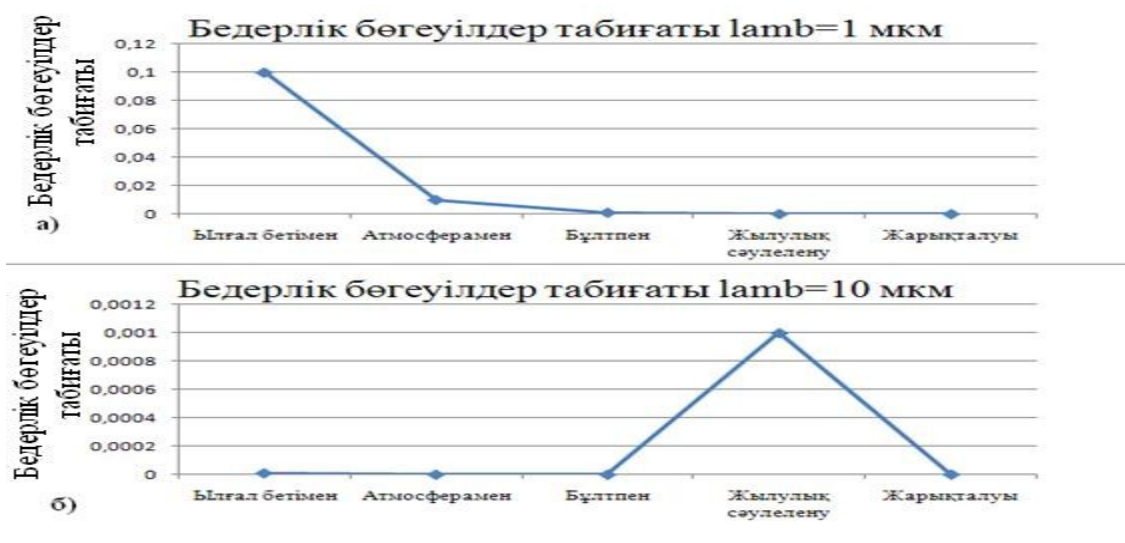
Негізгі жолақтардан басқа, орталықтары: 10,4; 9,4; 5,2; 4,8; 2,7; 2,0; 1,6; 1,4 мкм-де жатқан жұту жолақтары және 1,24-ден 0,78 мкм-ге дейінгі аралықта жатқан әлсіз жолағы бар.

Озон. Озон молекулалары орталықтары: 9,1; 9,6; 14,1 мкм-де жатқан жұту жолақтары бар. Озон молекулаларының обертондары (жаңа өң берушілері) мен құрама жиіліктері осы молекуланың тербелмелі-айналмалы жолақтарының орталықтары: 2,7; 3,27; 3,59; 4,75; 5,75 мкм, бұлардың ішіндегі ең қарқындысы 4,75 мкм. O_3 -тің 9,6 мкм-дегі жұту жолағы 8-13 мкм атмосфераның ұзын тоқынды мөлдір «терезесінің» орталығында орналасады. Ені 1,0 мкм-ге жуық оның орталық бөлігі атмосфераның тік бағанасында күннің сәулеленуінің жартыға жуық шамасын жұтады.

Атмосферадағы молекулалардың барлық жұту жолақтарын есеп алу өте қиын тапсырма болып табылады. Екі жол арасындағы: атмосфераның физикалық моделін құру және тәжірибелік мәндерін алу нәтижесінде молекулалық жұтуды есепке алу және оны экстраполяциялау (құбылыстың бір бөлігін байқаудан алынған қорытындыларды оның екінші бөлігіне қолдануға саятын ғылыми зерттеулер әдісі).

3.4 Атмосферадағы бір түсті бөгеуілдер

Спектрдің инфрақызыл аймағында атмосфера мен жер бетінен жылу сәулелену энергиясының үлесі айқындала бастайды. Жылу сәулеленуі мен күндік шашыраған, шағылысқан сәулеленулердің үлестерінің қатынасы күндізгі уақытта түсті бөгеуілдер деңгейінде көптеген факторларға (атмосфера күйі, бақылау шарттары, күн орналасуы, т.б.) тәуелді. Сонда да барлық жағдайларда 4 мкм-ден көп аймақта атмосфераның және жер бетінің сәулеленуі 10 мкм-ге жуық сәулелену облысында басым болады (3.11-сурет).



Сурет 3.11 - Әртүрлі жаратылысы бөгеуілдер үшін бедердің ең үлкен жарықтығы

3.5 Арнаны есептеу

Есептеудің берілген әдісі кіші және орташа (1000 м-ге дейін) қашықтықтар үшін қолданылады. Көптеген арақашықтық үшін атмосферада таралатын оптикалық сигналға әсер ететін осы көптеген факторларды есепке алуға болады. Есептеулерді жеңілдету үшін мына жорамалдарды енгіземіз:

- Есептеулер сәулелендіруші диодтардағы ақпаратты тарату жүйелері үшін атмосфералық арна бойынша жүргізіледі;
- Релеев шашырауын елемеуге болады;
- Таралудың сызықсыз әсерлерін есепке алмаса болады;
- Шашыраудың алдыға қарай мультипликативтік бөгеуілдерін елемеуге болады;
- 10 км-ге дейін биіктік үшін көлбеу жолда сигнал өшуі 0 км биіктіктегі тура сондай қашықтықты көлденең жолдағы сигнал өшуінен азырақ;
- Сигнал қарқындылығының ауытқу спектрі 0-ден 5000 Гц аралығында жатады;

- Атмосфера турбуленттігінен сәуленің ең үлкен ауытқуы – 1 мили рад;
- Таңдап алынған мөлдір терезеде молекулалық жұтудың қуатты жолақтары жоқ.

Молекулалық жұтулар жайлы мәліметтерге сүйеніп, оптикалық сигналды тарату үшін келесі «мөлдір терезелерді» бөліп қарауға болады:

400 – 1330 нм, 1200 нм-ді санамағанда; 1520-1560 нм; 1590-2200 нм; 3000-3300 нм толқын ұзындығында; 4100-4700 нм.

Ең көп қызықты 400-1330 нм «терезелері» шақырады, бұл көрінетін және жақын инфрақызыл аралық бөлігі. Осы күні жұмыс толқын ұзындығы берілген аралықта жататын сәулелену көздерінің көптеген саны жасалған. Сәулелендіруші элементтер ретінде алюминий қосылған арсенид галлий негізіндегі сәулелендіруші диодтарды (ЖСД), оның сәулелену спектрі 870 нм±25 нм арасында, қолданылса, онда ол жоғарыда көрсетілген аралыққа түседі. Ары қарай барлық есептеуді жақын ИҚ-диапазонында ЖСД-да жасаймыз.

Ауа райы шарттарының әсерін есепке алу [28]. Атмосферада оптикалық сигнал әлсіреуін бағалау үшін көрушілік сияқты түсінік енгізіледі, бұл деп жарық көзінің көрінетін сәулеленуі бастапқы шамамен салыстырғанда 50 есе азаятын қашықтықтарды ν (км-де) айтамыз.

Төмендегі 3.8-кесте бойынша 850 нм инфрақызыл диапазонда атмосфералық арналар бойынша байланыс үшін ауа райының шарттарына тәуелді әдеттегі шығындар келтірілген.

Есептеу үшін қалың тұманға сәйкес келетін орташадан ең үлкен өшулікті – 60 дБ/км аламыз.

Фотоқабылдағыштағы шуылдар 3 құраушыдан тұрады:

- оптикалық атмосфералық бөгеуілдер;
- шашыраңқы шуылдар;

Кесте 3.8 - Оптикалық сигнал өшуіне ауа райы шарттарының әсері

Ауа райы жағдайлары	Өшулік, дБ/км
Күн райы ашық	0-3
Себелеген жаңбыр	3-6
Нөсер	6-17
Қар	6-26
Аз тұман	20-30
Қалың тұман	50-100
Бұлтты	300-400

– фотоэлемент пен күшейткіштің өзіндік шуылы. Шудың әрқайсысының сипаттамасын қарастырайық.

Қасиеттері мен физикалық табиғаты бойынша атмосфералық оптикалық

бөгеуілдерді екі топқа бөлуге болады:

- Атмосфера мен Жердің өзіндік сәулеленуінен, әртүрлі, соның ішінде Күн, Ай, төселген бет және т.б. бөгде жерлерден болатын атмосферада әрқашан болатын бедерлік бөгеуілдер;

- сигналдың атмосферамен әсерлесу нәтижесінде оптикалық сигналдың бұрмалануы есебінен болатын шығындар.

Бірінші топ – таралатын сигналмен қосындыланатын негізгі аддитивті бөгеуіл және уақыт бойынша тұрақты (дәлірек айтқанда, баяу өзгеретін, мысал, тәулік бойы), кездейсоқ болатын (тез өзгеретін) құраушыдан тұрады. Екі құраушы да қабылдағыштың динамикалық аралығын азайтады және сол арқылы ақпараттар таратудың бүкіл жүйесінің тиімділігін азайтады.

Бөгеуілдің екінші тобы қабылданатын сигналда көбейткіш болып табылатын аддитивті, мультипликативтік атмосфералық бөгеуілдерді құрайды. Бұл жағдайда тіркелетін сигналдардың басқа көбейткіші пайда сигнал болып табылады. Бөгеуілдердің бұл түрі таратылатын сигналдардың шамасын да, пішінін де өзгерте отырып, ақпараттық жүйесінің тиімділігін төмендетеді.

Сонымен бірге оптикалық сигналдардың қуаты ұлғаюы сигнал/шуыл қатынасының өсуіне әкелмейді. Мультипликативті бөгеуілдерге оптикалық сигналдың алға қарай бір және бірнеше рет шашырауы жатады.

Шашыраңқы шуылдар оптикалық сигналдың қабылданған кванттар санының ауытқуынан өз қарқындылығының өзгеруімен шартталған.

Фотоэлементтің өзіндік шуылдары фотоэлементтің және кіріс күшейткіштің, бірінші күшейткіш каскадтың шуылдық қасиеттерін сипаттайды. Өзіндік шуылдар фотоэлемент түрінен және оны қосу сұлбасына, күшейткіш элементінің түріне тәуелді.

Сәуленің нормадан тыс ауытқуы 1 мрадтан аспау керек деп жасалынған жорамалдарға қарап, оптикалық таратқышты қабылдағышқа туралау кезінде сәуленің ең кіші топталу бұрышын – 2,5 мрад деп алып; сәуленің кез келген жаққа 1 мрадқа ауытқуы қабылдаштағы сигналдың жоғалуын болдырмайды.

Сәулелердің шашырау бұрышына тасушы құрылымдар, ғимараттар, грунттарды қозғалту, жел қысымын есептегенде ең қатты ықпал етеді.

Толық жарық ағынының шамалары сәулелендіруші элементті сипаттайды; және оны ешқандай оптикалық жүйелермен ұлғайтуға болмайды. Бұл жүйелердің әрекеттері тек қана жарық ағынының қайта үлестіруіне әсер тигізеді, мысалы, оның кейбір бағытына көбірек шоғырлануды үлестіруі. Осылайша жарық күштерін басқа бағыттарда сәйкесінше азайта отырып, берілген бағытта ұлғайтуға болады.

Есептеу үшін тапсырма:

Толқын ұзындықтары – 870 нм; Фотоқабылдағыш қабылдайтын толқын ұзындық аумағы – 850–900 нм; Сәуленің шашырауы – 4 мрад; Ара қашықтығы – 150 м; Қабылдағыш радиусы – 4 см; Қабылдағыш элемент ауданы – 1 см²; Қабылдағыш көру бұрышы – 0,17 рад; Қалың тұман кезінде өшулік 60 дБ/км-ден аспауы тиіс; Модуляция түрі – АМ;

Сигнал/шуыл ең аз қатынасы – 3 дБ.

Оптикалық шуыл қуатын есептейік:

$$P_n = 10^{-2} \cdot S_p \cdot \angle \alpha \cdot \Delta \lambda = 10^{-2} \cdot 1 \cdot 0,17 \cdot 0,05 = 8,5 \cdot 10^{-5} \text{ Вт}$$

Оптикалық шуылдардың қуаты $8,5 \cdot 10^{-5}$ Вт-ты құрайды.

ҚОРЫТЫНДЫ

Сонымен, атмосфера арқылы лазерлік сәуле бойынша байланысты орнату қазіргі кезде ыңғайлы болды. Ол үлкен ақпараттың көлемін 5 км-ге дейін жоғары сенімділікпен таратуды қамтамасыз етеді және «соңғы миля» мәселесін қарапайым және ыңғайлы түрде шешеді.

Вакуумда фотондық сәулелену таралған кезде оның жылдамдылығы өзгермейді. Шынайы орталарда (мысалы, ғаламшарлардың атмосфераларында және олардың беткі қабаттарында) жылдамдығын өзгертуге әкелетін сәулеленудің ортамен әсерлесуінің әр түрлі үрдістері жүреді. Сәулеленудің ортамен әсерлесу негізгі шамалары: әлсіреу, шашырау, жұту, шағылу және сыну (рефракция) болып табылады. Осы процестерге ортаның өзімен жүргізілетін генерацияны қосу қажет.

Сәулеленудің затпен әсерлесу қрытындысында заттың сәулеленуді жұту және таралу бағытынан жан-жаққа шашырауынан шығатын әлсіреу болады. Жұтудың физикалық табиғаты сәулелену энергиясының атмосфералық ауа мен аэрозольдік бөлшектердің атомдары мен молекулаларының ішкі энергиясына ауысуына байланысты. Сәулеленудің шашырауы ол аэрозольдік бөлшектерде және ауа тығыздығының ауытқуларындағы электромагниттік толқындар дифракциясымен байланысты.

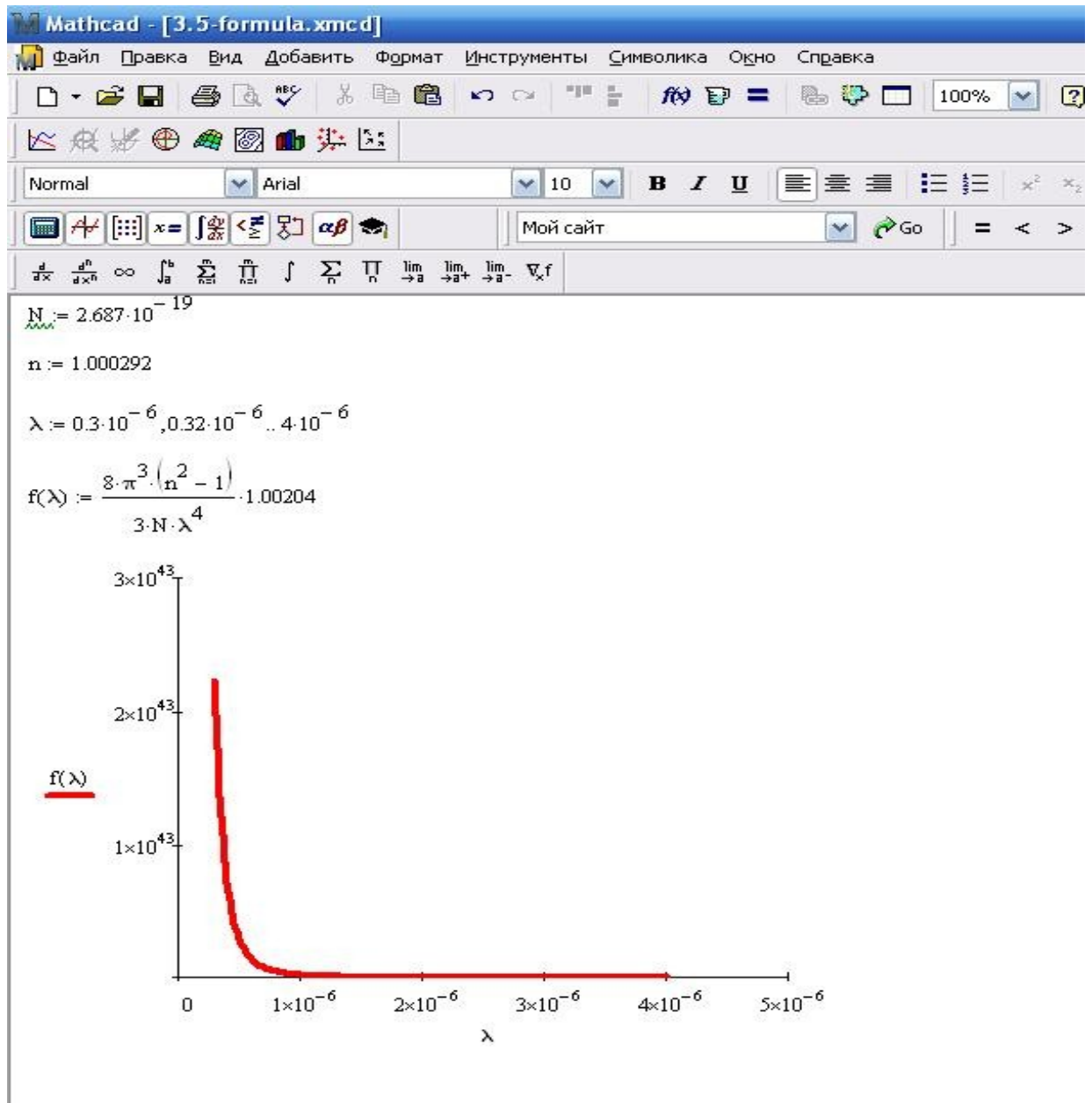
Атмосфералық байланыс желілері жүйелері байланыс арнасының тек қана «соңғы миля»-да ғана қолданылмай, сонымен басқа да талшықты-оптикалық желілерде таратуы қиын бөліктерде де: таулы аймақтарда, аэропорттарда, бір ортаның (басқару органдары, сауда орталықтары, өндірістік кәсіпорындар, университет оқу орындары, аурухана бөлімдері, құрылыс аймақтары) бөлек ғимараттар арасында; кеңістікте алыстатылған жергілікті компьютерлік желілерді құруда; ұялы желілердің байланыс орталығы мен базалық станция аралығында; кәбілді салуға, оны жөндеуге шектеулі уақыт берілгенде қолданылады. Сондықтан соңғы уақытта байланыстың осы түріне қызығушылық артуда.

ПАЙДАЛАНЫЛГАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

- 1 Ким И., Коревар Е. Доступность атмосферных оптических линий связи (АОЛС) и гибридных АОЛС/радиочастотных систем связи, Москва, - 2010.
- 2 Хан В.А., Мышкин В.Ф., Ленский В.Н., Борисов В.А., Кемельбеков Б.Ж. Передача оптического излучения через атмосферные трассы// «Электросвязь», №8. - 2010.
- 3 Крюков П. Лазер – замечательное достижение XX века //Квант. – 2007. - №3.
- 4 Albert O., Mourou G. Single optical cycle laser pulse in the visible and near-infrared spectral range // Appl. Phys. B. 2000. V.69. - N 1.
- 5 Brabec Th., Krausz F. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optics // Rev. Mod. Phys. 2000. V.72. - N 2.
- 6 Изъюрлов С.А., Козлов С.А. Динамика пространственного спектра световой волны при ее самофокусировке в нелинейной среде // Письма в ЖЭТФ. Т.71. - В.11.
- 6 Козлов С.А. Проблемы нелинейной оптики импульсов предельно коротких длительностей //Вестник молодых ученых. Серия «Физические науки». – 2000. – №1.
- 7 Шварцбург А.Б. УФН 177 43. 2007.
- 8 Кузнецов Ю.Н., Семенцов Д.И. Оптика и спектроскопия 97 647. 2004.
- 9 Кузнецов Ю.Н. Семенцов Д.И. ЖТФ 75 (11) 81. 2005.
- 10 Афанасьев С.А., Семенцов Д.И. Поток энергии при интерференции электромагнитных волн // Успехи физических наук. – 2008. – Т.178. - №4.
- 11 Тимофеев Ю.М., Васильев А.В. Основы теоретической атмосферной оптики. Учебно-методическое пособие, 2009.
- 12 Н. Hoshina, Y. Sasaki, A. Hayashi, C. Otani, and K. Kawase. Noninvasive mail inspection system with terahertz radiation. Appl. Spectr., 63(1): 2009.
- 13 http://ru.wikipedia.org/wiki/Лазеры_сверхкоротких_импульсов
- 14 http://ru.wikipedia.org/wiki/Титан-сапфировый_лазер
- 15 Беспалов В.Г., С. А. Козлов, Крылов В.Н., Фемтосекундная оптика и Фемтотехнологии - СПб: СПбГУ ИТМО, 2010.
- 16 P. C. Planken, M. C. Nuss, W. H. Knox, D. A. Miller, and K. W. Goossen. THz pulses from the creation of polarized electron-hole pairs in biased quantum wells. Appl. Phys. Lett., 61:2009–2011, 1992.
- 17 Дианов Е.М. Волоконные лазеры // Успехи физических наук. – 2004. – В.10. – 174 с.
- 18 Michael O'Connor, Bill Shiner [Excerpt: High-power fiber lasers for industry and defense--Part IV](#) EE Times (5/11/2011).

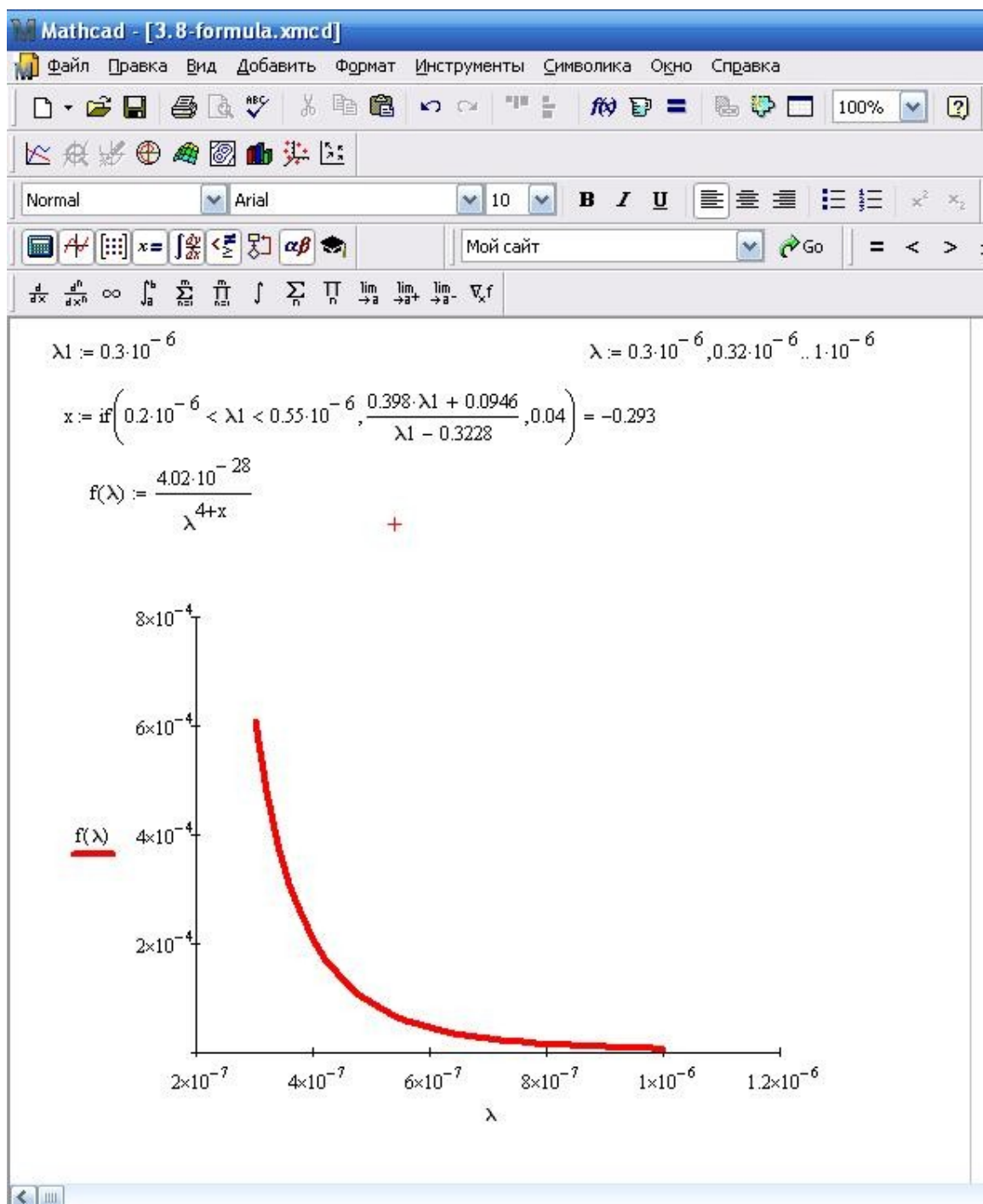
- 19 Курков А. С., Дианов Е. М. [Непрерывные волоконные лазеры средней мощности](#) // [Квантовая электроника](#). — 2004. — Т. 34. — № 2.
- 20 Вудс С., Дака М., Флин Г. [Волоконные лазеры средней мощности и их применение](#) // [Фотоника](#). — 2008. — № 4.
- 21 <http://vivovoco.astronet.ru/VIVOVOCO/>
- 22 <http://www.mostkom.ru/>
- 23 Зуев В.Е. Перенос оптических сигналов в земной атмосфере в условиях помех.—М.: Советское радио, 2007.
- 24 Р.А. Казарян, А.В. Оганесян и др. Оптические системы передачи информации по атмосферному каналу. Под. ред. Р.А. Казаряна. М.: Радио и связь, 2005 г.
- 25 <http://laseritc.ru/>
- 26 Рутгайзер О.З. Выпускная работа на соискание степени бакалавра. Методические указания к выполнению. — Алматы: АИЭС, 2007.

ҚОСЫМША А



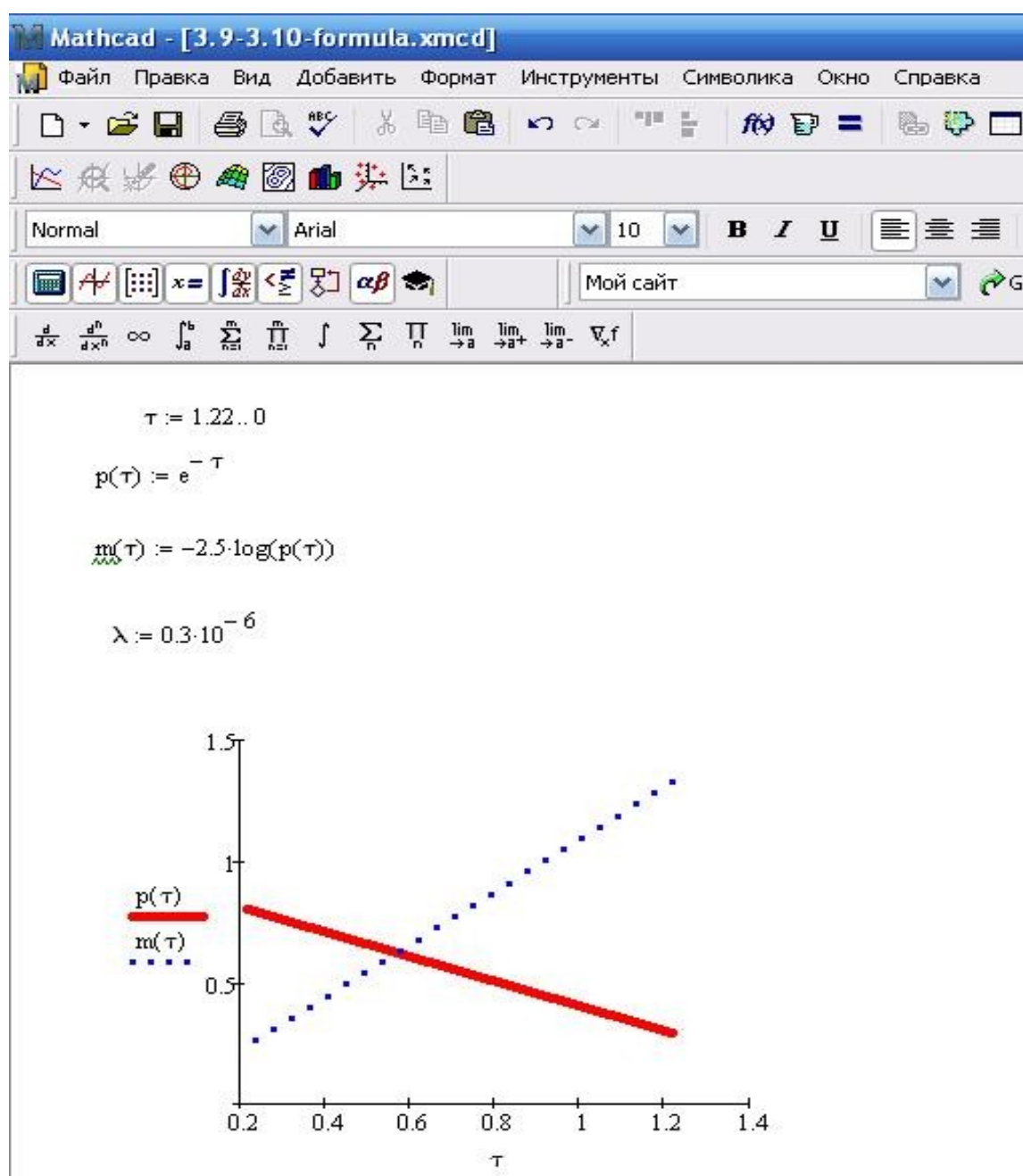
Mathcad бағдарламасында молекулалық шашыраудың коэффициенттерінің $\sigma_p(\lambda)$ жарық толқын ұзындығына тәуелділік графигі

ҚОСЫМША Ә



Жаңа тәжірибелер негізіндегі алынған молекулалық шашырау коэффициентінің толқын ұзындығына тәуелділік графигі

Б ҚОСЫМША



Өрнектің Mathcad-тағы кескіні

Дипломдық жұмысқа
РЕЦЕНЗИЯ

Өміртай Мағжан Серікұлы

5B071900 - Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар
(мамандық атауы мен шифры)

Тақырыбы: «Оптикалық байланыс жүйелерінде мәлімет ағындарын тарату».

Орындалды:

- а) графикалық бөлім парақ;
б) түсініктеме бет.

ЖҰМЫСҚА ЕСКЕРТУ

Берілген бітіру жұмысында оптикалық сәулелердің атмосферада таралуы, импульстердің бөгеуілге ұшырауы, интерференциялық ағын көмегімен мәлімет тарату, ұзақтығы қысқа импульстер сипаттамасы қарастырылады.

Оптикалық сәуленің атмосферада таралуы, электромагниттік толқындардың әсері талданған.

Дипломдық жұмыста оптикалық сигналдардың релеевтік шашырауы, атмосферадағы бөгеуілдер түрлері қарастырылып, қысқа импульстердің дисперсиялық жайылуына студент өз тарапынан қандай жақсартулар енгізуі мүмкіндігін көрсете алмаған. Кейбір орфографиялық қателер кездеседі.

Графикалық және мәтіндік материалдар МСТҚ талабына сәйкес жазылған.

Бұл дипломдық жоба жоғарға оқу орындарының талаптарына сай жеткілікті жоғарғы дәрежеде жазылған, алынған нәтижелер – желілерді құруды талдау және салыстыру технологиялардағы ғылыми бағытқа жауап береді.

ЖҰМЫСТЫҢ БАҒАСЫ

Жалпы, дипломдық жобаға "өте жақсы" (95%) деген баға, ал студент Өміртай Мағжан 5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы бойынша техника және технологиялар «бакалавры» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Пікір беруші

А.С.Байкенов

Алматы Энергетика және байланыс
университетінің, ТКС каф. меңгерушісі,
техн. ғыл. канд-ы

«23» 04 2019 ж.

**ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ
ПІКІРІ**

Дипломдық жұмыс
(жұмыс түрлерінің атауы)

Өміртай Мағжан Сабитқызы
(оқушының аты жөні)

5B071900-Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар
(мамандық атауы мен шифры)

Тақырыбы: «Оптикалық байланыс жүйелерінде мәлімет ағындарын тарату».

Берілген бітіру жұмысында атмосфера бойынша оптикалық сәулелерді тасымалдауды талдау барысы қарастырылған.

Жұмыста сонымен қатар, қысқа импульстерді жіберу жолдары, импульстер ағынын шығару мен күшейтуге арналған құрылғылардың құрылысы көрсетілген, осындай сигналдардың ұзақтығын өлшеу есептеулері, әлсіреудің әр түрі үшін атмосфера арқылы оптикалық сигналдың қуаты, ұзақтығы шектеулі импульстердің өзгерістер графиктері келтірілген.

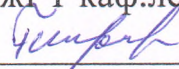
Соңғы уақытта атмосфералық оптиканың дамуы оның іс-жүзінде қолдану аясының кеңеюіне байланысты. Бұл оптикалық құрылғылар жасау және электромагниттік толқындардың инфрақызыл диапазонында «алыс» қашықтықтарды игеру саласындағы жетістіктерге жетумен ғана емес, сонымен қатар Жердің табиғи ресурстарын зерттеу мәселесі аясындағы инженер-мамандар қызығушылығының өсуімен де байланысты.

Дипломдық жұмыста қарастырылған мәселелер өте орынды.

Жалпы, дипломдық жобаға "өте жақсы" (95%) деген баға, ал студент Өміртай Мағжан 5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы бойынша техника және технологиялар «бакалавры» академиялық дәрежесіне ұсынылады.

Ғылыми жетекші

ЭТЖҒТ каф.лекторы

 Тирижанова М.Б.
(қолы)

«25» 04 2019 ж.

**ҒЫЛЫМИ ЖЕТЕКШІНІҢ
ПІКІРІ**

Дипломдық жұмыс
(жұмыс түрлерінің атауы)

Өміртай Мағжан Сабитқызы
(оқушының аты жөні)

5B071900-Радиотехника, электроника және телекоммуникациялар
(мамандық атауы мен шифры)

Тақырыбы: «Оптикалық байланыс жүйелерінде мәлімет ағындарын тарату».

Берілген бітіру жұмысында атмосфера бойынша оптикалық сәулелерді тасымалдауды талдау барысы қарастырылған.

Жұмыста сонымен қатар, қысқа импульстерді жіберу жолдары, импульстер ағынын шығару мен күшейтуге арналған құрылғылардың құрылысы көрсетілген, осындай сигналдардың ұзақтығын өлшеу есептеулері, әлсіреудің әр түрі үшін атмосфера арқылы оптикалық сигналдың қуаты, ұзақтығы шектеулі импульстердің өзгерістер графиктері келтірілген.

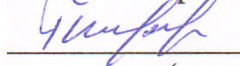
Соңғы уақытта атмосфералық оптиканың дамуы оның іс-жүзінде қолдану аясының кеңеюіне байланысты. Бұл оптикалық құрылғылар жасау және электромагниттік толқындардың инфрақызыл диапазонында «алыс» қашықтықтарды игеру саласындағы жетістіктерге жетумен ғана емес, сонымен қатар Жердің табиғи ресурстарын зерттеу мәселесі аясындағы инженер-мамандар қызығушылығының өсуімен де байланысты.

Дипломдық жұмыста қарастырылған мәселелер өте орынды.

Жалпы, дипломдық жобаға 5B071900 – Радиотехника, электроника және телекоммуникация мамандығы бойынша алдын-ала қорғауға ұсынылды.

Ғылыми жетекші

ЭТжҒТ каф.лекторы

 Тирижанова М.Б.
(қолы)

«25» 04 2019 ж.