

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ ва
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРИШ БЎЙИЧА
16.07.2013.Т/ФМ.29.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ

ИНОГАМОВ АКМАЛ МУРАТОВИЧ

**ОПТИК ТОЛАЛАРНИ КАМЁБ ЕР ЭЛЕМЕНТЛАРИ
БИЛАН МОДИФИКАЦИЯЛАШ УСУЛЛАРИ
ВА УЛАРНИНГ СПЕКТРАЛ ТАВСИФИ**

**05.04.02 – Радиотехника, радионавигация, радиолокация ва телевидение тизимлари
ва қурилмалари. Мобиль, тола-оптик алоқа тизимлари
(техника фанлари)**

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент - 2016

Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской диссертации
Content of the abstract of doctoral dissertation

Иногамов Акмал Муратович

Оптик толаларни камёб ер элементлари билан модификациялаш усуллари
ва уларнинг спектрал тавсифи5

Иногамов Акмал Муратович

Методы модификации оптических волокон редкоземельными элементами
и их спектральные характеристики29

Akmal Inogamov

Modification methods of optical fibers with rare earth elements and their
spectral characteristics.....55

Эълон қилинган ишлар рўйхати

Список опубликованных работ
List of published works.....79

**ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ ва
ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ
ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ ДАРАЖАСИНИ БЕРИШ БЎЙИЧА
16.07.2013.Т/ФМ.29.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ТОШКЕНТ АХБОРОТ ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ УНИВЕРСИТЕТИ

ИНОГАМОВ АКМАЛ МУРАТОВИЧ

**ОПТИК ТОЛАЛАРНИ КАМЁБ ЕР ЭЛЕМЕНТЛАРИ
БИЛАН МОДИФИКАЦИЯЛАШ УСУЛЛАРИ
ВА УЛАРНИНГ СПЕКТРАЛ ТАВСИФИ**

**05.04.02 – Радиотехника, радионавигация, радиолокация ва телевидение тизимлари
ва қурилмалари. Мобиль, тола-оптик алоқа тизимлари
(техника фанлари)**

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент - 2016

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида 30.09.2014/В2014.5.Т329 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Тошкент ахборот технологиялари университетида бажарилган.
Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) Илмий кенгашнинг веб-саҳифасига (www.tuit.uz) ва «ZIYONET» таълим ахборот тармоғида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	Раджабов Тельман Дадаевич физика-математика фанлари доктори, профессор
Расмий оппонентлар:	Абдукаюмов Абдурашид Абдулхаирович техника фанлари доктори, профессор Бахромов Саъдулла Абдуллаевич физика-математика фанлари доктори, профессор Рахимов Неъматжон техника фанлари доктори, профессор
Етакчи ташкилот:	«UNICON.UZ» Фан-техника ва маркетинг тадқиқотлари маркази

Диссертация ҳимояси Тошкент ахборот технологиялари университети ва Ўзбекистон Миллий университети ҳузуридаги 16.07.2013.Т/ФМ.29.01 рақамли Илмий кенгашнинг 2016 йил « 25 » февраль соат 10⁰⁰ даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100202, Тошкент ш., Амир Темур кўч., 108. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

Докторлик диссертацияси билан Тошкент ахборот технологиялари университетининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (_____ рақами билан рўйхатга олинган). Манзил: 100202, Тошкент ш., Амир Темур кўчаси, 108. Тел.: (99871) 238-64-43).

Диссертация автореферати 2016 йил « 25 » январь куни тарқатилди.
(2016 йил « ____ » _____ даги _____ рақамли реестр баённомаси).

Х.К.Арипов

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш раиси ф.-м.ф.д., профессор

М.С.Якубов

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш илмий котиби т.ф.д., профессор

Т.Н. Нишонбоев

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси
т.ф.д., профессор

Кириш (докторлик диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Жаҳонда ахборот коммуникация технологияларининг оптик толали алоқа линияларининг маълумот ўтказувчанлик қобилиятига боғлиқ бўлиши, телекоммуникацион, радиотехник ва мобил алоқа тизимлари бозорини изчил суръатларда ривожланиши оптик толаларни камёб ер элементлари билан модификациялаш усуллари қўллаган ҳолда алоқа тизимлари конвергенция тугунларини юқори тезликдаги трафик билан боғлайдиган базавий оптик тармоқнинг ўтказиш қобилиятини оширишни тақозо этади. Алоқа тизимларининг асосий сегментлари – шаҳар, магистрал, ҳудудлар аро ва локал ҳисоблаш тизимларида оптик толанинг қўлланилиши 2005 йил ҳолатига кўра 68 млн.км.ни ташкил этиб, соҳалар бўйича ўсиш даражаси 15% га ошган. Оптик толани ишлаб чиқиш ва ундан фойдаланиш миқдори 2012 йилга келиб 225 млн.км ни ташкил этди. Шундан 35-36 млн.км Японияга, 100 млн.км Хитой халқ республикасига, 32 млн.км АҚШ, 26 млн.км Европа иттифоқи давлатларига тўғри келади.

Телекоммуникация тармоқларида кенг полосали LTE (Long Term Evolution) тўртинчи авлод мобил алоқа тизимлари технологиялари амалиётга тадбиқ этилмоқда. Халқаро уяли алоқа ташкилотлари 3GPP (3rd Generation Partnership Project) ва IMT-Advanced талабларига кўра тўртинчи авлод мобил алоқа тизимларида ҳар бир абонент учун ахборотни узатиш тезлиги 1Гбит/секунддан паст бўлмаслиги зарур. Камёб ер элементлари билан модификацияланган оптик толали алоқа тизимларини ишлатилиши уяли операторлар базавий станцияларини юқори тезликдаги алоқа билан таъминлайди ва мобил операторлар базавий станциялари хизмат кўрсатувчи абонентлар сонини орттиришга имкон беради.

Шу боис телекоммуникацион, радиотехник ва мобил алоқа тизимларида оптик толаларни камёб ер элементлари билан модификациялаш, кварцли резонатор ва вакуумда бошқаришли термик буғлантириш усулини қўллаган ҳолда оптик толаларни модификациялаш, оптик тола очик ўзагининг сиртида ҳосил қилинадиган кўп компонентли оптик юпқа қатламлар қалинлиги ва таркибини юқори аниқликда назорат қилиш, эрбий, иттербий, кремний ва алюминий оксидларини бир вақтнинг ўзида вакуум шароитида бошқаришли буғлантириш, эрбий ионларининг кластерланишини сўндириш хусусиятига эга структуралар намуналарини тайёрлаш ва шакллантирилган қатламларда эрбий ионларининг юқори концентрациясини (10^{20} - 10^{21}) см⁻³ олиш, оптик толанинг локал очик ўзагида вакуум муҳитида термик буғлантириш усули ёрдамида олинган Er₂O₃ - Al₂O₃ - SiO_x ва Er₂O₃ - Yb₂O₃ - Al₂O₃ - SiO_x, (1<x<2) кўп компонентли таркиб билан легирланган модификацияланган оптик толалар спектрал характеристикаларини аниқлаш, камёб ер элементлар актив ионларининг юқори концентрациясига (10^{20} - 10^{21}) см⁻³ эга бўлган самарали планар ва оптик толали кучайтиргичларни яратиш, эрбий ионларининг юқори концентрацияли модификацияланган оптик толалар асосида яратилган оптик кучайтиргичларда паст шовқин-фактори ва юқори

OSNR (Optical signal noise ratio) параметрини таъминлаш муаммоларини ечишга йўналтирилган технологик ишланмалар асосида оптик толали материалларни қайта ишлаш ва оптоэлектрон тизимларида ахборот узатиш усуллари ишлаб чиқиш долзарб масалалардан бири ҳисобланади.

Модификацияланган оптик толаларда актив эрбий ионларининг юқори концентрациясини ҳосил қилиш, оптик толани самарали модификациялаш жараёнларини такомиллаштириш, самарали қисқа масофали оптик кучайтиргичларни яратиш учун вакуумда кўп компонентли юпка қатламларни термик буғлантириш, ҳамда оптик толаларни эрбий, иттербий, кремний ва алюминий оксидларини бошқаришли бўғлантириш орқали модификациялаш усуллари ишлаб чиқиш муҳим аҳамият касб этади.

Ўзбекистон Республикаси Президентининг 2012 йил 21 мартдаги ПҚ-1730-сон «Замонавий ахборот-коммуникация технологияларини жорий этиш ва янада ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида»ги Қарори, ҳамда Вазирлар Маҳкамасининг 2015 йил 4 декабрдаги 353-сон «2016 - 2018 йиллар даврида Ўзбекистон Республикасида электрон тижоратни ривожлантириш концепциясини тасдиқлаш тўғрисида»ги қарорида белгиланган вазифаларни муайян даражада амалга оширишга мазкур диссертация тадқиқоти хизмат қилади.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Мазкур диссертация республика фан ва технологиялари ривожланишининг қуйидаги устувор йўналишларига мос равишда бажарилган: ИТД-5-«Жамиятни ахборотлаштириш даражасини оширишга йўналтирилган илмий ҳажмдор ахборот технологияларни, телекоммуникацион тармоқларни, аппарат-дастурий воситаларни интеллектуал бошқариш, ўқитиш усуллари ва тизимларини ишлаб чиқиш»; ИТД-4-«Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш усуллари ривожлантириш, илғор технологиялар, фотоника ва нанотехнологиялар асосида технологиялар ва қурилмалар яратиш».

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи. Оптик толали ахборот узатиш воситаларини ишлаб чиқиш ва амалда қўллаш, оптик толали алоқа линиялари тизимларини технологик жараёнларини такомиллаштириш ва спектрал характеристикалари самарадорлигини оширувчи оптик толаларни камёб ер элементлари билан модификациялаш усуллари ишлаб чиқиш йўналишида жаҳоннинг етакчи мамлакатларининг илмий марказлари ва олий таълим муассасаларида, жумладан, ITU-T (International Telecommunication Union) халқаро электр алоқа иттифоқи (АҚШ), Fukurawa, Sumitomo, Fujikura (Япония), Corning Optical Communications (АҚШ), Alcatel (Франция), ЗАО «Оптиковолоконные Системы» (Россия), Dutch Fiber (Германия), Draka (Дания), Samsung (Жанубий Корея) ва Pirelli (Италия)ларда кенг қамровли илмий-тадқиқотлар олиб борилмоқда.

Камёб ер элементлари билан модификациялаш усуллари қўллаган ҳолда оптик толаларнинг маълумот узатиш сифат кўрсаткичларини ошириш,

янги авлод самарали оптик кучайтиргичларни ишлаб чиқиш бўйича жаҳонда қатор илмий натижалар, жумладан: оптик толаларни камёб ер элементлари асосида модификациялаш усуллари ишлаб чиқилган ALCATEL-LUCENT (Франция), NOKIA-SIEMENS (Финляндия); камёб ер элементларини оптик мухитлар билан модификациялаш жараёнини мукаммаллаштириш асосида оптик толали кучайтиргичлар яратилган ZTE, HUAWEI (Хитой халқ республикаси); суяқ кристаллар асосида оптик сигналларни турли йўналишларда бошқаришли узатиш усуллари ишлаб чиқилган CISCO, FINISAR (АҚШ); энергетикада ва автоматикада камёб ер элементлар билан модификацияланган оптик толаларни амалда қўллаш усуллари таклиф этилган ISKRA (Словения); модификацияланган оптик толаларни андазалари яратилган ОПТЕЛ, Натекс, Zelax (Россия).

Камёб ер элементлари билан модификацияланган оптик толалардан фойдаланилган ҳолда оптик толали алоқа линияларининг спектрал самарадорлиги ва ўтказиш қобиляти афзалликларини ошириш, жумладан, узок масофага юкори тезликда ахборотларни оптоэлектрон регенерациясиз узатиш, самарали оптик сигналлар кучайтиргичларини яратиш ва уларни телекоммуникацион, радиотехник, мобил алоқа тизимларига жорий этиш каби муаммоларни ечишга қаратилган устувор йўналишларда бугунги кунда фундаментал, амалий ва инновацион лойиҳалар асосида бир қатор илмий тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Муаммонинг ўрганилинганлик даражаси. Оптик толаларни камёб ер элементлари билан модификациялашнинг назарий ва амалий масалаларини ечишда ион-плазма, вакуум технологиялари, оптика, маълумотларни узатиш назарияси ва радиоқурилма тизимларида қўлланиладиган, вакуумда термик буғлантириш, модификацияланган оптик толалар параметрларини спектрал тадқиқ қилиш, термик буғлантириш ёрдамида ҳосил қилинаётган қатлам қалинлигини назорат қилишнинг радиочастотали усуллари ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш масалалари бир қатор олимлар: G.P.Agrawal (University of Rochester), A.Girard (EXFO Electro-Optical Engineering), A.J.Morrow, A.Sarkar, P.C.Schultz (Research and Development Division Corning Glass Works), S.R.Nagel, J.B.Macchensey, K.L.Walker (AT&T Bell Laboratories), H.Murata (The Furukawa Electric Company), A.D.Yablon (Interfiber Analysis), Н.Н.Слепов (РФА да катта илмий ходим), А.К.Пржевуский, Н.В.Никоноров (Санкт-Петербург Ахборот Технологиялари, Механика ва Оптика Университети) ва бошқаларнинг ишларида кўриб чиқилган.

Оптик толали алоқа линияларини ишлаб чиқиш ва такомиллаштириш масалалари билан боғлиқ тадқиқотлар республикаимиз олимлари томонидан олиб борилган, жумладан: Т.Д.Раджабов, С.А.Бахромов, А.М.Назаров, А.А.Симонов, А.И.Камардин, ўз шогирдлари билан камёб ер элементларининг фотолюминесценция хусусиятларини оптик толали алоқа тизимларига тадбиқ қилишган, Ж.А.Абдуллаев, Р.И.Исаев, И.Р.Берганов оптик толали алоқа линияларининг маълумот узатиш қобилятини ошириш борасида кенг доирада илмий тадқиқот ишларини олиб борганлар. Шунга

қарамай оптик толали алоқа линияларини ишлаб чиқиш соҳасидаги кўп сонли тадқиқотларда мавжуд оптик толаларни модификациялаш масалалари тўлиқ ўз ечимини топмаган. Оптик толаларни локал модификациялаш ва камёб ер элементларнинг ионлари концентрацияси экстремал юқори даражада бўлган (10^{20} - 10^{21}) см^{-3} модификацияланган оптик толаларни яратиш бўйича олиб борилган тадқиқот ишлари санокли. Амалда модификацияланган оптик толаларни яратиш усулларида юқори ҳароратларни қўлланилиши, технологик жараёнларнинг мураккаблиги, камёб ер элементлари билан легирлаш жараёнида зарарли ва хавфли моддаларни ишлатилиши каби камчиликлар мавжуд. Бугунги кунга қадар модификацияланган оптик толаларни яратишда механик прецизион ишлов бериш ва оптик толанинг очиқ ўзагига камёб ер элементларнинг ионларини понасимон геометрия шаклида вакуумда термик буғлантириш орқали модификациялаш усуллари қўлланилмаган. Шунингдек, ўзагида камёб ер элементларининг юқори концентрацияли модификацияланган оптик тола андазасини вакуум муҳитида яратиш усули ишлаб чиқилмаган.

Оптик толаларни модификациялаш жараёнида камёб ер элементлар концентрациясини ўзгаришига боғлиқ ҳолда оптик толаларнинг спектрал характеристикаларининг динамик ўзгаришларини ўрганишга ва интеграл оптикада қўлланиладиган ихчам оптик кучайтиргичлар учун модификацияланган оптик муҳитларни яратишга бағишланган илмий изланишлар деярли олиб борилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган олий таълим муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги. Мазкур диссертация тадқиқоти Тошкент ахборот технологиялари университети илмий-тадқиқот ишлари билан боғлиқлиги қуйидаги фундаментал ва амалий лойиҳаларда акс эттирилган: БВ-Ф2-002 сонли «Ахборотларни узатишнинг фундаментал асосларини тадқиқ қилиш ва солитонлардан фойдаланилган ҳолда оптик толали алоқа линияларининг тугунлари ва тизимларини ишлаб чиқиш» (2011-2013 йй.); А5-003 сонли «Алоқанинг юқори тезликли телекоммуникацион тармоғи спектрал характеристикаларини мукаммаллаштиришнинг усуллари ишлаб чиқиш» (2012-2013 йй.).

Тадқиқотнинг мақсади камёб ер элементларига асосланиб мураккаб геометрияли кўп компонентли юпқа қатламларни вакуум муҳитида буғлантириш орқали оптик толаларни модификациялаш усуллари ҳамда камёб ер элементларининг юқори концентрацияли локал модификацияланган оптик толаларни тайёрлаш ва спектрал характеристикаларини ўлчашнинг оптик ва механик қурилмалар комплексини ишлаб чиқишдан иборат.

Белгиланган мақсадга эришиш учун қуйидаги **тадқиқот вазифалари** қўйилган:

оптик толаларни вакуумда камёб ер элементлари билан модификациялаш мақсадида оптик толаларнинг намуналарини тайёрлаш технологияларини такомиллаштириш ва намуналарга прецизион механик ишлов бериш қурилмасини яратиш;

модификацияланган оптик толаларда легировачи камёб ер элементларининг юқори концентрациясига эришиш мақсадида, оптик толаларнинг очик ўзагига эрбий, иттербий, кремний ва алюминий оксидларини вакуум муҳиtida бошқариладиган термик буғлантириш усулини ишлаб чиқиш;

вакуум муҳиtida камёб ер элементларини буғлантириш орқали оптик толаларда ҳосил қилинадиган кўп компонентли юпқа қатламларнинг қалинлиги ва таркибини назорат қилиш ва бошқариш хусусиятига эга бўлган вакуум қурилмаларини яратиш ва такомиллаштириш;

қисқа масофали оптик толали кучайтиргичлар ва модификацияланган оптик толалар андазасини яратиш шароитларини ўрнатиш мақсадида, оптик тола ўзагининг локал қисмида шакллантириладиган, камёб ер элементлари ионларининг юқори ($10^{20} - 10^{21}$) см^{-3} концентрацияли планар оптик нур ўтказгичларни яратиш;

вакуум муҳиtida камёб ер элементларини термик буғлантиришга асосланган модификациялаш усуллари ёрдамида яратилган кўп компонентли оптик структураларнинг таркиби ва концентрациясини аниқлаш;

камёб ер элементларининг турли ($\text{Er}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_x$ ва $\text{Er}_2\text{O}_3 - \text{Yb}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_x$) таркиблари билан модификацияланган оптик толалар спектрал характеристикаларининг қиёсий таҳлиллаш;

камёб ер элементлари билан модификацияланган оптик муҳитларда қисқа масофали оптик толали кучайтиргичларни тайёрлаш ва уларнинг кучайтириш хусусиятларини тадқиқ қилиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида бир модали оптик толалар, кўп компонентли оптик юпқа қатламлар (понасимон геометрияли планар нур ўтказгичлар), вакуумда термик буғлантириш усули ёрдамида олинган модификацияланган оптик толалар андазалари ва оптик муҳитлар асосида яратилган қисқа масофали оптик толали кучайтиргичлари олинган.

Тадқиқотнинг предмети камёб ер элементлари билан модификацияланган оптик толаларни тайёрлаш усуллари ва уларнинг спектрал характеристикалари ҳисобланади.

Тадқиқотнинг усуллари. Тадқиқот жараёнида оптик тола қобиғига прецизион механик ишлов бериш, понасимон геометрияли кўп компонентли юпқа қатламларни вакуумда ўзаги локал очилган оптик толаларнинг сиртига термик буғлантириш, ксенон лампа нурланишида модификацияланган оптик толаларни кўндаланг дамлаш, модификацияланган оптик толалар характеристикаларини спектрал тадқиқ қилиш, вакуумда термик буғлантириш ёрдамида ҳосил қилинаётган қатлам қалинлигини назорат қилишнинг радиочастотали усуллари қўлланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

оптик толаларни камёб ер элементлари билан модификациялаш мақсадида кварцли резонатор ва термик буғлантириш усулини қўллаган ҳолда вакуумда бошқаришли буғлантириш услуги ишлаб чиқилган;

оптик тола очик ўзагининг сиртида ҳосил қилинадиган ($\text{Er}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_x$ ва $\text{Er}_2\text{O}_3 - \text{Yb}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_x$) кўп компонентли оптик юпқа қатламлар

қалинлиги ва таркибини юқори аниқликда назорат қилувчи эрбий, иттербий, кремний ва алюминий оксидларини бир вақтнинг ўзида вакуум шароитида бошқаришли буғлантириш услуги ишлаб чиқилган;

эрбий ионларининг кластерланишини сўндириш хусусиятига эга структуралар намуналарини тайёрлаш ва шакллантирилган қатламларда эрбий ионларининг юқори концентрациясини ($10^{20} - 10^{21}$) см^{-3} олишни таъминловчи оптик толаларни вакуум муҳитида модификациялаш усули яратилган ва экспериментал синовдан ўтказилган;

реактив газ (кислород) атмосферасида вакуумнинг 0,25-0,35 Па ((2-3)· 10^{-3} мм сим.уст.) босим қийматларида металл эрбий ва алюминийнинг бир вақтда буғлантириш усулини қўллаш ёрдамида вакуум муҳитида модификацияланган оптик толаларнинг намуналари, оптик толали алоқа линиялари учун амалий аҳамиятга эга эрбий ионларининг (Er^{3+}) ~1540 нм тўлқин узунлиги диапазонида интенсив фотолюминесценция (нур тарқата олиш қобилияти) мавжудлиги исботланган;

юқори тезликли оптик толали алоқа линияларида қўлланиладиган модификацияланган оптик толаларни ишлаб чиқишнинг активлаштирилган андазаларини тайёрлаш ва камёб ер элементлар актив ионларининг юқори концентрацияли (10^{20} - 10^{21}) см^{-3} самарали планар, ҳамда оптик толали кучайтиргичларни яратиш усули ишлаб чиқилган;

камёб ер элементларини активлаштириш мақсадида интеграл оптик толали тизимлар учун модификацияланган оптик муҳитларда яратилган планар оптик кучайтиргичларни кўндаланг дамлаш услуги амалда тадбиқ этилган;

модификацияланган оптик толалар ва қисқа масофали оптик кучайтиргичларнинг спектрал характеристикаларини ўрганишда экспериментал тадқиқот натижаларини экранда кузатиш ва рўйхатга олиш усуллари ишлаб чиқилган;

модификацияланган оптик толалар асосида ишлайдиган қисқа масофали оптик толали кучайтиргичларни яратишда камёб ер элементларининг концентрацияси баландлиги, кучайтиргичларнинг шовқин факторининг пастлиги ва кучайтириш коэффициент кўрсаткичини юқорилигини таъминлаш меъзонлари ишлаб чиқилган;

эрбий ионларини вакуумда бошқаришли буғлантириш орқали яратилган оптик кучайтиргичларда шовқин-факторининг пастлиги ва OSNR (Optical signal noise ratio) параметрининг юқорилиги аниқланган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси қуйидагилардан иборат:

катта эгрилик радиусли ($R=180\text{мм}$) ва берилган чуқурликда оптик толани механик ишлов беришдан иборат камёб ер элементлар билан легирлаш мақсадида оптик тола намуналарини тайёрлаш усули техник амалга оширилган;

эрбий оксиди 5 моль%, кремний оксиди 70-85 моль%, алюминий оксиди 10-25 моль% ва иттербий оксиди 5 моль% дан ташкил топган понасимон структура ва катта синдириш коэффициенти ҳисобига бир модали оптик тола ўзагидан энергияни самарали тортиб олувчи оптик тола ўзагининг очик

қисмида шакллантирилган кўп компонентли планар нур ўтказгичлар яратилган;

оптик тола ўзаги ва буғлантириш усули билан тайёрланган кўп компонентли оптик структуранинг бир бири билан нур энергиясини узатиш самарадорлиги 65-75% қийматга тенглиги ва 2-5 см узунликдаги эрбий ионлари билан модификацияланган оптик толалар оптик сигнални 5-10 дБ га кучайтириш мумкинлиги аниқланган.

эрбий ионларининг (Er^{3+}) максимал фотолюминесценция интенсивлиги хона ҳарорати ва термик ишлов берилмаган вакуумда модификацияланган оптик толалар намуналарида кузатилиши натижасида, модификацияланган намуналарнинг эрбий актив ионларининг юқори концентрацияга эга эканлиги ва кимёвий буғлантириш ёки кимёвий ишлов бериш усулларига қараганда вакуумда термик буғлантириш ёрдамида бир жинсли оптик структуралар олиш мумкинлиги исботланган;

термик буғлантириш, буғлантирилган элементларни назорат қилиш ва буғланиш интенсивлигини бошқариш каби технологик жараёнларни ягона экспериментал комплексда бирлаштирувчи оптик толаларни модификациялаш учун яратилган қурилма ёрдамида, моддий ресурсларга кетадиган сарф-харажатларни 35% га ва оптик толани қайта ишлаш вақтини 50% га камайитишга эришилган;

спектрал зичлаштирилган юқори тезликли оптик толали алоқа линиялари ораликларида модификацияланган оптик толаларни қўлланилиши, оптик кабелнинг спектрал самарадорлиги ва ўтказиш қобилятини оширишга, спектрал мультиплексирланган сигнални муайян сатҳдаги чизиқли шаклини сақлашга, узоқ масофали ораликларда кучайтиргичларсиз алоқа масофасини 100 км гача оширишга имкон берган;

вакуумда эрбий оксидини (Er^{3+}) модификациялаш асосида яратилган қисқа масофали оптик толали кучайтиргичлар 5-10 см актив оптик муҳитнинг узунлигида оптик сигнални 15 дБ гача кучайтириши, шовқин-факторининг пастлиги 1,2 дБ ва кучсиз сигнал режимларида қўлланилганда оптик кучайтиргич сезгирлигининг пастки чегараси -40дБ ни ташкил этиши аниқланган

спектрал зичлаштирилган юқори тезликли оптик толали алоқа линияларида вакуумда эрбий оксидини (Er^{3+}) модификациялаш асосида яратилган қисқа масофали оптик толали кучайтиргичларни қўллаш орқали оптик сигналнинг OSNR параметрини (оптик сигналнинг қувватини шовқинга нисбати) 3дБ га (икки марта) оширишга ва хизмат кўрсатилмайдиган кучайтириш пунктларининг сонини (1000 км ораликда кучайтиргичлар сони 15 тага тўғри келади) ошириш ҳисобига нархи юқори бўлган регенерацион қурилмаларнинг сонини 1,5 мартага қисқартиришга эришилган.

Оптик толаларнинг спектрал характеристикаларини ўлчаш ва уларни вакуумда модификациялаш учун ишлаб чиқилган усуллар ва яратилган техник воситалар локал модификацияланган оптик толаларни тайёрлаш, узоқ масофали оптик толаларни активлаштирилган андазаларини яратиш, оптик

толали алоқа тизимларида қўлланиладиган самарадор қисқа масофали кучайтиргичларни тайёрлаш, оптик маълумотларни рўйхатга олиш ва қайта ишлаш каби муаммоларини ҳал этиш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги. Амалиётда ўтказилган тажрибалар ва олинган экспериментал натижалар орқали оптик толаларни камёб ер элементлари билан модификациялашда ёруғлик оқимини модуляциялаш жараёни ва дифракцион панжара асосида ишлайдиган оптик спектр анализаторида 0,1 нм аниқликдаги ишончлиликка эришилиши, вакуум муҳитида модификацияланган намуналарда камёб ер элементларининг юқори (10^{21} см⁻³) кўрсаткичга эгаллиги рентгенли спектрал усулида ишлайдиган микрозонда текширилиши, модификацияланган оптик муҳитларда ишлайдиган қисқа масофали кучайтиргичлар миллий оператор АК «Ўзбектелеком» тармоғида амалда синалиши, назарий ва амалий тадқиқотларнинг олинган натижалари ва уларнинг ўзаро мувофиқлаштирилганлиги, ишончлилигини кўрсатади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Тадқиқотда олинган натижаларнинг илмий аҳамияти шундан иборатки, оптик толаларни камёб ер элементлари билан модификациялаш усуллари, яъни оптик толаларни спектрал характеристикалари сифатини ошириш мақсадида камёб ер элементлари билан модификациялашнинг вакуумда термик буғлантириш усул ва тамойиллари яратилди, модификацияланган оптик толаларда эрбий ионларининг кластерланишини камайтирувчи усуллари аниқланди, камёб ер элементларининг юқори концентрацияли оптик муҳитлар яратилди, турли хилдаги легировчи элементларнинг таркиби билан модификацияланган оптик толаларни спектрал характеристикалари тадқиқ қилинди, DWDM оптик толали алоқа тизимларида қўллаш учун оптик толали кучайтиргичларни назарий асослари оптик толали алоқа тизимининг маълумот узатиш қобилияти ва спектрал характеристикалари параметрларини яхшилашга хизмат қилади.

Эришилган натижаларнинг амалий аҳамияти ёруғлик оқимини модуляциялаш ёрдамида ишлайдиган оптик толали спектрометр асосида қурилган ўлчов комплекси ишлаб чиқилганлиги, оптик толаларни қобиғига прецизион механик ишлов берадиган қурилмалар ҳосил қилинганлиги, вакуумда термик буғлантириш орқали модификацияловчи қурилма ҳамда модификацияланган планар оптик тизимларни кўндаланг оптик дамлаш қурилмаси амалиётда қўлланилганлиги, замонавий оптик толали алоқа линиялари спектрал характеристикалари ва ўтказиш қобилиятини оширувчи камёб ер элементларининг юқори концентрацияли (10^{20} - 10^{21}) см⁻³ локал модификацияланган оптик толалар, оптик характеристикалари ва таркиби аввалдан аниқланган оптик толалар андазалари ва лаборатория шароитида оптик сигналларни (1529 - 1565 нм) ораликда самарали кучайтирувчи модификацияланган оптик муҳитларда ишлайдиган қисқа масофали оптик толали кучайтиргичларни самарали ишлашини таъминлашдан иборат.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Таркибида соф эрбий ва германий диоксидининг фаоллаштирилган ионлари юқори

концентрациясига эга бўлган вакуум муҳитида $1 \cdot 10^{-3}$ дан $5 \cdot 10^{-4}$ Па босими остида камёб ер элементларнинг термик буғлантириш орқали оптик толалар ярим маҳсулотини тайёрлашнинг соддалаштирилган ва зарарсиз, экологик хавфсиз усули жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси IAP 04944 ихтирога патент). Оптик толаларни вакуумда модификациялаш қурилмасида термик буғлантириш, буғлантирилган элементларни назорат қилиш ва буғланиш интенсивлигини бошқариш каби технологик жараёнларни ягона экспериментал комплексда бирлаштириш орқали олинган модификацияланган оптик тола ва оптик толали кучайтиргичлар миллий телекоммуникациялар оператори АК «Ўзбектелеком» оптик толали тармоқларига жорий этилган (Ўзбекистон Республикаси ахборот технологиялари ва коммуникацияларини ривожлантириш вазирлигининг 2015 йил 12 июндаги 02-8/2317-сон маълумотномаси). Оптик толаларни камёб ер элементлари билан легирлашда моддий ресурсларга кетадиган сарф-харажатларни 35% га ва оптик тола андазаларини яратиш вақтини 50% га камайтиришга эришилган. Қисқа масофали оптик кучайтиргичлар ва модификацияланган оптик толалар кўринишидаги натижалар, бошқарилувчи пунктлар орасидаги оралиқ масофани 30% га ошиши (1000 км оралиқда кучайтиргичлар сони 15 тага тўғри келади) ва регенерацион қурилмалар сонининг 1,5 баробар камайтириши ҳисобига йиллик иқтисодий самара 72 млн. сўмни ташкил этган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертациянинг назарий ва амалий жиҳатлари қуйидаги халқаро ва миллий семинар ва конференцияларда муҳокама қилинган: «Вакуум фани ва техникаси» (Россия, Сочи, 2010); «IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet» (Uzbekistan, Tashkent, 2008); «International conference in Central Asia on Internet» (Uzbekistan, Tashkent, 2013); «Вакуум фани ва техникаси» (Қрим, Гаспра, 2013); «Фан ва таълимда ахборот-коммуникация технологиялари» (Ўзбекистон, Тошкент, 2010); «Application of Information and Communication Technologies» (Uzbekistan, Tashkent, 2010); «IT Promotion in Asia» (Uzbekistan, Tashkent, 2011); «Алоқа техникаси ва технологиялари» (Ўзбекистон, Тошкент, 2008); «Ахборот технологиялари ва телекоммуникациялари муаммолари» (Ўзбекистон, Тошкент, 2012); «Инфокоммуникациялар ва ахборот жамиятини ривожлантиришнинг долзарб муаммолари» (Ўзбекистон, Тошкент, 2012); «XXI асрда фан ва технологиялар соҳасидаги устувор йўналишлар» (Ўзбекистон, Тошкент, 2014).

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича 25 та илмий иш, жумладан, ихтиро учун патент 1 та, 2 та хорижий илмий журналларда 2 та илмий мақола, 4 та миллий журналларда 9 та илмий мақолалар, халқаро илмий-амалий конференцияларда 12 та маъруза тезислари эълон қилинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 199 саҳифадан иборат матн, 75 та расм, 14 та жадвал ва 12 та иловадан иборат.

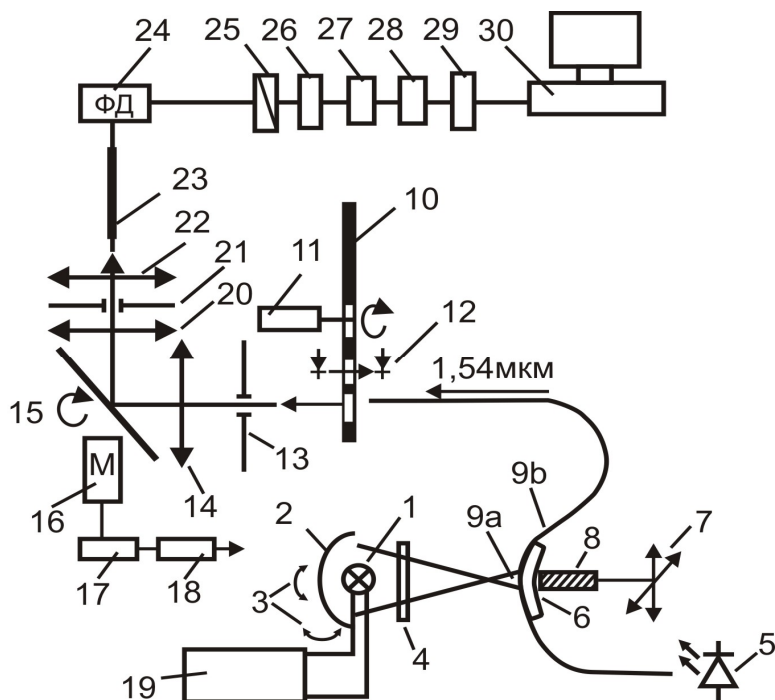
ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация тадқиқотининг долзарблиги ва зарурияти асосланган, тадқиқот мақсади ва вазифалари ҳамда объект ва предметлари тавсифланган, Ўзбекистон Республикаси фан ва технологияси тараққиётининг устувор йўналишларига мослиги кўрсатилган, тадқиқот илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиқ берилган, тадқиқот натижаларини жорий қилиш рўйхати, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар келтирилган.

Диссертациянинг биринчи **«Оптик толали алоқа линиялари тизимлари ва элементларининг ҳозирги кундаги истиқболлари таҳлили»** бобида оптик толали алоқа линиялар (ОТАЛ), уларнинг асосий компонентлари, элементлари ва тугунларининг назарий-аналитик таҳлили келтирилган. ОТАЛ тизимларида ишлатиладиган оптик толаларнинг асосий характеристикалари кўриб чиқилган. Кенг полосали радиоалоқа тизимлари, хусусан, LTE (Long term evolution) тўртинчи авлод мобил алоқа тизимларида ОТАЛ нинг қўлланилишига мисоллар келтирилган. ОТАЛ спектрал самарадорлигини ошириш учун ишлатиладиган оптик толаларни модификациялаш усулларининг таҳлили ўтказилган, камёб ер элементлари билан модификацияланган оптик толалар турлари ва эрбий, иттербий билан модификацияланган оптик толалар таҳлил қилинган. Модификацияланган оптик толаларнинг таснифланиши келтирилган ва уларнинг қўлланилиш соҳалари аниқланган. Оптик толаларни модификациялашнинг янги тамойиллари ва усулларини қидириш, камёб ер элементларининг концентрациясини ($10^{20} - 10^{21}$) см^{-3} гача ошириш, турли таркибли легировчи қўшимчалар билан модификацияланган кичик ҳажмдаги оптик тузилмаларни тадқиқ қилиш, модификацияланган оптик муҳитлар асосида самарали оптик кучайтиргичларни яратиш, оптик толаларни модификациялаш учун экспериментал қурилмаларни ишлаб чиқиш, оптик толаларни яратишнинг технологик жараёнларини такомиллаштириш, оптик толаларнинг имкониятларини кенгайтириш, лаборатория шароитларида модификацияланган оптик толаларни тайёрлаш каби масалар, ОТАЛ бўйича ўтказилган таҳлил асосида, тадқиқот ишининг муҳим вазифалари сифатида ўрнатилган ва хулосалар келтирилган.

Диссертациянинг иккинчи **«Модификацияланган оптик толаларнинг спектрал характеристикаларини тадқиқ қилиш учун ўлчов қурилмаларини ишлаб чиқиш»** боби экспериментлар натижасида олинган модификацияланган оптик толалар характеристикаларини ўлчаш усуллари ва оптик сигналларни ўлчовчи қурилмаларни ишлаб чиқишга бағишланган. Модификацияланган оптик толаларнинг спектрал характеристикаларини ўлчаш учун оптик ва механик қурилмаларни яратиш бўйича вазифа қўйилган. Иккинчи бобда ярим ўтказгичли лазерларни оптик толанинг учи билан мослаштириш услублари амалий тадбиқ этилган ва уларнинг ишчи характеристикалари келтирилган.

Камёб ер элементлари билан модификацияланган оптик толалар спектрал характеристикаларини тадқиқ қилиш учун бир модали оптик толалар ўзагига лазер нурланишини самарали киритилишини таъминлаш зарур. Оптик толанинг ўзагига лазер нурини киритиш учун қобиксиз лазер диодлари ишлатилган. Оптик тола учларига лазер нурланишларини максимал самарали киритишда Тошкент шаҳар амалий физика тадқиқот институтида ишлаб чиқилган конуслар ва микролинзаларни олиш махсус технологияси қўлланилган. Модификацияланган оптик толалар спектрларини ўрганиш мақсадида ўлчаш комплексини яратиш учун дифракцион панжара асосида ишлайдиган спектрографдан фойдаланилган (1-расм).



1-расм. Ёруғлик оқими модуляцияланган оптик толали спектрометр асосида қурилган ўлчов комплексининг функционал схемаси

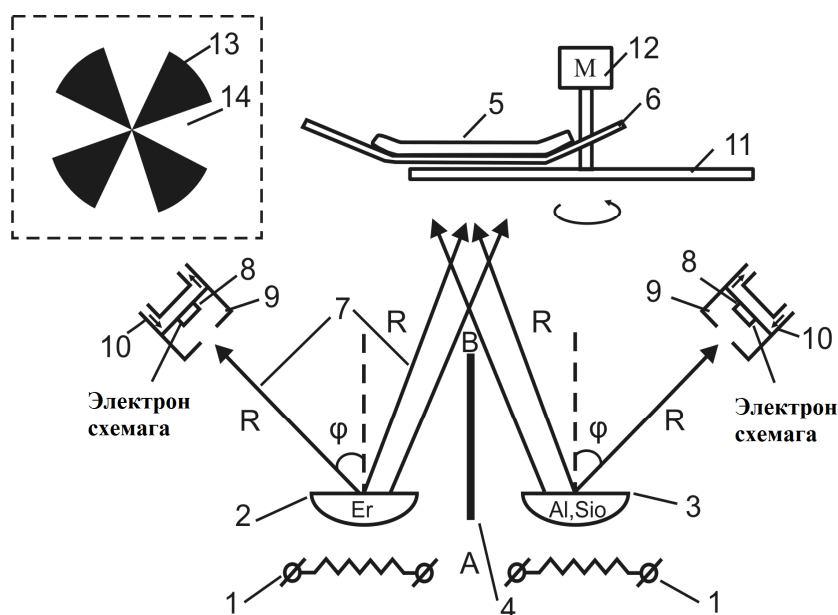
Бу ерда, 1 - ксенон лампанинг нурланиши, 2 - ярим сферик кўзгу, 3 - созлаш винти, 4 - $\lambda_{\text{пр.}} = 980$ нм параметрли интерференцион филтър, 5 - лазер нурланиши, 6 - металл таглик, 7 - созлаш столи, 8 - маҳкамлаш қисқичлари, 9а – модификацияланган оптик тола, 9b - оптик тола, 10-модуляцияловчи диск, 11-айланиш частотаси $f = 50$ айланишлар/сек га тенг бўлган двигател вали, 12-оптрон, 13 - спектрографнинг кириш тиркиши, 14 - объектив, 15 - дифракцион панжара, 16-дифракцион панжара двигатели, 17 - двигателнинг электрон блоқи, 18 - микроконтроллер, 19 - ксенон лампа таъминот блоқи, 20 - коллиматор, 21 - чиқиш оптик тиркиши, 22 - фокусловчи линза, 23 – оптик жгутнинг кириш учи, 24 - фотодиод, 25 - кучланиш кучайтиргичи, 26 – қисқа полосали филтър, 27 – ўзгарувчан кучланиш кучайтиргичи, 28 - прецизион детектор, 29 - PIC-16F873A микроконтроллер асосидаги MAX-232 микросхема, 30 - компьютернинг COM порти (RS-232).

Модификацияланган оптик толаларнинг спектрал характеристикаларини тадқиқ қилиш бўйича йиғилган қурилманинг ўзига хос хусусияти спектрограф прецизион созлаш қурилмаси билан ягона илмий-тадқиқот комплексига бирлаштирилгани ҳисобланади. Бу ўз навбатида оптик тола ўзагига лазернинг нурланишини киритиш орқали модификацияланган бир модали оптик толаларнинг спектрал характеристикаларини ўлчаш каби тадқиқотларни ўтказишга имкон беради. Ярим ўтказгичли лазер нурланиши билан бир модали оптик толанинг ўзагини самарали мослаштириш услуги ҳамда ёруғлик оқими модуляцияланган схема асосида спектрал асбобнинг такомиллаштирилиши, оптик тола ўзагига киритилган камёб ер элементлар люминесценцияси ва лазер нурланиши спектрларини юқори сезгирликда ўлчаш имкониятини таъминлади. Юқорида келтирилган оптик толалар спектрини ўлчовчи асбобларнинг такомиллаштирилиши мазкур бобда қўйилган тадқиқот вазифаларини тўлиқ қондирилишига имкон берди.

Диссертациянинг учинчи «**Оптик тола модификациялаш усуллари ва қўрилмаларини ишлаб чиқиш**» бобида оптик толаларни камёб ер элементлари билан модификациялаш учун ишлаб чиқилган усуллар ва модификациялаш жараёнини амалга оширишда ишлатилган экспериментал қурилмаларнинг тавсифлари келтирилган.

Оптик толалар ишлаб чиқаришнинг асосий усулларига юқори ҳароратда легирловчи элементлар аралашмаларини оптик тола андазасига ички ёки ташқи аксиал буғлантириш орқали легирлаш ҳисобланади. Бу жараёнлар кремний ва бошқа легирловчи материаллар бирикмаларининг юқори ҳароратда оксидланишига асосланган. Бундай оптик толалар модификациялаш усуллариининг камчилиги технологик жараёнларининг мураккаблиги, оптик толаларга юқори ҳароратда ишлов берилиши ва натижада оптик тола кристали тузилмасини бузилиши, модификацияловчи элементлар концентрациясини бошқарилмаслиги ҳисобланади. Юқорида кўрсатилган камчиликларни ҳисобга олган ҳолда, легирловчи элементларнинг турли таркибига эга бўлган кўп компонентли юпқа қатламларни вакуум муҳитида бошқаришли буғлантириш орқали ҳосил қилиш усули ишлаб чиқилган ва амалиётга жорий этилган.

Самарали эрбийли кучайтиргичларни олиш муаммоси, эрбий ионларининг юқори концентрациясига эга бўлган оптик материалларни ишлаб чиқиш борасида изланишларни тезлаштиради. Эрбий (Er_2O_3) оксидли структураларда Er^{3+} эрбий актив ионларининг концентрацияси $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$ қийматга етиши исботланган. Эрбий оксиди асосидаги оптик тузилмаларда Er ионларининг концентрацияси EDFA (Erbium doped fiber amplifier) кучайтиргичлари учун яратилган стандарт легирлаш усуллари орқали олинган оптик толалардаги Er ионлари концентрациясидан бир неча баробар ортиқ бўлишидан далolat беради. Шундай қилиб, юқорида баён этилган илмий ғояларни амалий ва экспериментал бажариш мазкур бобга қўйилган асосий мақсадлардан бири ҳисобланади. Бир вақтда икки қайиқчадан назорат қилинадиган вакуумли буғлантиришни амалга ошириш учун ишлаб чиқилган қурилманинг функционал схемаси 2-расмда келтирилган.



2-расм. Кўп компонентли юпқа қатламларни вакуум муҳитида бошқариш имкониятли буғлантириш қурилмаси

Бу ерда, 1 - резистив танталли қиздиргич, 2 - (Er) эрбий тўлдирилган контейнер, 3 - (Al) алюминий ва (SiO) кремний монооксиди тўлдирилган контейнер, 4 - экраннинг ажратувчи кесими (AB), 5 - металл таглик, 6 - ўзаги очик бўлган оптик тола, 7 - буғлантирилаётган материаллар буғларининг тарқалиш йўналиши, 8 - кварцли пьезопластина, 9 - диафрагмали қоплама, 10 - сувли радиатор, 11 - тўрт тирқишли диск-обтюратор, 12 - айланиш частотаси стабиллантирилган двигател, 13 - диск-обтюраторнинг умумий кўриниши, 14 - созлаштирилган дискдаги уч бурчакли тирқиш.

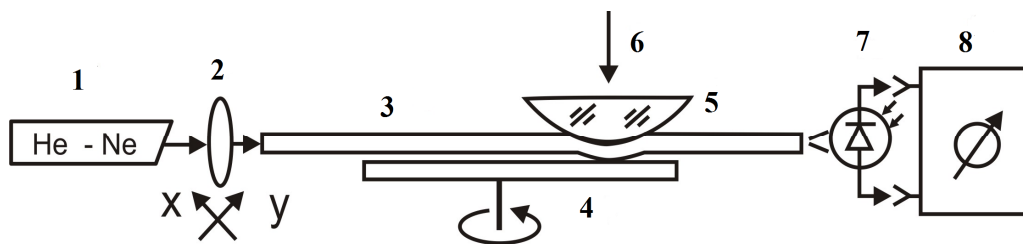
Экспериментлар жараёнида оптик толанинг локал очилган ўзагида Er_2O_3 - SiO_x - Al_2O_3 ёки Er_2O_3 - Yb_2O_3 - SiO_x - Al_2O_3 кўп компонентли қатламлар кўринишидаги модификацияланган оптик структуралар олишга эришилди. Мазкур масалаларни амалга оширишда оптик толанинг механик ишлов берилган ўзагининг сиртига металл эрбий (Er), кремний монооксиди (SiO) ва алюминий оксиди (Al_2O_3), $2\cdot 3\cdot 10^{-3}$ Па босимли вакуум муҳитида кислород реактив газини ишчи камерага киритилиши орқали биргаликдаги термик буғлантириш технологияси ишлатилган.

Кўп компонентли юпқа қатламларни вакуумда ҳосил қилиш вақтида, буғлантирилаётган юпқа қатламларнинг қалинлиги кварцли кристалнинг сиртида буғланаётган модданинг юпқа қатлами шаклланиши пайтида кварцли кристалл тебраниш частотасининг ўзгаришига асосланган радиочастотали усул қўлланилган. Шунингдек, термик буғлантиришда легирловчи элементлар жойлашган қайиқчалар кўринишидаги икки буғлантиргичлар ҳарорати мустақил бериладиган уч ҳароратли усул ишлатилган. Кварц кристаллари ҳароратнинг ўзгаришларига сезгир бўлганлиги учун, мазкур усулда пьезодатчиклар учун махсус совутиш тизими ишлатилди. Буғлантириш жараёнида резонатор частотасининг ўзгаришига буғлантиргич томонидан иссиқлик нурланиши таъсирини

компенсациялаш, буғлангирилган қатламнинг қалинлигини 5% аниқликда ўлчашга имкон беради. Эрбий ва кремний монооксидининг вакуумда буғлангирилиши ишчи газ - кислороднинг $2\cdot 3\cdot 10^{-3}$ Па босимида ва турли танталли қайиқчаларни 1300 - 1600°C ҳароратда қиздириш орқали амалга оширилди.

Модификациялаш жараёни, шунингдек параметрлари аввалдан берилган оптик толаларнинг намуналарини яратиш ва тайёрлашни ҳам ўз ичига олади. Оптик толаларни камёб ер элементлари билан модификациялашга тайёрлаш мақсадида оптик толалар ўзагининг силлиқлаш қалинлигини назорат қилиниши, оптик толалар сиртига прецизион механик ишлов бериш усули орқали амалга оширилган. Прецизион механик ишлов бериш қурилмаси бир модали оптик тола ўзагида (HE_{11}) асосий модани аниқ қайд этиш имкониятини беради. Механик ишлов бериш орқали силлиқлаш жараёнини ўтказиш учун оптик толани маҳкамлаш учун металл таглик тайёрланади. Улар 3 мм қалинликдаги, 15 мм кенгликли ва 120 мм узунликли Д1, Д19 ёки ВАД1 турдаги дюралюминий бўлақларидан иборат. Бу бўлақлар зарур айланиш радиусигача эгилади $R=180$ мм. Олмос диск ёрдамида берилган чуқурликда (0,1 мм), дюралюминий бўлақларига ариқчалар ўйилади. Ўйилган ариқчаларга оптик тола жойлаштирилади ва эпоксид елим билан қотирилади.

Ҳисоблашлар натижасига кўра, объектларнинг идеал сиртида айланиш радиусига силлиқлашда d га тенг бўлган силлиқлаш чуқурлигида L узунликдаги оралик (хорда) очилади. Бу каттталиклар орасидаги муносабат $L = \sqrt{8Rd}$ формула орқали аниқланади. Шундай қилиб, d - силлиқлаш чуқурлиги $d = L^2/8$ формула орқали ифодаланиши мумкин. Оптик толани дюралюминий пластинага (тагликка) ёпиштиришдан олдин оптик толага He-Ne лазер нурланиши киритилади ва оптик тола микроскоп остида текширилади. Оптик толанинг қобиғига прецизион механик ишлов бериш усулининг функционал схемаси 3-расмда келтирилган.

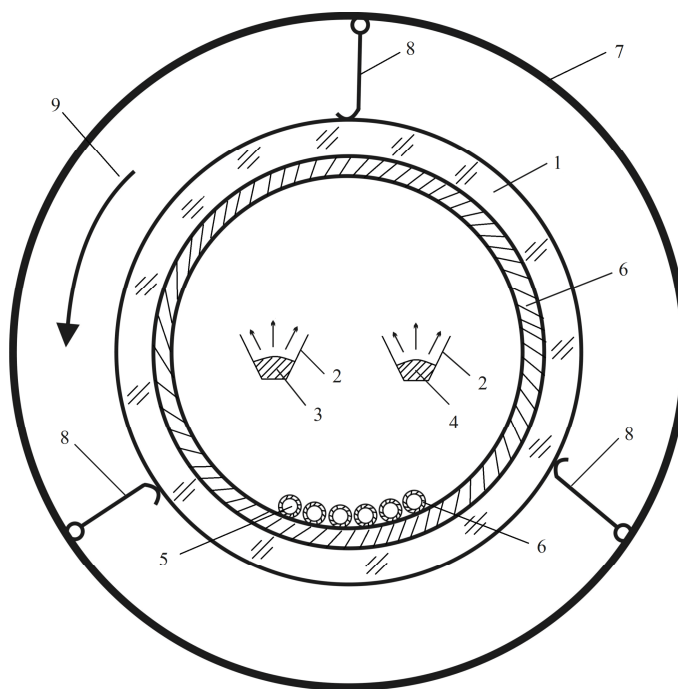


3-расм. Оптик толанинг силлиқлаш чуқурлигини прецизион назорат қилиш схемаси

Бу ерда, 1 - He-Ne лазер, 2 - созланадиган фокусловчи линза, 3 - оптик тола, 4 - силлиқловчи диск, 5 - оптик тола силлиқланган таглик, 6 - калибровкаланган юк, 7 - фотодиодли созлаш столи, 8 - оптик тестер.

Оптик тестер оптик толанинг силлиқлаш чуқурлигини самарали назорат қилишга имкон беради. Тестер рўйхатга олган қолдиқ нурланиш қуввати оптик тола қобиғи ва ўзагини силлиқлаш даражасини кўрсатади.

Иккинчи таклиф этилган усулда оптик толаларнинг модификацияланган андазаси тайёрланади. Бу усулда оптик толалар андазасини тайёрлашда захарли бирикмалар ишлатилинмайди ва барча жараёнлар вакуумда камёб ер элементлар оксидларини термик буғлантирилиши орқали амалга оширилади. Бунда камёб ер элементлар қатлами вакуум муҳитида айланаётган кварцли андаза ичига жойлаштирилган қиздирилган қайиқчалардан термик буғлантирилади. Кўп қатламли буғлантириш имконияти легирловчи элементларнинг турли вариацияларида оптик толалар андазасини яратишга имкон беради. 4-расмда таклиф этилган оптик толалар модификацияланган андазасини тайёрлаш усули келтирилган.



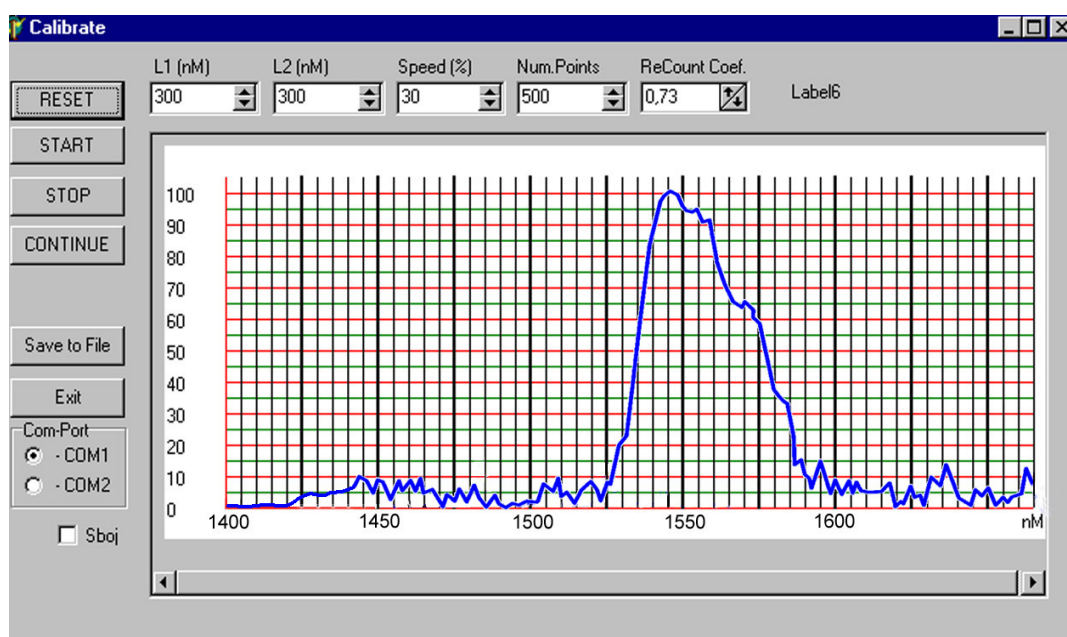
Бу ерда, 1 - айланиш имкониятига эга механик ускунага маҳкамланган кварцли шиша, 2 - электр токи орқали қиздириладиган қийин эрийдиган материалдан тайёрланган буғлантириш қайиқчалари, 3 - эрбий, 4 - германий диоксиди, 5 - кварц дисперс кукуни, 6 - буғлантирилган материаллар қатламлари, 7 - кварцли шиша маҳкамланадиган айланувчи механик ускуна, 8 - маҳкамлаш элементлари, 9 - механик ускуна айланиш йўналиши.

19

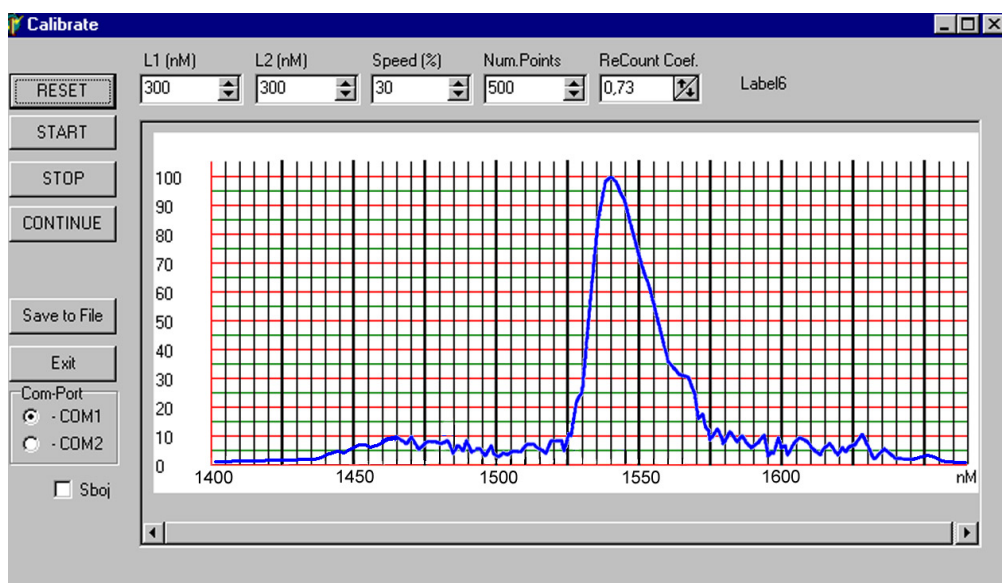
Диссертациянинг тўртинчи «**Модификацияланган оптик толаларнинг спектрал тавсифларини экспериментал тадқиқи**» бобида модификацияланган оптик толалар спектрал характеристикаларини экспериментал тадқиқотларининг асосий натижалари келтирилган. Камёб ер элементларнинг турли таркиблари билан модификацияланган оптик тола намуналарининг фотолюминесценция хоссалари тадқиқ қилинган. Оптик тола намуналарида буғлантириш йўли орқали олинган кўп компонентли қопламларнинг структура ва таркиби ўрганилган. ОТАЛ да қўлланиладиган самарали оптик толали кучайтиргичларни яратиш ва модификацияланган оптик толалар андазасини тайёрлаш бўйича амалий тавсиялар келтирилган.

Тадқиқотлар натижасида, эрбий актив ионларининг энг катта нурланиш интенсивлиги вакуумли термик буғлантириш усули ёрдамида модификацияланган оптик толалар намуналарида аниқланган. Бундан ташқари, очик оптик тола ўзагини қоплайдиган юпқа қатламни шакллантирадиган легирловчи қўшимчаларни ва эрбий ионларининг концентрациясини тўғри танлаш принципиал масалалардан бири ҳисобланади. Al_2O_3 ёки P_2O_5 оксидлари билан кварц шишасини қўшимча легирлаш, кварцли шишага қўшилган камёб ер элементларининг максимал концентрациясини оширади ва эрбий ионларининг кластерланишини пасайтиради. Мазкур диссертация ишида Er_2O_3 эрбий оксидини SiO_2 кварц шишасини ва Al_2O_3 алюминий оксиди билан биргаликда легирлаш танланган.

Модификацияланган оптик толалар намуналарининг спектрал характеристикалари тадқиқи жараёнида ~ 1540 нм ИҚ-диапазонида Er^{3+} эрбий ионларининг интенсив фотолюминесценцияси кузатилди (5 ва 6 - расмлар). Тадқиқ этилган спектрлар Er^{3+} эрбий актив ионларининг биринчи $^4\text{I}_{13/2}$ қўзғалиш ҳолатидан асосий $^4\text{I}_{15/2}$ ҳолатга ўтишига мос келади.



5-расм. Er_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 таркиб билан модификацияланган оптик толанинг люминесценция спектри



6-расм. Er_2O_3 - Yb_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 таркиб билан модификацияланган оптик толанинг люминесценция спектри

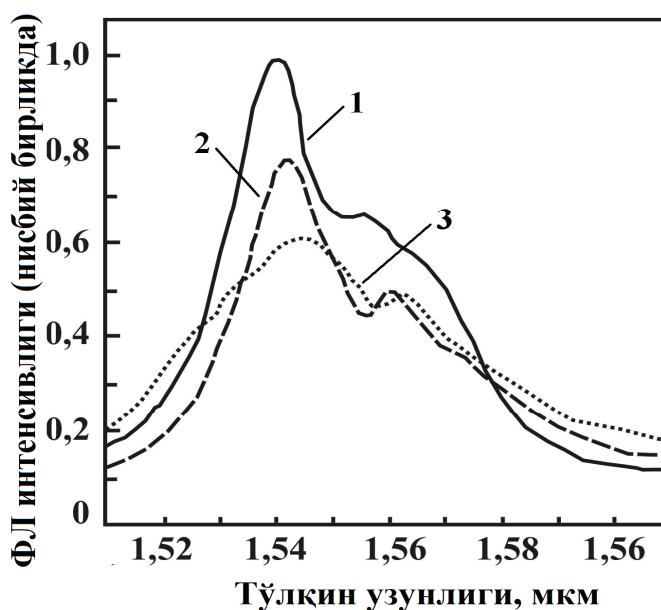
Вакуумда камёб ер элементларини модификациялаш натижасида олинган оптик толалар чиқишида, дастлабки термик ишлов беришсиз ~ 1540 нм оралиғида эрбий ионларининг фотолюминесценцияси кузатилди (5 ва 6-расмлар). Бу, камёб ер элементлар билан модификацияланган оптик мухитларда эрбий ионларнинг концентрациясини ошириш учун йўналтирилган юқори ҳароратли термик ишлов беришдан фойдаланмаган ҳолда, Er^{3+} эрбий ионларини активлаштириш имконияти мавжудлигини кўрсатади.

Тадқиқотлар жараёнида, модификацияланган оралиқлари тенг бўлган эрбий-иттербий легирланган намуналар, эрбий билан легирланган намуналарга нисбатан эрбий ионларининг юқори концентрациясига эғалиги аниқланган. Бу, иттербий ионлари 850 нм дан 1100 нм гача кенг ютиш полосасига эғалиги ва иттербий ионларининг нурлантиришсиз силжиши ҳисобига ўз энергиясини эрбий ионларига самарали узатиши орқали тушунтирилади. Натижада эрбий ионларининг 980 нм оралиқдаги ютиш диапазон кенглиги тораяди (6-расм). Намуналарни ўлчаш хона ҳароратида ($T=300\text{K}$) амалга оширилди. Спектрал характеристикалардаги оптик тола чиқишидаги қувват 100% га меъёрлаштирилган ва нисбий бирликларда тасвирланган. Модификацияланган намуналарнинг абсолют бирликлардаги люминесценцияси қуввати 0,3-0,4 мВт га тенг.

Вакуумда термик буғлантирилган қатламларнинг таркиби ЎзР ФА сининг Геология ва геофизика институтининг рентгенли спектрал таҳлил қилиш қурилмасида текширилган ва ўрганилган. Натижада тағликнинг мўътадил ҳароратларида ($150\text{-}200^\circ\text{C}$), вакуумли синтез орқали эрбий кластерланиши сўндирилган ва 2-5 см га тенг актив оралиқда юқори эрбий концентрациясига ($10^{20} - 10^{21}$) см^{-3} эга планар нур ўтказгичлар олиш имконияти аниқланган. Яратилган оптик тузилмалардаги оптик йўқотишлар

қиймати 0,15 дБ/см дан пастлиги оптик толаларни вакуумда термик модификациялаш усулларини истиқболга эга эканлигидан далолат беради.

Эрбийнинг юқори концентрациясига эга, термик эритилмаган оптик тола намуналари термик эриш босқичидан ўтган намуналарга караганда эрбий ионлари люминесценцияси интенсивлигининг юқорилиги билан фарқланади. Модификацияланган оптик тола намуналарини термик ишлов босқичидан ўтказилиши натижасида эрбий ионларининг люминесценция спектри ва кинетикасидаги ўзгаришлар 7-расмда тасвирланган.



7-расм. Er_2O_3 - SiO_x - Al_2O_3 таркиб билан модификацияланган оптик толанинг люминесценцияси ўзгариш кинетикаси

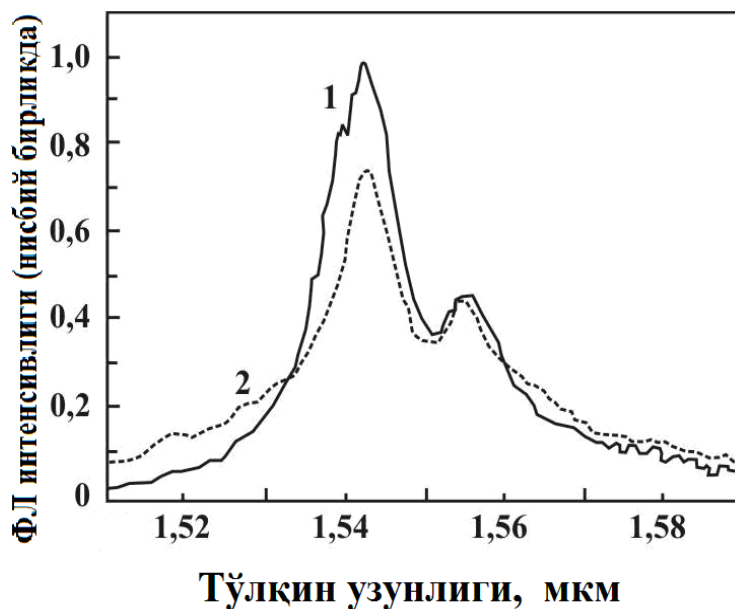
Бу ерда, 1 – термик ишлов берилмаган оптик тола намунаси, 2 – 400°C ҳароратда термик ишлов берилган оптик тола намунаси, 3 – 700°C ҳароратда термик ишлов берилган оптик тола намунаси.

7-расмдан кўриниб турибдики, камёб ер элементлари билан модификацияланган оптик тола намуналарининг термик ишлов берилиши эрбий актив ионларининг кластерланишини келтириб чиқаради. Натижада модификацияланган оптик толалар намуналарида эрбий ионларининг люминесценция спектри кенгаяди ва актив камёб ер элементлар ионларининг энергетик ўтишлари кинетикасида ап-конверсион белгилар пайдо бўлади. Бу хосса Er_2O_3 - Yb_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 таркиб билан модификацияланган оптик толалар намуналарида ҳам намоён бўлди. Камёб ер элементлари билан модификацияланган оптик толаларнинг спектрал характеристикалари оптик тола киришига ярим ўтказгичли лазер нурланиши берилганда ва бир вақтнинг ўзида ташқи оптик дамлаш амалга оширилганда ўлчанади.

Экспериментал қурилмада оптик сигнал манбаи сифатида максимал чиқиш қуввати 5 мВт ва тўлқин узунлиги 1540 нм га тенг бўлган ярим ўтказгичли лазердан фойдаланилган. Модификацияланган оптик толаларни дамлаш 980 нм тўлқин узунлигида ишлайдиган, 250 мВт нурланишнинг

қувватига эга ярим ўтказгичли лазер ёки 980 нм тўлқин узунлигидаги ИҚ-фильтр ҳамда 100 Вт қувватли ксенон лампа орқали амалга оширилган.

Тажрибаларда модификацияланган оптик толалар люминесценция ва кучайтириш хоссалари легирловчи элементларнинг концентрациясига боғлиқ ҳолда ўзгариши аниқланган (8-расм).



8-расм. Er_2O_3 - SiO_x - Al_2O легирловчи элементларнинг турли концентрацияси билан модификацияланган оптик тола спектри

Бу ерда, 1 - 10 mol.% Al_2O_3 ва 3000 ppm Er_2O_3 билан легирланган оптик муҳит, 2 - 1.5 mol.% Al_2O_3 ва 3000 ppm Er_2O_3 билан легирланган оптик муҳит.

8-расмдан кўриниб турибдики, 1 - рақамли намуна 2 - рақамли намунага қараганда юқори люминесценция даражасини намоёйиш этди. Бу ҳодиса Al_2O_3 легирлаш элементининг катта концентрацияси билан амалга оширилгани орқали тушунтирилади. Тажрибага асосан, буғлантирилган материаллар таркибида алюминий оксиди концентрациясини ортиши эрбий оксиди билан модификацияланган оптик толаларда фотолюминесценция интенсивлигини оширади ва эрбий актив ионларининг кластерланишини сўндиради. Спектрал характеристикада, оптик тола чиқишидаги қувват 100% га меъёрлаштирилган ва нисбий бирликларда келтирилган. Модификацияланган намуналарнинг люминесценцияси қуввати 0,3-0,4 мВт ни ташкил этади.

Ўтказилган тажрибалар ва ўлчашлар асосида оптик толали кучайтиргичлар квант самарадорлигини эрбий ионлари ва легирловчи аралашмалар концентрациясига боғлиқлик жадвали олинган (1-жадвал). Эрбий легирланган толали кучайтиргичларни яратишда, жадвалга асосланган ҳолда, уларнинг кучайтириш параметрларини оптималлаштириш мумкин.

Жадвалда планар ёруғлик ўтказгичининг кучайтириш самарадорлигини ўлчаш натижалари нисбий бирликларда келтирилган. Бирлик сифатида

алюминий оксиди билан максимал легирлашда ва эрбий оксиди билан оптимал легирлашдаги максимал олинган кучайтириш қабул қилинган.

1-жадвал

Кучайтиргич сифатида ишлатилган модификацияланган намуналарнинг квантли самарадорлигини аниқлаш жадвали

Er_2O_3 ppm Al_2O_3 mol.%	Кучайтириш самарадорлиги, нисбий бирликларда								
	10	50	100	250	500	1000	3000	5000	10000
0	1	0.77	0.61	0.38	0.07	—	—	—	—
1.5	1	0.94	0.92	0.79	0.60	0.29	0.02	—	—
2.5	1	0.98	0.96	0.92	0.80	0.69	0.30	0.13	—
10	1	0.98	0.96	0.94	0.85	0.73	0.34	0.15	0.03
15	1	1	0.98	0.96	0.91	0.81	0.43	0.23	0.10
18	1	1	1	0.98	0.96	0.88	0.56	0.32	0.18

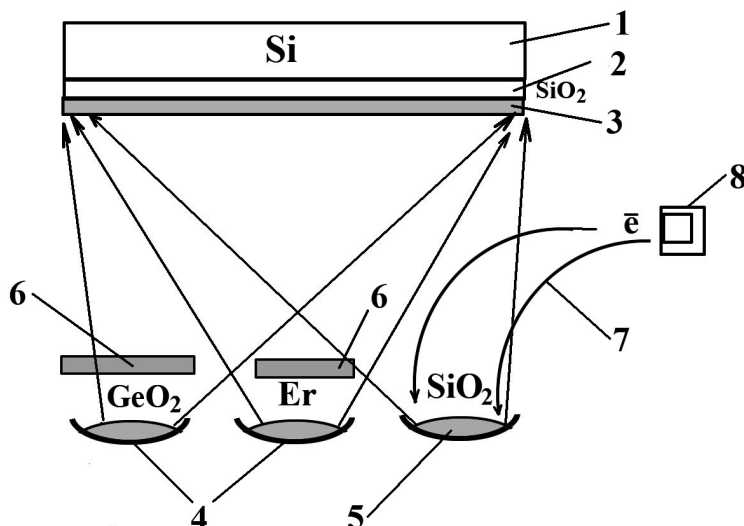
Эрбий оксидининг юқори концентрацияларида толали кучайтиргичнинг нисбий самарадорлиги камайишига қарамасдан, алюминий оксидининг қўшимча ионлари эрбий ионларининг нурлантириш марказларини оширади ва планар толали кучайтиргичнинг узунлигини 5-10 см га етказиш имконияти яралади.

Диссертациянинг бешинчи «**Модификацияланган оптик муҳитлар асосида қисқа масофали оптик толали кучайтиргичларни яратиш**» бобида қисқа масофали оптик кучайтиргичларни яратиш усуллари баён этилган, интеграл оптик тизимлар учун планар оптик кучайтиргичларни яратишнинг экспериментал жараёнлари тавсифланган, шунингдек, спектрал зичлаштирилган тизимлар учун оптик кучайтиргичлар параметрларини ҳисоблаш амалга оширилган. Шу муносабат билан қисқа масофали оптик кучайтиргичларнинг асосий афзаллиги модификацияланган ораликда камёб ер элементлар актив ионларининг юқори концентрацияси ҳисобланади.

Бешинчи бобда қисқа масофали оптик кучайтиргичларни тайёрлашнинг икки усули таклиф этилган. Биринчи таклиф этилган усул қисқа масофали оптик кучайтиргичларни тайёрлаш усули бўлиб, оптик толаларни очик сиртига бевосита термик буғлантириш ёрдамида локал модификацияланган оптик толаларни олишдан иборат. Таъкидланганидек, бу модификацияланган оптик толалар 5 см узунликдаги ораликда оптик сигнални 8 дБ гача кучайтиришга имкон беради. Мавжуд бўлган оптик толаларни модификациялаш орқали яратилган қисқа масофали оптик кучайтиргичлар қулай ҳисобланади, чунки улар ОТАЛ да қўлланилаётган оптик тола билан мураккаб мослаштириш схемаларини талаб қилмайди.

Иккинчи усул монокристалли кремнийдан тайёрланган сайқалланган таглик сиртига модификацияланган кўп компонентли оптик қатламни ҳосил қилиш йўли билан интеграл оптик тизимлар учун мўлжалланган планар

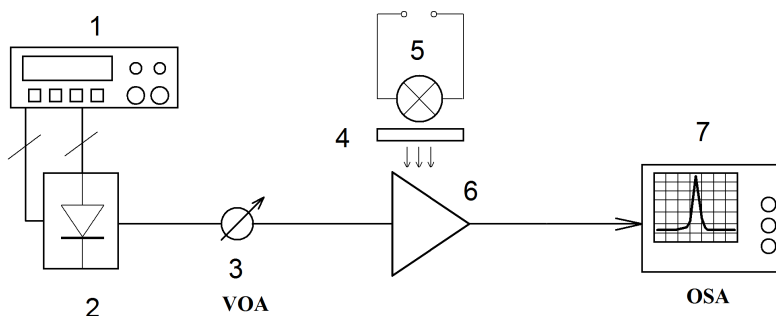
оптик кучайтиргичларни яратишдан иборат (9-расм). Кўп компонентли (SiO_x - GeO_2 - Er_2O_3) оптик қатламни ўстириш жараёни вакуум шароитида амалга оширилган. Тажрибаларга кўра эрбий актив ионлари юқори концентрацияли (10^{20} - 10^{21}) см^{-3} нано тузилмалар оптик сигнални 6 дБ/см қийматгача самарали кучайтириши аниқланган.



9-расм. Интеграл оптик толали тизимлар учун планар оптик кучайтиргичларни тайёрлаш схемаси

Бу ерда, 1 - монокристалл кремнийли таглик, 2 - оксидлантирилган кремний қатлам, 3 - вакуумда шакллантирилган эрбий билан легирланган планар нур ўтказгич ўзагининг қатлами; 4 - буғлантириладиган элементлар солинган қайиқчалар, 5 - электрон оқим орқали қиздириладиган диборид титан (TiB_2), 6 – тўсиқлар, 7- электрон оқим траекторияси, 8 - термокатод.

Тажрибалар натижасида олинган қисқа масофали оптик кучайтиргичларнинг спектрал характеристикалари ва кучайтириш параметрларини ўлчаш 10-расмда келтирилган оптик қурилмаларни уланиш схемаси асосида амалга оширилди.



10-расм. Оптик кучайтиргичнинг кучайтириш коэффициентини ўлчашга мўлжалланган оптик қурилмаларни уланиш блок-схемаси

Бу ерда, 1 - сигнал манбаи (ток генератори), 2 - ярим ўтказгичли лазер, 3-оптик аттенюатор, 4-интерференцион филътр (980 нм), 5-бошқариладиган

ток манбаига уланган ксенон лампа, 6 - қисқа масофали оптик кучайтиргич, 7-оптик спектр анализатори (OSA).

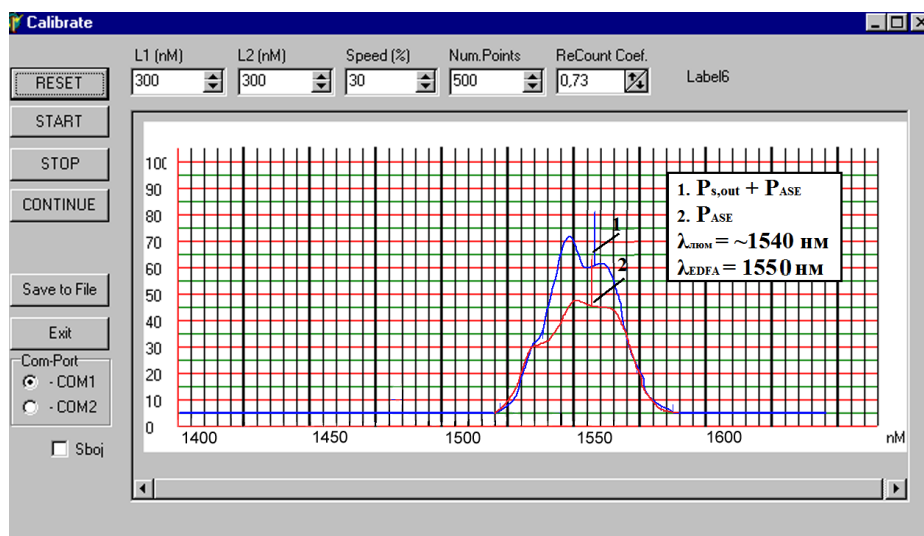
Мазкур блок-схема асосида қисқа масофали оптик толали кучайтиргичларнинг кучайтириш параметрлари 2-жадвалда келтирилган.

2-жадвал

Қисқа масофали оптик кучайтиргичлар параметрларини ўлчаш натижалари

Дамлаш (%)	50%	100%	50%	100%
Кириш сигналининг қуввати (дБм)	Чиқишдаги оптик сигналнинг қуввати (дБм)		Сигналнинг кучайиши (дБ)	
-30	-10,1	-7,2	19,9	22,8
-25	-7,1	-4,8	17,9	20,2
-20	-3,8	-1,5	16,2	18,5
-15	-1,6	1,1	13,4	16,1
-10	-0,5	2,2	9,5	12,2
-5	1	2,9	6	7,9

Олинган экспериментал натижалар дамлаш қуввати ўзининг 100% ли қувватидан 50% қувватни ташкил этганда паст сигналлар учун кучайтириш қиймати 12,02дБ га тенглигини кўрсатди. Дамлаш қуввати 100% максимал қийматга эга бўлганида, - 30дБм қувватли кириш сигнали учун кучайтириш қиймати 15,68дБ га тенг. Бу эрбий легирланган оптик кучайтиргичнинг кучайтириш хусусиятлари дамлаш қувватига тўғри пропорционал дегани. Бироқ, кириш сигнали ортгани сари оптик кучайтиргичнинг кучайтириши тўхтай бошлайди ва кучайтиргич тўйиниш режимига ўтади. Бу хусусият барча эрбий легирланган оптик кучайтиргичлар учун умумий ҳисобланади. 11-расмда EDFA ҳамда ишлаб чиқилган қисқа масофали оптик кучайтиргичларнинг спектрал характеристикалари келтирилган



11-расм. Замонавий EDFA (актив оптик тола узунлиги 2 м) ва қисқа масофали оптик кучайтиргичнинг (модификацияланган бўлак узунлиги – 6 см) спектрал характеристикалари

Бу ерда, $1 - \lambda = 1554$ нм га тенг тўлқин узунлигидаги кучайтирилган оптик нурланиш ($P_{S,OUT}$), 2-эрбий ионларининг ўз-ўзидан автоматик эмиссияланиши сатҳи (P_{ASE}), $3 - \lambda = \sim 1540$ нм оралиғида эрбий люминесценциясининг максимуми.

Қисқа масофали оптик кучайтиргичларда дамлаш ҳисобига, 6 см га тенг бўлган эрбий легирланган бўлакдаги актив эрбий ионларининг концентрацияси ($10^{20} - 10^{21}$) см⁻³ га етади. Замоनावий эрбий легирланган оптик кучайтиргичларда бу қиймат легирланган оптик толанинг бўлаги 4 м дан юқори бўлганида кузатилади. 2-жадвалга кўра қисқа масофали оптик кучайтиргичлар 10-15 дБ соҳада оптик сигналларни самарали кучайтириш имкониятига эга. 11-расмга асосан қисқа масофали оптик кучайтиргичлар учун P_{ASE} параметр замоनावий EDFA кучайтиргичларга қараганда сезиларли даражада паст бўлиши ишлаб чиқилган қисқа масофали оптик кучайтиргичнинг шовқин-фактор параметрини пастлигини таъминлайди. Ишлаб чиқилган қисқа масофали оптик кучайтиргичларда шовқин-фактор қиймати 1-2 дБ га тенг. Ўз навбатида шовқин сатҳи паст бўлган оптик толали кучайтиргичларни оптик толали алоқа тизимларида қўлланилиши оптик сигналнинг OSNR қийматини юқори бўлишига олиб келади ва ишончли алоқани таъминлайди. Бундан ташқари, лазер (сигнал манбаи) ёқилганда кўндаланг оптик дамланган эрбий ионларининг люминесценция характеристикаси силлиқланиши кузатилади, бу эса, ОТАЛ тизимларида қўланиладиган кучайтиргичнинг спектрал характеристикасининг чизиқли бўлишини ва оптик толаларнинг маълумот узатиш параметрлари сифати ошишини таъминлайди.

ХУЛОСА

Тадқиқотларнинг олиб борилиши жараёнида олинган асосий натижалар қуйидагилардан иборат:

1. Вакуумда термик буғлантириш усули орқали модификацияланган оптик толаларда ИҚ-диапазонда юқори тиниқлик даражаси, юқори $\sim 10^9$ Ом см солиштира қаршилиқ ва эрбий оксидларининг (Er_2O_3) юқори ($10^{20} - 10^{21}$) см⁻³ концентрациясига эга бир жинсли диэлектрик юпка қатламли оптик тузилмаларни олиш таъминланади.

2. Эрбий оксидини (Er_2O_3) алюминий оксиди (Al_2O_3) билан вакуумда қўшимча легирлаш орқали эрбий ионларининг кластерланиш даражаси пасайтирилиши, 2-5 см ўлчамли модификацияланган оптик толаларда эрбий актив ионларининг юқори ($10^{20}-10^{21}$) см⁻³ концентрация қийматини таъминлайди, шу билан бирга ап-конверсия ҳодисаси бартараф этилади.

3. Вакуумда назорат қилиш усулини қўллаган ҳолда термик буғлантириш ёрдамида оптик толанинг локал бўлагида $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ва $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ таркибли оптик планар нур ўтказгичлар тайёрланади. Локал модификацияланган муҳит 980 нм тўлқин узунлиги ёрдамида оптик дамланади ва модификацияланган юпка қатламда ~ 1540 нм соҳада ОТАЛ да

қўлланилиши учун амалий аҳамиятга эга бўлган ИҚ нурланиш ҳосил қилинади.

4. Оптик толанинг локал бўлакларида ва кремний оксидининг (SiO_2) тагликларида вакуумда назорат қилинадиган термик буғлантириш усули орқали яратилган $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ ва $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ планар оптик тузилмаларнинг кучайтириш хоссалари тадқиқ қилинади. Ҳосил қилинган оптик тузилмаларни юмшатиш ва эритиш эрбий ионларининг кластеризациясини келтириб чиқариши кўрсатилади. Оптик тузилмаларни термик ишлов бериш орқали юмшатиш натижасида оптик намуналарда фотолюминесценция спектрини кенгайтириш ва нурланиш кинетикасида ап-конверсион жараёнлар кузатилади.

5. Ксенон лампа ва 980 нм ли интерференцион филътр ёрдамида оптик дамланган эрбий (Er), иттербий (Yb) билан биргаликда модификацияланган намуналарда люминесценция нурлантириш спектрини торайитиши аниқланади. Er ва Yb билан биргаликда модификацияланган оптик толаларда нурланиш спектрини торайитиш иттербий ионлари пастки энергетик сатҳга ўтиш жараёнида ўз энергияларини эрбий ионларига узатиши орқали тушунтирилади.

6. Вакуумли буғлантириш усули орқали яратилган оптик тузилмалар хона ҳароратида ($T=300\text{K}$) фотолюминесценциянинг (Er^{+3}) максимал интенсивлиги намоён бўлади, локал очиқ оптик толанинг таянч сиртидаги ёки кремний тагликдаги оптик тузилма эриш босқичини четлаб ўтиб буғлантириш орқали шакллантирилади. Оптик муҳит ҳажмида диффузия ва конвектив оммавий ўтиш жараёнларининг сўндирилганлиги шиша ҳажмида эрбий актив ионларининг статик бир текис тақсимланишига имкон беради.

7. Юқори тезликли ОТАЛ лар ва интеграл оптикада оптик кучайтиргичлар, сенсорлар ва толали датчиклар яратишда ишлатиладиган модификацияланган оптик муҳитлар асосида оптик толалар ва планар оптик тузилмалар тайёрланади. Буғлантирилган модификацияланган оптик тузилмалар оптик тола ўзаги билан 65% дан 75% гача мослашиш ва «оптик тола ўзаги – оптик муҳит – оптик тола ўзаги» лазер нурланишининг ўтишлари самарадорлигини ортириш натижасида, 2-5 см ўлчамли локал модификацияланган ораликда 5-10 дБ гача оптик сигнални кучайтиришга эришилади.

8. Интеграл оптик тизимлар учун кварц оксиди таглигида ўстирилган планар модификацияланган оптик тузилмалар кўринишидаги қисқа масофали оптик кучайтиргичлар C-Band (1529-1565 нм) диапазонида DWDM тизим гуруҳли оптик сигнални кучайтириш ва кучайтиргич чиқишидаги гуруҳли сигналлар кенг полосали силлиқловчи филътрларсиз линеаризацияланган кўринишда бўлишини таъминлайди.

9. Камёб ер элементлари ионларининг юқори концентрацияли модификацияланган оптик муҳитларда яратилган оптик кучайтиргичлар ОТАЛ нинг DWDM тизимларида паст шовқин - фактор параметри ва юқори OSNR (Optical signal noise ratio) оптик сигналнинг шовқинга нисбатини беради.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ при ТАШКЕНТСКОМ УНИВЕРСИТЕТЕ
ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ и НАЦИОНАЛЬНОМ
УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА по ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК 16.07.2013.Т/ФМ.29.01**

**ТАШКЕНТСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИНФОРМАЦИОННЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ**

ИНОГАМОВ АКМАЛ МУРАТОВИЧ

**МЕТОДЫ МОДИФИКАЦИИ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН
РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ И ИХ
СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ**

**05.04.02 - Системы и устройства радиотехники, радионавигации, радиолокации и
телевидения. Мобильные, волоконно-оптические системы связи
(технические науки)**

АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Ташкент – 2016

Тема докторской диссертации зарегистрирована за №30.09.2014/В2014.5.Т329 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Докторская диссертация выполнена в Ташкентском университете информационных технологий.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице Научного совета по адресу (www.tuit.uz) и информационно-образовательном портале «ZIYONET» по адресу (www.ziyonet.uz).

Научный консультант:	Раджабов Тельман Дадаевич доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Абдукаюмов Абдурашид Абдулхаирович доктор технических наук, профессор Бахромов Саъдулла Абдуллаевич доктор физико-математических наук, профессор Рахимов Нёматжон доктор технических наук, профессор
Ведущая организация:	«UNICON.UZ» Центр научно-технических и маркетинговых исследований

Защита диссертации состоится «25» февраля 2016 г. в 10⁰⁰ часов на заседании Научного совета 16.07.2013.Т/ФМ.29.01 при Ташкентском университете информационных технологий и Национальном университете Узбекистана. (Адрес: 100202, Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-64-43; факс: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Ташкентского университета информационных технологий (регистрационный номер № _____). Адрес: 100202, Ташкент, ул. Амира Темура, 108. Тел.: (99871) 238-65-44.

Автореферат диссертации разослан «25» января 2016 г.
(протокол рассылки № _____ от « » _____ 2016 г.).

Х.К.Арипов

Председатель научного совета по присуждению
учёной степени доктора наук, д.-ф.м.н., профессор

М.С.Якубов

Ученый секретарь научного совета по присуждению
учёной степени доктора наук, д.т.н., профессор

Т.Н.Нишонбоев

Председатель научного семинара при Научном
совете по присуждению учёной степени доктора
наук, д.т.н., профессор

Введение (аннотация докторской диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. В мировой арене, зависимость информационно-коммуникационных технологий от пропускной способности волоконно-оптических линий связи, стремительное развитие рынка телекоммуникационных, радиотехнических и мобильных систем связи выявляет необходимость использования методов модификации оптических волокон редкоземельными элементами для увеличения пропускной способности базовой оптической сети, которая соединяет узлы конвергенции систем связи высокоскоростным трафиком. В основных сегментах сетей связи - городские, магистральные, междугородние и локальные вычислительные сети, по показателям на 2005 год использование оптического волокна составило более 68 млн.км и увеличился по отраслям в целом на 15%. По итогам 2012 года показатель изготовленных и применяемых оптических волокон составил 225 млн.км, из которого принадлежит Японии 35-36 млн.км, Китайской народной республике 100 млн.км, США 32 млн.км и странам Европейского союза 26 млн.км.

На практике в телекоммуникационных сетях начали применяться широкополосные LTE (Long Term Evolution) технологии мобильной связи четвертого поколения. В мобильных сетях четвертого поколения по требованиям 3GPP (3rd Generation Partnership Project) и международной организации IMT-Advanced, скорость передачи информации для одного абонента не должна опускаться ниже 1Гбит/с. Использование модифицированных оптических волокон в системах оптической связи обеспечивает базовые станции мобильных операторов высокоскоростным трафиком и способствует увеличению числа абонентов.

В этой связи, решение таких вопросов как модификация оптических волокон редкоземельными элементами, модификация оптических волокон с применением методов кварцевого резонатора и контролируемого вакуумного термического осаждения, высокоточный контроль толщины и состава, осаждаемых многокомпонентных оптических плёнок на локально открытую сердцевину оптического волокна, одновременное контролируемое вакуумное осаждение оксидов эрбия, иттербия, кремния и алюминия, создание оптических волокон с подавленной кластеризацией ионов эрбия и получение высокой концентрации активных ионов редкоземельного элемента (10^{20} - 10^{21}) см⁻³ в сформированных оптических структурах, исследование спектральных характеристик модифицированных оптических волокон легированных многокомпонентным составом Er_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_x и Er_2O_3 - Yb_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_x , ($1 < x < 2$) полученных методом вакуумного термического осаждения, создание эффективных планарных и волоконно-оптических усилителей с высоким (10^{20} - 10^{21}) см⁻³ содержанием активных ионов редкоземельного элемента, разработка методов обработки волоконно-оптических материалов и разработка на их основе оптоэлектронных систем передачи информации направленных на решение вопросов обеспечения низкого показателя шум-фактора и высокого параметра OSNR (Optical signal

noise ratio) в оптических усилителях созданных на основе модифицированных оптических волокон с высокой концентрацией эрбия является актуальным для телекоммуникационных, радиотехнических и мобильных систем связи.

Для создания высокой концентрации активных ионов эрбия в модифицированных оптических волокнах, усовершенствование процессов эффективной модификации оптических волокон и создание эффективных коротко-дистанционных волоконно-оптических усилителей, представляет особый интерес разработка методов многокомпонентного вакуумного осаждения и модификации оптических волокон путем контролируемого термического осаждения оксидов эрбия, иттербия, кремния и алюминия на открытую поверхность оптического волокна.

Исследование данной диссертации служит для обеспечения реализации задач определенных в Постановлении Президента Республики Узбекистан № ПП-1730 «О мерах по дальнейшему внедрению и развитию современных информационно-коммуникационных технологий» от 21 марта 2012 года, а также в постановлении Кабинета Министров № 353 «Об утверждении концепции развития электронной коммерции в Республике Узбекистан на период 2016-2018 годы» от 4 декабря 2015 года.

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Данная диссертация выполнена в соответствии со следующими приоритетными направлениями развития науки и технологии в республике: ППИ-5-«Разработка информационных технологий, телекоммуникационных сетей, аппаратно-программных средств, методов и систем интеллектуального управления и обучения, направленных на повышения уровня информатизации общества»; ППИ-4-«Развитие методов использования возобновляемых источников энергии, создание технологий и устройств на основе нанотехнологий, фотоники и других передовых технологий».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации. В ведущих научных центрах мира и высших учебных заведениях, в том числе в международном союзе электросвязи ITU-T (International Telecommunication Union), Fukurawa, Sumitomo, Fujikura (Япония), Corning Optical Communications (США), Alcatel (Франция), ЗАО «Оптиковолокonné Системы» (Россия), Dutch Fiber (Германия), Draka (Дания), Samsung (Южная Корея) и Pirelli (Италия) проводятся масштабные исследования по изготовлению и практическому применению волоконно-оптических систем передачи информации, ведутся исследования по усовершенствованию технологических процессов производства оптического волокна и создание модифицированных оптических волокон с улучшенными параметрами спектральных характеристик, посредством их модификации редкоземельными элементами. Суммарная доля указанных компаний в мировом объеме производства оптического волокна на сегодняшний день составляет около 90%.

С применением методов модификации оптических волокон редкоземельными элементами, в мире проведен ряд исследований по улучшению качества параметров передачи информации оптических волокон, создание нового поколения эффективных оптических усилителей путем модификации оптических волокон редкоземельными элементами и получены следующие результаты: изучены способы модификации оптических волокон на основе редкоземельных элементов ALCATEL-LUCENT (Франция), NOKIA-SIEMENS, (Финляндия); созданы оптические усилители путем усовершенствования процессов модификации оптических сред с редкоземельными элементами, ZTE, HUAWEI, (Китайская народная республика); на основе жидких кристаллов созданы методы контролируемой передачи оптических сигналов на разные направления, CISCO, FINISAR (США); предложены способы практического применения оптических волокон модифицированных редкоземельными элементами в энергетике и автоматике, ISKRA (Словения); созданы заготовки модифицированных оптических волокон ОПТЕЛ, Натекс, Zelax (Россия).

На сегодняшний день, по вопросам использования модифицированных оптических волокон с редкоземельными элементами для увеличения спектральной эффективности и пропускной способности оптических систем связи, в том числе передача высокоскоростной информации на большие расстояния без оптоэлектронного преобразования, создание эффективных оптических усилителей и их внедрение в телекоммуникационные, радиотехнические и мобильные системы связи, ведутся научно исследовательские работы на основе фундаментальных, прикладных и инновационных проектов.

Степень изученности проблемы. В работах ученых, как G.P.Agrawal (University of Rochester), A.Girard (EXFO Electro-Optical Engineering), A.J.Morrow, A.Sarkar, P.C.Schultz (Research and Development Division Corning Glass Works), S.R.Nagel, J.B.Macchensey, K.L.Walker (AT&T Bell Laboratories), H.Murata (The Furukawa Electric Company), A.D.Yablon (Interfiber Analysis), Н.Н.Слепов (старший научный сотрудник РАН), А.К.Пржевуский, Н.В.Никоноров (Санкт-Петербургский Государственный Университет Информационных Технологий, Механики и Оптики) и другие, рассмотрены вопросы направленные на разработку и усовершенствование теоретических и практических задач модификации оптических волокон редкоземельными элементами применяемых в областях ионно-плазменных, вакуумных технологий, оптика, системы радиосвязи и теория передачи информации, включающие в себя методы вакуумного термического осаждения, методы спектрального исследования оптических параметров модифицированных волокон, методы контроля состава осаждаемых многокомпонентных оптических плёнок с применением радиочастотной методики измерения толщин.

Исследования связанные с вопросами разработки и усовершенствования волоконно-оптических линий связи ведутся учеными республики, в том числе: Т.Д.Раджабов, С.А.Бахромов, А.М.Назаров, А.А.Симонов,

А.И.Камардин, с учениками применили фотолюминесцентные свойства редкоземельных элементов в волоконно-оптические линии связи, Ж.А.Абдуллаев, Р.И.Исаев, И.Р.Берганов провели научные исследования по увеличению пропускной способности волоконно-оптических систем передачи информации. Несмотря на большое число исследований в области разработки волоконно-оптических линий связи, не полностью решены задачи по модификации существующих оптических волокон. Насчитывают единицы работы по локальной модификации оптических волокон и исследования посвященные созданию модифицированных оптических волокон с экстремально высоким ($\sim 10^{20}$ - 10^{21}) см⁻³ содержанием активных ионов редкоземельных элементов. В практике существуют недостатки в известных способах изготовления модифицированных оптических волокон, такие как сложность технологических процессов с применением высоких температур, использование в производстве вредных и опасных веществ. До сегодняшнего дня для создания модифицированных оптических волокон не применялись методы механической прецизионной обработки и методы вакуумного термического осаждения ионов редкоземельных элементов на открытую сердцевину оптического волокна с использованием клиновидной геометрии. Также, не рассматривались методы создания модифицированной заготовки оптического волокна, с высокой концентрацией редкоземельного элемента в сердцевине.

Мало изучены вопросы динамического изменения спектральных характеристик оптических волокон от концентрации редкоземельных элементов, в процессе их модификации и не проводились исследования создания модифицированных оптических сред для компактных планарных оптических усилителей, применяемых в интегральной оптике.

Связь темы диссертации с планами научно-исследовательских работ высшего учебного заведения. Связь диссертационного исследования с научно-исследовательскими работами Ташкентского университета информационных технологий отражаются в следующих фундаментальных и практических проектах: БВ-Ф2-002 «Исследование фундаментальных основ передачи информации и разработка систем и узлов волоконно-оптических систем связи с использованием солитонов» (2011-2013 гг.); А5-003 «Разработка методов оптимизации спектральных характеристик высокоскоростных широкополосных телекоммуникационных сетей связи» (2012-2013 гг.).

Цель исследования разработка методов модификации оптических волокон редкоземельными элементами посредством вакуумного термического осаждения многокомпонентных пленок сложной геометрии, изготовление локально модифицированных оптических волокон с высокой концентрацией редкоземельных элементов и разработка комплекса оптических и механических устройств по измерению спектральных характеристик модифицированных оптических волокон.

Для достижения цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

усовершенствование методики изготовления образцов оптических волокон и создание устройства прецизионной механической обработки образцов в целях их дальнейшей модификации с редкоземельными элементами в условиях вакуума;

разработка метода контролируемого вакуумного осаждения оксидов эрбия, иттербия, кремния и алюминия на открытую сердцевину оптического волокна в целях создания высокой концентрации редкоземельных элементов в модифицированных оптических волокнах;

создание и усовершенствование вакуумных устройств с возможностью контроля толщины и состава осаждаемых многокомпонентных тонких пленок создаваемых путем испарения редкоземельных элементов в условиях вакуума;

создание планарных оптических световодов с высоким содержанием концентрации ионов редкоземельных элементов (10^{20} - 10^{21} см⁻³), формируемых на локальном фрагменте сердцевины оптического волокна в целях установления основных предпосылок разработки коротко-дистанционных волоконно-оптических усилителей и модифицированных заготовок оптических волокон;

изучение состава и концентрации созданных многокомпонентных оптических структур методами вакуумной модификации основанных на термическом испарении редкоземельных элементов;

проведение сравнительного анализа спектральных характеристик модифицированных оптических волокон имеющих разный состав (Er_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_x и Er_2O_3 - Yb_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_x) редкоземельных элементов;

создание коротко-дистанционных оптических усилителей на базе модифицированных оптических сред и исследование их усилительных свойств.

Объектом исследования выбраны одномодовые оптические волокна, многокомпонентные оптические плёнки (представляющие собой планарные световоды клиновидной геометрии), модифицированные заготовки оптических волокон, полученные методом вакуумного термического осаждения и коротко-дистанционные оптические усилители на основе модифицированных оптических сред.

Предметом исследования являются методы модификации оптических волокон редкоземельными элементами и их спектральные характеристики.

Методы исследования. В процессе исследований применялись методы прецизионной механической обработки оболочки оптического волокна, метод контролируемого вакуумного осаждения многокомпонентной плёнки клиновидной геометрии на открытый участок оптического волокна, метод поперечной накачки модифицированного участка оптического волокна, с излучением ксеноновой лампы, метод спектральных исследований модифицированных оптических волокон, радиочастотный метод контроля толщины осаждаемого слоя.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

разработана методика контролируемого вакуумного осаждения для модификации оптических волокон редкоземельными элементами путем применения методов кварцевого резонатора и термического вакуумного осаждения;

разработана методика одновременного контролируемого вакуумного осаждения оксидов эрбия, иттербия, кремния и алюминия с высоким контролем толщины и состава, осаждаемых ($\text{Er}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_x$ и $\text{Er}_2\text{O}_3 - \text{Yb}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_x$) многокомпонентных оптических плёнок на локально открытую сердцевину оптического волокна;

создан и экспериментально апробирован метод вакуумной модификации оптических волокон, обеспечивающий высокое содержание концентрации активных ионов редкоземельного элемента (10^{20} - 10^{21}) см^{-3} за счет формирования оптической структуры подавляющей кластеризацию эрбия;

доказано, что изготовленные модифицированные оптические волокна методом вакуумного термического осаждения, путем одновременного испарения металлического эрбия и алюминия в атмосфере реактивного газа (кислорода), при давлении вакуума 0,25-0,35 Па ($(2-3) \cdot 10^{-3}$ мм рт.ст.) вызывает интенсивную фотолюминесценцию ионов эрбия (Er^{3+}) в диапазоне ~ 1540 нм, представляющий практический интерес в волоконно-оптических линиях связи;

создан способ изготовления активированных заготовок модифицированных оптических волокон, а также эффективных планарных и волоконно-оптических усилителей с высоким (10^{20} - 10^{21}) см^{-3} содержанием активных ионов редкоземельного элемента применяемых в высокоскоростных волоконно-оптических линиях связи;

в целях активизации ионов редкоземельных элементов, предложена методика поперечной накачки планарных оптических усилителей на основе модифицированных оптических сред предназначенных для интегральных волоконно-оптических систем;

для изучения спектральных характеристик модифицированных оптических волокон и усилительных свойств коротко-дистанционных волоконно-оптических усилителей предложены методы, позволяющие наблюдать и регистрировать результаты спектрального исследования на экране компьютера;

разработаны практические рекомендации по выбору методики модификации и создания коротко-дистанционных оптических усилителей на базе модифицированных оптических волокон обеспечивающий низкий показатель шум - фактора и высокий коэффициент усиления;

установлено что, созданные оптические усилители на основе контролируемой вакуумной модификации ионов эрбия имеют низкий показатель шум - фактора и обеспечивают высокий параметр OSNR (Optical signal noise ratio).

Практические результаты исследования заключаются в следующем: технически реализован способ подготовки оптического волокна легированию

редкоземельными элементами, который состоит в шлифовке оптического волокна на заданную глубину с большим радиусом кривизны ($R=180\text{мм}$).

создан многокомпонентный планарный световод сформированный на локально открытом фрагменте сердцевины оптического волокна, состоящий из 5 моль% оксида эрбия, 70-85 моль% оксида кремния, 10-25 моль% оксида алюминия и 5 моль% оксида иттербия, позволяющий эффективно выкачивать оптическое излучение из сердцевины одномодового оптического волокна за счёт большего коэффициента преломления и клиновидной геометрии.

показано, что эффективность согласования сердцевины оптического волокна и осажденной многокомпонентной оптической структуры может достигать 65-75%, и обеспечивать усиление оптического сигнала на 5-10 дБ от модифицированного участка длиной 2-5 см.

установлено, что максимальная интенсивность фотолюминесценции ионов эрбия (Er^{3+}) при комнатной температуре наблюдается в пленках, изготовленных методом вакуумного термического осаждения, без предварительного отжига. Наблюдаемый результат объясняется высокой концентрацией активных ионов эрбия, и получением более однородных по структуре оптических пленок методом термического осаждения по сравнению с методами химического осаждения или химического травления;

созданы устройства модификации оптических волокон для изготовления активных оптических сред позволяющие объединить технологические процессы как контроль и измерение осаждаемых легирующих элементов в один экспериментальный комплекс, что дает возможность снизить затраты материальных ресурсов на 35% и времени на обработку оптического волокна до 50%.

применение модифицированных оптических волокон на участках спектрально уплотненных высокоскоростных волоконно-оптических линий связи, позволило сохранить линейную форму мультиплексированного сигнала на одном уровне, за счет повышения спектральной эффективности и пропускной способности оптического кабеля и обеспечило увеличение расстояния до 100 км без применения промежуточных усилителей.

установлено, что коротко-дистанционные волоконно-оптические усилители на основе оксида эрбия Er^{3+} усиливают оптический сигнал до 15 дБ при длине активной среды 5-10 см, и обладают высокой чувствительностью - 40 дБ и низким уровнем шум - фактора 1,2 дБ, при работе в режимах слабого сигнала.

использование коротко-дистанционных волоконно-оптических усилителей в спектрально уплотненных высокоскоростных волоконно-оптических линиях связи увеличивает параметр OSNR (отношение мощности оптического сигнала к шуму) на 3 дБ (в два раза) и создает возможность увеличения необслуживаемых усилительных пунктов (15 е.д. оптических усилителей на 1000 км), позволяя сократить количество дорогостоящего регенерационного оборудования в 1,5 раза.

Созданные методы и разработанные технические средства для измерения спектральных характеристик оптических волокон и их вакуумной

модификации, позволяют решение актуальных проблем как изготовление локально модифицированных оптических волокон, изготовление активизированных заготовок для протяженных оптических волокон, изготовление эффективных коротко-дистанционных волоконно-оптических усилителей применяемых в системах передачи, регистрации и обработки оптической информации.

Достоверность полученных результатов исследования.

Достоверность результатов обосновывается измерением спектральных характеристик модифицированных оптических волокон на спектральном анализаторе построенного на базе дифракционной решетки с модуляцией светового потока, с точностью 0,1 нм. Возможность получения (10^{21} см^{-3}) высококонцентрированных эрбий легированных оптических структур вакуумными методами модификации, подтверждаются результатами состава осажденных редкоземельных материалов, полученных с помощью рентгеноспектрального микрозонда. Правдивость полученных результатов от практических и научных исследований и их взаимно скоординированность подтверждаются результатами испытаний параметров коротко-дистанционных оптических усилителей в сетях АК «Узбектелеком».

Научная и практическая значимость результатов исследования.

Научная значимость результатов диссертационного исследования заключается в увеличении пропускной способности и спектральной эффективности ВОЛС, путем создания методов модификации оптических волокон, повышение качества спектральных характеристик оптических волокон, создание методов и принципов термической вакуумной модификации оптических волокон, определение методов понижающих кластеризацию активных ионов эрбия в модифицированных оптических волокнах, получение высокой концентрации ионов редкоземельного элемента в эрбий легированных оптических средах, исследование спектральных характеристик оптических волокон модифицированных разными составами легирующих элементов, исследования теоретических основ применения оптических усилителей для систем с волновым мультиплексированием.

Практическая ценность работы заключается в обеспечении эффективной работы коротко-дистанционных оптических усилителей и модифицированных оптических волокон путем создания измерительного комплекса на базе спектрального анализатора с модуляцией светового потока, создание устройства поперечной накачки и прецизионного устройства механической обработки оптических волокон, изготовление локально модифицированных оптических волокон с высокой концентрацией редкоземельных элементов (10^{20} - 10^{21}) см^{-3} , создание модифицированных заготовок оптических волокон с заданными оптическими характеристиками и составом легирующих элементов и разработка коротко-дистанционных оптических усилителей на базе модифицированных оптических сред для эффективного усиления оптического сигнала в диапазоне (1529 - 1565 нм).

Внедрение результатов исследования. Внедрен способ упрощающий технологию изготовления активизированных заготовок оптических волокон, за счет применения безвредных, экологически безопасных процессов модификации в условиях вакуума от $1 \cdot 10^{-3}$ до $5 \cdot 10^{-4}$ Па, путем вакуумного термического осаждения, чистого оксида эрбия и германия (IAP 04944 Патент на изобретение Республика Узбекистан). Полученные модифицированные оптические волокна и оптические усилители в результате объединения технологических процессов контроля и измерения осаждаемых легирующих элементов в один экспериментальный комплекс на основе вакуумного устройства модификации, внедрены в существующие сети АК «Узбектелеком» (Справка Министерства по развитию информационных технологий и коммуникаций Республики Узбекистан № 02-8/2317 от 12 июня 2015 года). Достигнуто возможность снижения затрат материальных ресурсов на 35% и времени на изготовление модифицированных заготовок оптических волокон до 50%. Результаты в виде коротко-дистанционных оптических усилителей и модифицированных оптических волокон увеличили промежуточную дистанцию регенерационных пунктов на 30% (15 е.д. оптических усилителей на 1000 км) и сократили количество регенерационного оборудования 1,5 раза. Экономическая эффективность составило 72 млн. сум.

Апробация результатов исследования. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы апробированы на 12 международных и республиканских научно-практических конференциях: «Вакуумная наука и техника» (Россия, Сочи, 2010); «IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet» (Uzbekistan, Tashkent, 2008); «Техника и технологии связи» (Узбекистан, Ташкент, 2008); «International conference in Central Asia on Internet» (Uzbekistan, Tashkent, 2013); «Вакуумная наука и техника» (Крым, Гаспра, 2013); «Инфо-коммуникационные технологии в науке и образовании» (Узбекистан, Ташкент, 2010); «Application of Information and Communication Technologies» (Uzbekistan, Tashkent, 2010); «IT Promotion in Asia» (Uzbekistan, Tashkent, 2011); «Проблемы информационных технологий и телекоммуникаций» (Узбекистан, Ташкент, 2012); «Актуальные проблемы развития инфокоммуникаций и информационного общества» (Узбекистан, Ташкент, 2012); «Приоритетные направления в области науки и технологии в XXI веке» (Узбекистан, Ташкент, 2014).

Опубликованность результатов исследования. По теме диссертации опубликовано 25 научных работ, в том числе 1 патент на изобретение, в 2 международных журналах 2 научные статьи, в 4 республиканских научных журналах 9 научные статьи и в научно-практических конференциях 12 тезисов.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и содержит 199 страниц текста, включает 75 рисунков, 14 таблиц и 12 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В **введении** обоснована актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи, выявлены объект и предмет исследования, определено соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан, изложены научная новизна и практические результаты исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыты теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведен список внедрений в практику результатов исследования, сведения по опубликованным работам и структуре диссертации.

В первой главе диссертации **«Анализ современного состояния систем и элементов волоконно-оптических линий связи»** проведен теоретико-аналитический анализ волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), их основных компонентов, элементов и узлов. Рассмотрены основные характеристики оптических волокон используемых в системах ВОЛС. Приведены примеры использования ВОЛС в широкополосных системах радиосвязи, в частности, в мобильных системах четвертого поколения LTE (Long term evolution). Проведен анализ методов модификации оптических волокон используемых для увеличения спектральной эффективности ВОЛС, проанализированы типы модифицированных оптических волокон с редкоземельными элементами, в частности оптических волокон модифицированных эрбием и иттербием. Проведена классификация и определены области применения модифицированных оптических волокон.

В заключении первой главы приведены основные выводы по проведенному обзору в сфере ВОЛС и сформулированы основные задачи исследования как разработка новых принципов модифицирования оптических волокон редкоземельными элементами и увеличение их концентрации до $(10^{20}-10^{21} \text{ см}^{-3})$, исследование миниатюрных оптических структур модифицированных разным составом легирующих примесей, разработка на базе модифицированных сред эффективных оптических усилителей, разработка экспериментальных установок для модификации существующих оптических волокон, усовершенствование технологических процессов по созданию модифицированных оптических волокон, расширение возможностей оптических волокон и изготовление модифицированных оптических волокон в лабораторных условиях.

Вторая глава диссертации **«Разработка измерительного комплекса для исследования спектральных характеристик модифицированных оптических волокон»** посвящена разработке методов и устройств измерения спектральных характеристик модифицированных оптических волокон полученных в результате экспериментов. Поставлена задача по созданию оптических и механических устройств для измерения спектральных характеристик модифицированных оптических волокон. Во второй главе практически реализуется методика согласования полупроводниковых лазеров с торцами оптических волокон, и приводятся их рабочие характеристики.

Для исследования спектральных характеристик модифицированных оптических волокон с редкоземельными элементами, необходимо обеспечить эффективный ввод лазерного излучения в сердцевину одномодовых оптических волокон. Для этого использованы бескорпусные лазерные диоды. Для максимально эффективного ввода излучения лазера на торец оптического волокна применялась специальная технология, получения конусов и микролинз, разработанная НИИ Прикладной физики города Ташкента. В создании измерительного комплекса по изучению спектров модифицированных оптических волокон использовался спектрограф на основе дифракционной решётки (рис. 1).

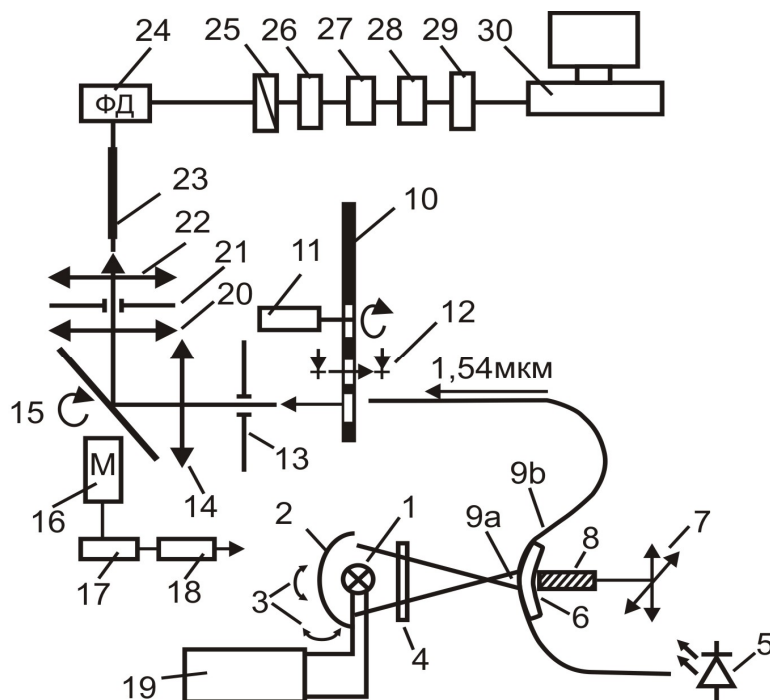


Рис. 1. Функциональная схема измерительного комплекса на базе волоконно-оптического спектрометра с модуляцией светового потока

Здесь, 1 - излучение от ксеноновой лампы, 2 - полусферическое зеркало, 3 - юстировочный винт, 4-интерференционный фильтр ($\lambda_{пр.} = 980 \text{ нм}$), 5 - излучение лазера, 6 - металлическая подложка, 7 - юстировочный столик, 8 - крепежные зажимы, 9a - модифицированное оптическое волокно, 9b - оптическое волокно, 10 - модулирующий диск, 11 - вал двигателя ($f = 50$ оборотов/сек), 12 - оптрон, 13 - входная щель спектрографа, 14 - объектив, 15 - дифракционная решётка, 16 - двигатель дифракционной решетки, 17 - электронный блок двигателя, 18 - микроконтроллер, 19 - блок питания ксеноновой лампы, 20 - коллиматор, 21 - выходная оптическая щель, 22-фокусирующая линза, 23 - входной торец оптического жгута, 24 - фотодиод, 25 - усилитель напряжения, 26 - узкополосный фильтр, 27 - усилитель переменного напряжения, 28 - прецизионный детектор, 29 - микросхема MAX-232 на базе микроконтроллера PIC-16F873A, 30 - COM порт (RS-232) компьютера.

Особенностью разработанной установки по исследованию спектральных характеристик модифицированных оптических волокон является то, что спектрограф совмещён в единый научно-исследовательский комплекс прецизионным юстировочным устройством, что позволяет проводить спектральные исследования модифицированного одномодового оптического волокна, введённым в сердцевину лазерным излучением. Используемые методики эффективного согласования излучения лазера и одномодового оптического волокна, а также усовершенствование спектрального прибора, на основе модуляционной схемы, обеспечили возможность высокочувствительного измерения спектров лазерного излучения и люминесценции редкоземельных элементов, что позволило полностью решить поставленные задачи в данной главе.

В третьей главе диссертации **«Разработка методов и установок модификации оптических волокон»** приведены разработанные методики модифицирования оптических волокон редкоземельными элементами и описаны созданные экспериментальные установки для осуществления практической реализации процессов модификации.

Известными методами производства заготовок оптических волокон являются методы внутреннего или внешнего аксиального осаждения примесями легирующих элементов с использованием высокотемпературных обработок. Данные процессы основаны на высокотемпературном оксидировании соединений кремния и других легирующих материалов. Недостатками таких методов модифицирования являются сложность технологических процессов, использование высокотемпературных обработок, что ведет разрушению кристаллической структуры оптического волокна и невозможность контроля концентраций модифицирующих элементов. Таким образом, учитывая вышеуказанные недостатки, был разработан и доведен до практической реализации метод контролируемого вакуумного осаждения многокомпонентных пленок с различными составами легирующих элементов.

Проблема изготовления эффективных эрбиевых усилителей стимулирует разработку материалов с экстремально высоким содержанием ионов эрбия. Доказано что, оптические структуры на основе оксида эрбия (Er_2O_3), имеют огромное количество концентрации активных ионов Er^{3+} , достигающих до значения $\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$. Концентрация ионов эрбия в данных оптических структурах превосходит в несколько раз, концентрацию ионов эрбия, в модифицированных оптических волокнах полученных известными способами легирования для систем EDFA (Erbium doped fiber amplifier).

Таким образом, целью данной главы является создание методики и экспериментальных установок для практического осуществления задачи создания высококонцентрированных эрбий легированных оптических сред. На рис.2 приведена функциональная схема разработанного устройства для осуществления вакуумного контролируемого осаждения, одновременно из двух лодочек.

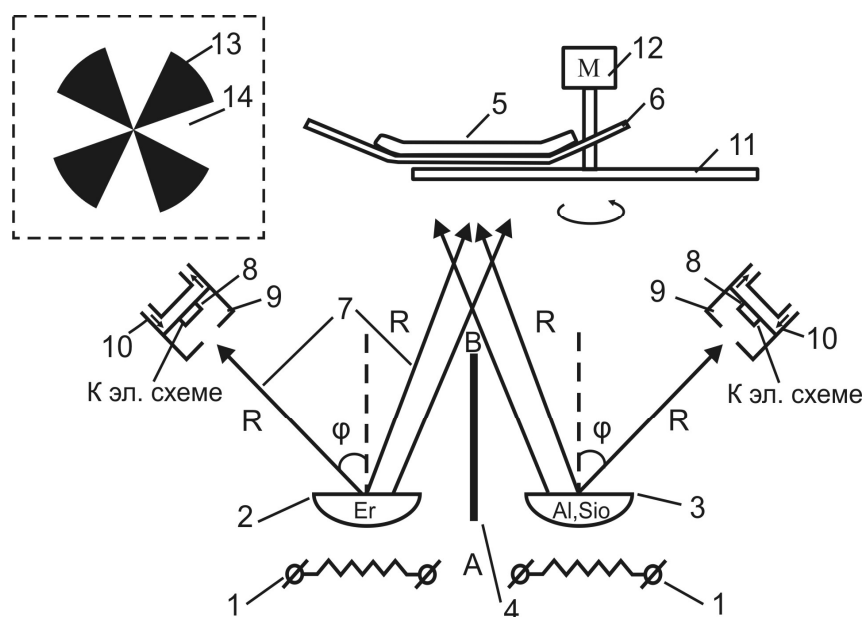


Рис. 2. Установка для вакуумного регулируемого осаждения многокомпонентных плёнок

Здесь, 1 - резистивный танталовый нагреватель, 2 - контейнер с металлическим эрбием (Er), 3 - контейнер с металлическим алюминием (Al) и с моноокисью кремния (SiO), 4 - разделяющий отсеки экран (AB), 5 - металлическая подложка, 6 - оптическое волокно с участком открытой сердцевины, 7 - направления распространения паров испаряемых из контейнеров материалов, 8 - кварцевая пьезопластина, 9 - кожух с диафрагмой, 10 - водяной радиатор, 11 - диск-обтюратор с четырьмя прорезями, 12 - двигатель со стабилизацией частоты вращения, 13 - общий вид диска-обтюратора, 14 - калиброванная треугольная прорезь на диске.

В ходе экспериментов были получены модифицированные оптические структуры в виде многокомпонентных пленок $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-SiO}_x\text{-Al}_2\text{O}_3$ или $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3\text{-SiO}_x\text{-Al}_2\text{O}_3$ на фрагменте оптического волокна. Для реализации задачи использовалась технология совместного термического осаждения металлического эрбия (Er), монооксида кремния (SiO) и оксида алюминия (Al_2O_3) на шлифованный участок оптического волокна, с напуском в вакуумную рабочую камеру кислорода, под давлением $2\text{-}3 \cdot 10^{-3}$ Па.

При вакуумном термическом осаждении для контроля толщины осаждаемых многокомпонентных плёнок был применён радиочастотный метод, основанный на измерении изменения частоты колебаний кварцевого кристалла при формировании на нём пленки напыляемого вещества. Также, при термическом испарении был использован трехтемпературный метод, при котором независимо задаются температуры подложки из двух испарителей, содержащих испаряемые элементы. Поскольку кристаллы кварца чувствительны к изменениям температуры, в данной методике используется система охлаждения для датчиков. Компенсация влияния теплового излучения со стороны испарителя на уход частоты резонатора в процессе напыления позволяет измерять толщину осаждённого слоя с точностью 5%.

Испарение эрбия и монооксида кремния проводилось на вакуумной установке с помощью нагрева разных танталовых лодочек при давлении рабочего газа (кислорода) $2-3 \cdot 10^{-3}$ Па и температуре 1300 - 1600 °С.

Процесс модификации также включает в себя создание и подготовку образцов оптических волокон с заранее указанными параметрами. Для подготовки оптических волокон модифицированию с редкоземельными элементами был разработан метод прецизионной механической обработки поверхности оптического волокна, с контролем высоты сердцевины. Устройство прецизионной полировки позволяет с точностью фиксировать основную моду (HE_{11}) в сердцевине одномодового оптического волокна.

Для проведения процесса полировки предварительно делаются металлические подложки для закрепления оптических волокон. Они изготавливаются из полосок дюралюминия марки Д1, Д19 или ВАД1, толщиной 3 мм, шириной 15 мм и длиной 120 мм. Данные полоски сгибаются до необходимого радиуса скругления $R=180$ мм. С помощью алмазного диска вырезается канавка с заданной глубиной (0,1 мм), радиус кривизны которой определяется, радиусом кривизны изогнутой полоски из дюралюминия.

Как показали расчеты, при шлифовании на идеальной плоскости объектов с радиусом скругления R , при глубине сошлифовывания d обнажается участок (хорда) длиной L . Соотношения этих величин определяется формулой, $L = \sqrt{8Rd}$ из которой можно оценить геометрию полосы дюралюминия. Глубина сошлифовывания d выражается $d = L^2 / 8$ формулой. Перед приклеиванием оптического волокна на дюралюминиевую пластину (подложку) в оптическое волокно вводится излучение He-Ne лазера и выбранный для обработки участок проверяется под микроскопом. Функциональная схема разработанного метода прецизионной механической обработки оболочки оптического волокна представлено на рис. 3.

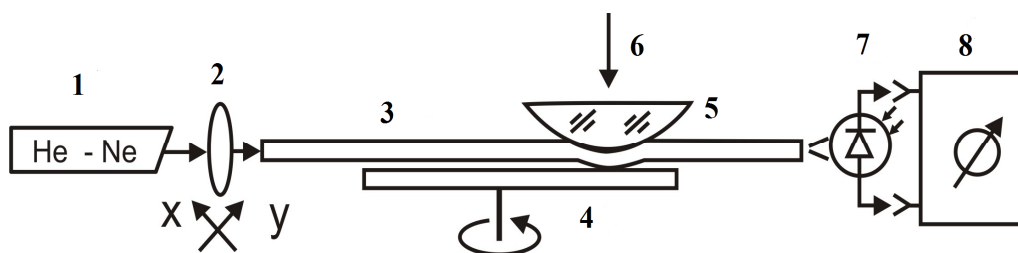


Рис. 3. Схема прецизионного контроля глубины шлифовки оптического волокна

Здесь, 1 - He-Ne лазер, 2 - юстируемая фокусирующая линза, 3 - оптическое волокно, 4 - шлифовальный диск, 5 - шлифуемая подложка с оптическим волокном, 6-калиброванный прижимной груз, 7 - юстировочный столик с фотодиодом, 8 - оптический тестер

Оптический тестер позволяет эффективно контролировать глубину шлифовки оптического волокна. Мощность остаточного излучения

показывает степень шлифовки оболочки и сердцевины оптического волокна. Во время экспериментов остаточное излучение находилось в пределах от 20% до 80% для разных образцов оптического волокна. Это позволяет экспериментально подобрать оптимальный режим шлифовки, чтобы обеспечить, эффективную модификацию оптических волокон с редкоземельными элементами.

Второй разработанный способ заключается в изготовлении модифицированной заготовки оптического волокна. В данном способе не используются разлагающиеся ядовитые соединения, и все процессы проводятся в вакууме путем термического испарения редкоземельных элементов. При этом нанесение слоя редкоземельных элементов проводится путем термического испарения из нагретых лодочек, внутри вращающейся заготовки. Кроме того, возможность многослойного напыления позволяет создать модифицированную заготовку оптического волокна с различными вариациями легирующих элементов. Рис. 4. иллюстрирует предложенный метод изготовления модифицированной заготовки.

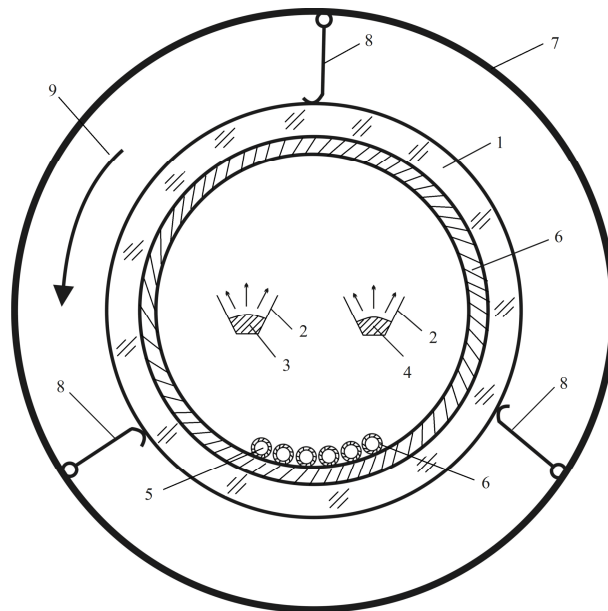


Рис. 4. Метод создания заготовки модифицированных оптических волокон

Здесь, 1 - опорная трубка из кварцевого стекла закрепленная внутри вращающейся оснастки, 2 - нагреваемые электрическим током лодочки из тугоплавкого материала, 3 - эрбий, 4 - диоксид германия, 5 - дисперсный порошок кварца, 6 - слой осаждаемых материалов, 7 - вращающаяся оснастка для фиксирования кварцевой опорной трубки, 8 - крепежные элементы, 9 - направление вращения оснастки

Создание заранее легированной заготовки с редкоземельными элементами позволяет получать модифицированные оптические волокна с необходимой длиной и нужной концентрацией ионов активных компонентов.

В четвёртой главе диссертации «**Экспериментальные исследования спектральных характеристик модифицированных оптических волокон**» приведены основные результаты экспериментальных исследований спектральных характеристик модифицированных оптических волокон. Исследованы фотолюминесцентные свойства модифицированных образцов оптических волокон различными составами редкоземельных элементов. Изучены структуры и составы осажденных элементов на образцах оптических волокон. Предложены практические рекомендации по созданию эффективных волоконно-оптических усилителей и модифицированных заготовок оптических волокон применяемых в ВОЛС.

Исследования показали, что наибольшую интенсивность излучения активных ионов эрбия продемонстрировали образцы модифицированные методами вакуумного термического осаждения. Кроме того, принципиальным является выбор легирующих добавок формирующих пленку и подбор концентрации ионов эрбия для модификации оптических волокон. Известно, что дополнительное легирование кварцевого стекла с Al_2O_3 или P_2O_5 на порядок увеличивает концентрационный предел вхождения оксидов редкоземельных элементов и подавляет кластеризацию ионов эрбия. В данной работе выбрано совместное легирование оксида эрбия Er_2O_3 , совместно с оксидом кремния SiO_2 и алюминия Al_2O_3 .

Исследования спектральных характеристик модифицированных оптических образцов выявили интенсивную фотолюминесценцию ионов эрбия Er^{3+} в ИК-диапазоне ~ 1540 нм (рис. 5, 6). Полученные спектры соответствуют переходу активных ионов эрбия Er^{3+} с первого возбужденного состояния $^4\text{I}_{13/2}$ на основное состояние $^4\text{I}_{15/2}$.

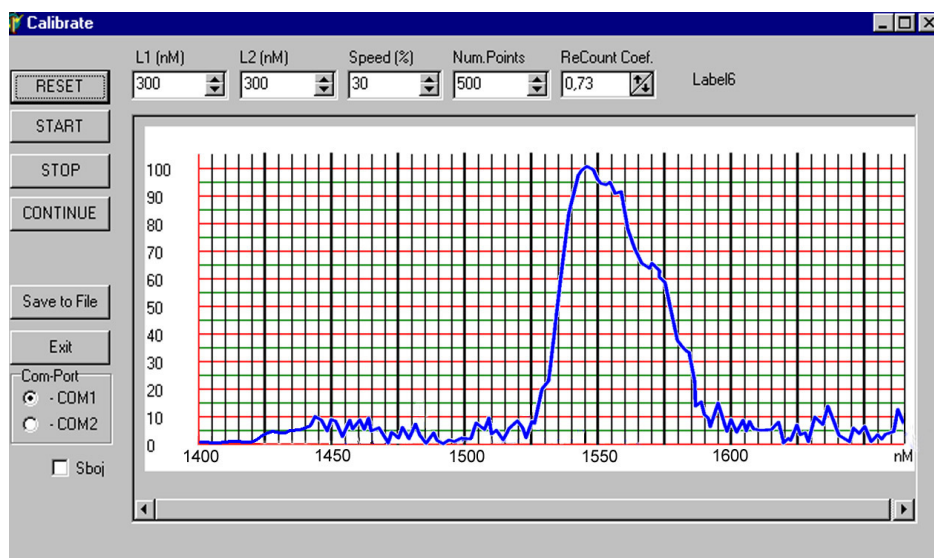


Рис. 5. Спектр люминесценции модифицированного оптического волокна составом Er_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3

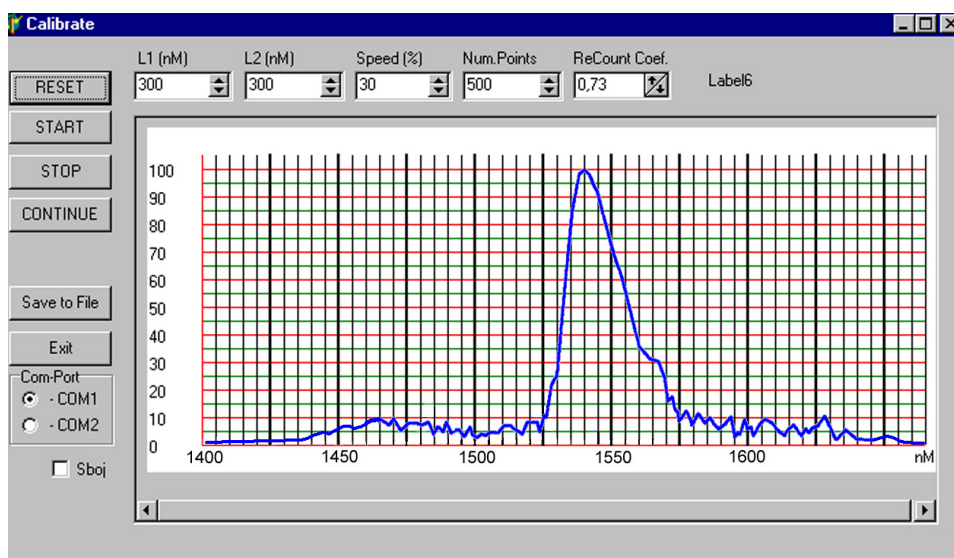


Рис. 6. Спектр люминесценции модифицированного оптического волокна составом Er_2O_3 - Yb_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3

На выходе образцов модифицированных оптических волокон наблюдалась интенсивная фотолюминесценция, в диапазоне ~ 1540 нм, активных ионов эрбия без проведения предварительного отжига образцов. Это указывает на возможность активации Er^{3+} ионов эрбия в модифицированных стеклах без использования высокотемпературных операций направленных для повышения концентрации ионов редкоземельных элементов.

Исследования показали, что эрбий-иттербий легированные образцы имеют высокую концентрацию ионов эрбия, чем эрбий легированные образцы оптических волокон, при одинаковой длине модифицированного активного участка. Это объясняется тем что, ионы иттербия имеют широкую линию поглощения от 850 нм до 1100 нм и за счет безызлучательного переноса возбуждения эффективно передают свою энергию ионам эрбия. В результате линия поглощения ионов эрбия в районе 980 нм становится уже (рис. 6). Измерения образцов проводились при комнатной температуре ($T=300\text{K}$). На спектральных характеристиках мощность излучения на выходе оптического волокна нормирована к 100% и показана в относительных единицах. В абсолютных единицах мощность люминесценции модифицированных образцов составляет 0,3-0,4 мВт.

Состав слоев созданных в вакууме термическим напылением проверены и изучены рентгеноспектральным микроанализом в Институте геологии и геофизики АН РУз. Установлено, что вакуумный синтез при умеренных температурах подложки ($150\text{-}200^\circ\text{C}$) позволяет получать планарные световоды с подавленной кластеризацией и высокую концентрацию ионов эрбия ($10^{20}\text{-}10^{21}\text{ см}^{-3}$) на малых модифицированных участках размером 2-5 см. Оптические потери на созданных оптических структурах составили менее 0,15 дБ/см. Это доказывает перспективность методов вакуумной термической модификации.

Также показано, что люминесцентные свойства активатора в таких неплавленных стеклах с высоким содержанием эрбия выгодно отличаются от свойств активатора в тех же стеклах, но прошедших стадию проплавления. На рис. 7 представлена кинетика изменения люминесценции ионов эрбия в результате нагрева оптического образца.

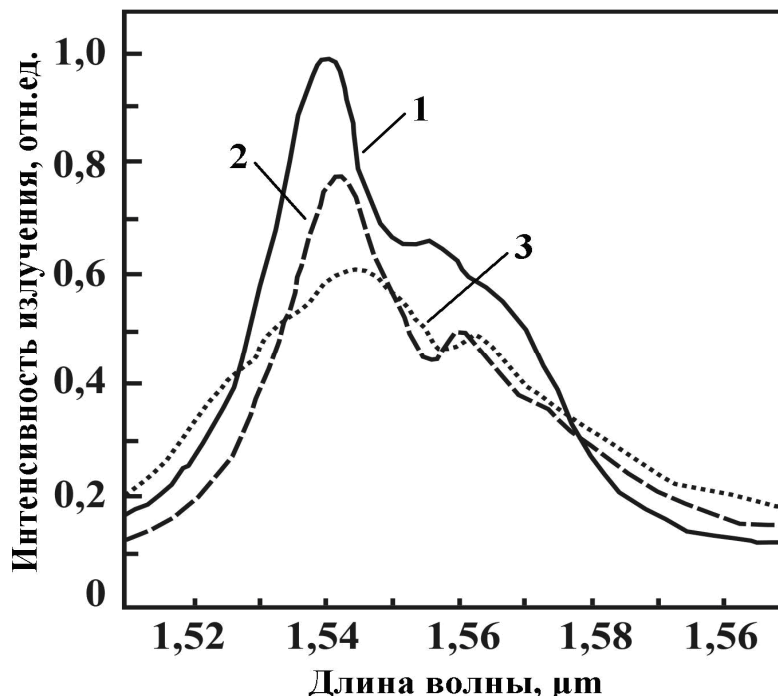


Рис. 7. Кинетика изменения спектра люминесценции оптического волокна модифицированного составом $\text{Er}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_x - \text{Al}_2\text{O}_3$

Здесь, 1 – Образец оптического волокна не прошедший стадию отжига, 2-образец оптического волокна после отжига (температура 400°C), 3-образец оптического волокна после отжига (температура 700°C).

На рис. 7 видно, что термическая обработка модифицированных образцов с редкоземельными элементами вызывает кластеризацию активных ионов эрбия. В результате уширяется спектр люминесценции оптических образцов, и появляются признаки ап-конверсионных процессов в кинетике энергетических переходов активных ионов эрбия. Данное свойство также продемонстрировали образцы, модифицированные $\text{Er}_2\text{O}_3 - \text{Yb}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$ составом. Спектральные характеристики модифицированных оптических волокон измеряются посредством введения лазерного излучения на вход оптического волокна и при включенной внешней накачке.

В экспериментальной установке в качестве источника сигнала использовался полупроводниковый лазер с максимальной выходной мощностью 5 мВт на длине волны 1540 нм. Для модифицированных планарных структур накачка осуществлялась полупроводниковым лазером выходной мощностью до 250 мВт или ксеноновой лампой через ИК-фильтр на длине волны 980 нм.

В экспериментах модифицированные оптические волокна были исследованы на люминесцентные и усилительные свойства от введенной концентрации легирующих элементов (рис.8).

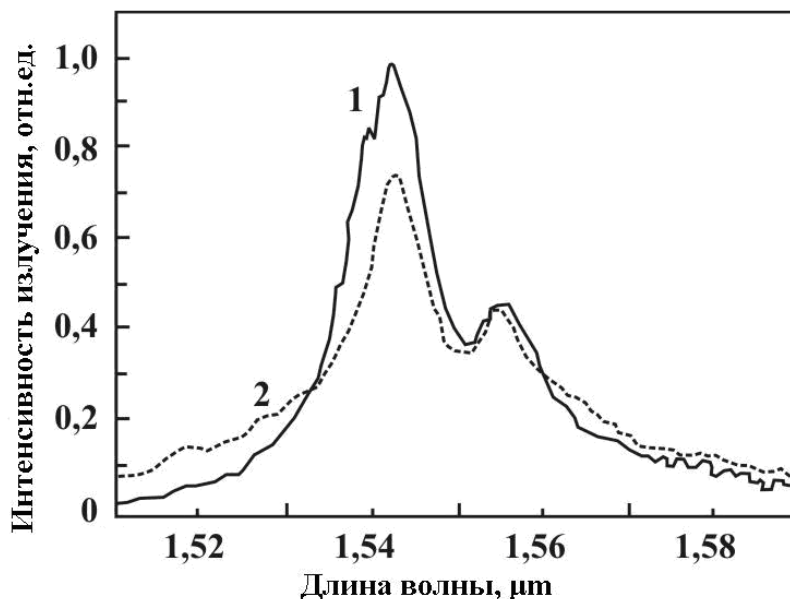


Рис. 8. Спектр люминесценции оптического волокна модифицированного разными концентрациями $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-SiO}_x\text{-Al}_2\text{O}_3$ легирующих элементов

Здесь, 1-оптическая среда, легированная 10 mol.% Al_2O_3 и 3000 ppm Er_2O_3 , 2-оптическая среда, легированная 1,5 mol.% Al_2O_3 и 3000 ppm Er_2O_3 .

Как видно из рис. 8, образец под номером 1 продемонстрировал высокий уровень люминесценции относительно образца под номером 2. Данное явление объясняется большей концентрации легирующего элемента - Al_2O_3 . Исходя из экспериментальных результатов, увеличение концентрации оксида алюминия в составе осажденных материалов подавляет кластеризацию активных ионов эрбия, позволяя повысить интенсивность фотолюминесценции. На спектральной характеристике, мощность на выходе оптического волокна нормирована к 100% и показана в относительных единицах. Мощность люминесценции модифицированных образцов составляет порядка 0,3-0,4 мВт.

На основании проведенных экспериментов и измерений построена зависимость квантовой эффективности волоконного усилителя от концентрации ионов эрбия и легирующих примесей (таблица 1). При создании эрбий легированных усилителей данная таблица может быть использована для оптимизации усилительных параметров оптических усилителей.

В таблице приведены результаты измерения эффективности усиления планарного световода, в относительных единицах. За единицу принято максимально полученное усиление при максимальном легировании оксидом алюминия и при оптимальном легировании оксидом эрбия.

Таблица 1

Результаты измерения квантовой эффективности модифицированных образцов
использованных в качестве усилителя

Er ₂ O ₃ ppm Al ₂ O ₃ mol. %	Эффективность усиления, в относительных единицах, arbitrary unit								
	10	50	100	250	500	1000	3000	5000	10000
0	1	0.77	0.61	0.38	0.07	—	—	—	—
1.5	1	0.94	0.92	0.79	0.60	0.29	0.02	—	—
2.5	1	0.98	0.96	0.92	0.80	0.69	0.30	0.13	—
10	1	0.98	0.96	0.94	0.85	0.73	0.34	0.15	0.03
15	1	1	0.98	0.96	0.91	0.81	0.43	0.23	0.10
18	1	1	1	0.98	0.96	0.88	0.56	0.32	0.18

Несмотря на то что, при больших концентрациях оксида эрбия относительная эффективность усиления уменьшается, но за счёт большого количества излучающих центров можно уменьшить длину планарного волоконного усилителя и довести её до 5-10 см.

В пятой главе диссертации **«Разработка коротко-дистанционных волоконно-оптических усилителей на основе модифицированных оптических сред»** изложены методы создания коротко-дистанционных оптических усилителей, описаны экспериментальные процессы создания планарных оптических усилителей для интегральных оптических систем, также осуществлен расчет параметров оптических усилителей для спектрально мультиплексированных систем. Основным преимуществом коротко-дистанционных оптических усилителей является высокая концентрация активных ионов редкоземельного элемента в модифицированном участке.

В пятой главе предложены два способа изготовления коротко-дистанционных оптических усилителей. Первый предложенный способ изготовления коротко-дистанционных оптических усилителей заключается в использовании локально модифицированных оптических волокон методом термического осаждения. Как уже отмечалось, данные модифицированные оптические волокна позволяют усиливать оптический сигнал до 8 дБ на локальном участке длиной 5 см. Оптические усилители на основе локально модифицированных оптических волокон не требуют сложных схем согласования с оптическим волокном DWDM системы, поскольку данные усилители выполнены на таких же оптических волокнах.

Второй способ заключается в создании планарных оптических усилителей предназначенных для интегральных оптических систем путем нанесения модифицированного многокомпонентного оптического слоя на поверхность полированной подложки из монокристаллического кремния (рис. 9). Процесс наращивания многокомпонентного оптического слоя (SiO_x - GeO₂ - Er₂O₃) пленки проходит в условиях вакуума.

Как показали экспериментальные результаты данные наноструктуры с высоким содержанием концентрации активных ионов эрбия ($10^{20} - 10^{21} \text{ см}^{-3}$) способны эффективно усиливать оптический сигнал до 6 дБ/см.

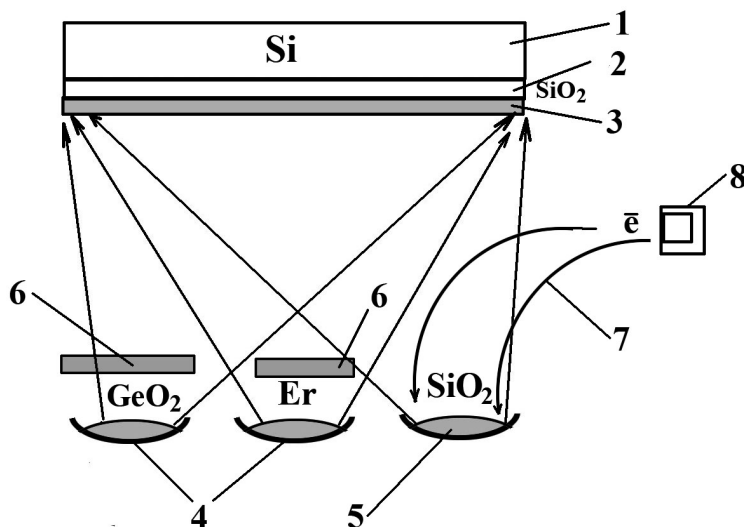


Рис. 9. Схема изготовления планарных оптических усилителей для интегральных волоконно-оптических систем

Здесь, 1-подложка из монокристаллического кремния, 2-слой оксидированного кремния, 3 - формируемый в вакууме слой сердцевины планарного световода легированный эрбием, 4 - Танталовые лодочки с испаряемыми навесками материала, 5 - высокотемпературная лодочка из диборида титана (TiB_2), 6-заслонки, 7 - траектория электронного потока, 8-термокатод.

Для измерения спектральных характеристик и параметров усиления коротко-дистанционных оптических усилителей использовалась схема соединения оптических устройств, представленная на рис. 10.

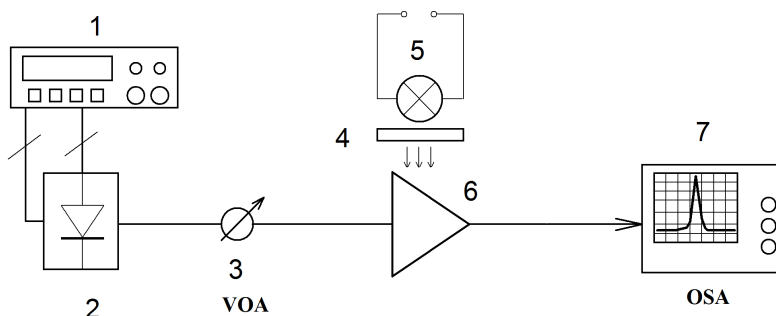


Рис. 10. Схема соединений оптических устройств для измерения коэффициента усиления оптического усилителя

Здесь, 1 - источник сигнала (генератор тока), 2- лазер, 3 - оптический аттенюатор, 4 - интерференционный фильтр на 980 нм, 5 - ксеноновая лампа подключенная к цепи питания с регулируемым управлением, 6 - коротко-дистанционный оптический усилитель, 7 - анализатор спектра (OSA).

На таблице 2 приведены усилительные характеристики коротко-дистанционных волоконно-оптических усилителей.

Таблица 2

Результаты измерения усилительных свойств коротко-дистанционных волоконно-оптических усилителей

Накачка (%)	50%	100%	50%	100%
Входная мощность оптического сигнала (дБм)	Выходная мощность оптического сигнала (дБм)		Усиление сигнала (дБ)	
-30	-10,1	-7,2	19,9	22,8
-25	-7,1	-4,8	17,9	20,2
-20	-3,8	-1,5	16,2	18,5
-15	-1,6	1,1	13,4	16,1
-10	-0,5	2,2	9,5	12,2
-5	1	2,9	6	7,9

Исходя из полученных экспериментальных результатов, когда мощность накачки составляет половину – 50% от своей 100% мощности, для слабых сигналов -30дБм, усиление равно 12,02 дБ. Когда сигнал накачки составляет максимальное значение – 100%, для входного сигнала уровнем - 30дБм, усиление равно 15,68дБ. Это объясняется тем, что усилительные свойства эрбиевого оптического усилителя прямо пропорциональны мощности накачки. Но, когда входной сигнал нарастает, усиление оптического усилителя начинает останавливаться, и усилитель начинает переходить в режим насыщения. Данный эффект является общим для всех эрбий легированных оптических усилителей. На рис. 11 показаны сравнительные спектральные характеристики современных EDFA и коротко-дистанционных оптических усилителей.

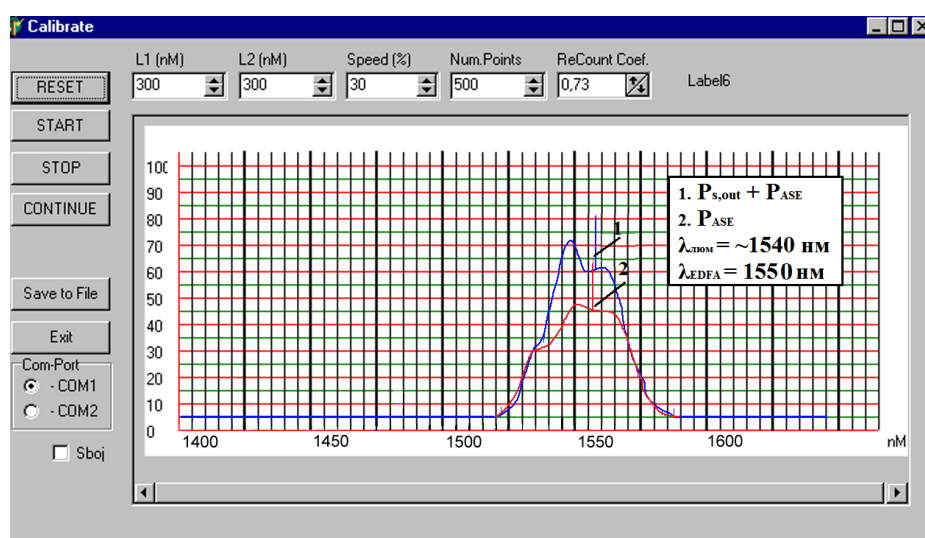


Рис. 11. Спектральные характеристики современных EDFA (длина модифицированного волокна - 2 м) и коротко-дистанционных (длина модифицированного волокна - 6 см) оптических усилителей

Здесь, 1 – Усиленное оптическое излучение на длине волны $\lambda = 1550$ нм ($P_{S,OUT}$), 2 - Уровень автоматической спонтанной эмиссии ионов эрбия (P_{ASE}), 3 - Пик люминесценции эрбия на длине волны $\lambda = \sim 1540$ нм.

В коротко-дистанционных оптических усилителях длиной активного участка 6 см, количество активных ионов эрбия, за счет накачки может достигать 10^{21} - 10^{20} см⁻³. Для EDFA усилителей данное количество концентрации активных ионов эрбия достигается при длине модифицированного волокна более 4 м. По экспериментальным данным приведенных в 2-таблице коротко-дистанционные оптические усилители на базе модифицированных оптических сред эффективно усиливают оптический сигнал в районе 10-15 дБ. Как видно из рис. 11, параметр P_{ASE} для коротко дистанционных оптических усилителей ниже по сравнению современными EDFA усилителями, что дает возможность понижения параметра шум-фактор. В данном случае значение шум - фактора для коротко-дистанционного оптического усилителя равен 1-2 дБ. Известно то что, чем меньше значения шум - фактора тем улучшается OSNR оптической системы и обеспечивается надежность оптической связи. Кроме того, пик люминесценции эрбия коротко-дистанционного усилителя при включенном лазере (источника сигнала) и поперечной накачке сглаживается, что ведет сглаживанию спектральной характеристики усилителя и увеличивает пропускную способность ВОЛС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты, полученные в ходе исследований сводятся к следующим:

1. Установлено что, методом термического напыления в вакууме обеспечивается возможность получения оптически однородных диэлектрических плёночных структур с большой концентрацией оксида эрбия Er_2O_3 (10^{20} - 10^{21}) см⁻³, с высокой степенью прозрачности ($\sim 80\%$) в ИК-диапазоне и высоким удельным сопротивлением $\sim 10^9$ Ом см.

2. Экспериментально доказано что, дополнительное легирование оксида эрбия (Er_2O_3) с оксидом алюминия (Al_2O_3), способствует подавлению кластеризации ионов эрбия, что ведет к уменьшению эффекта ап-конверсии, тем самым позволяя достигать экстремально высокой концентрации активных ионов эрбия (10^{20} - 10^{21}) см⁻³ в малых размерах модифицированного участка 2-5 см.

3. Изготовлены методом вакуумного контролируемого термического осаждения планарные оптические световоды составом (Er_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 и Er_2O_3 - Yb_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3) на локальном фрагменте оптического волокна. Установлено, что накачка локально модифицированной среды с длиной волны 980 нм возбуждает ИК-излучение в области ~ 1540 нм, представляющее практический интерес в сфере ВОЛС.

4. Исследованы усилительные свойства планарных оптических структур Er_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 и Er_2O_3 - Yb_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 созданных методом вакуумного

контролируемого термического осаждения на фрагменте оптического волокна и на подложках кремния (SiO_2). Показано, что в оптических структурах, полученных вакуумными методами осаждения, отжиг и плавление вызывает кластеризацию ионов эрбия, в результате чего в спектральных характеристиках уширяется спектр люминесценции и появляются признаки ап-конверсионных процессов.

5. Посредством поперечной накачки ксеноновой лампой (980 нм) установлено, что дополнительное легирование эрбия (Er) иттербием (Yb) способствуют сужению ширины излучаемого спектра люминесценции. Данное явление объясняется тем что, ионы иттербия передают свою энергию ионам эрбия, в процессе перехода на энергетический уровень ниже.

6. Доказано, что оптические структуры созданные методами вакуумного осаждения демонстрируют максимальную интенсивность фотолюминесценции (Er^{+3}) при комнатной температуре ($T=300\text{K}$). Наблюдаемый результат объясняется тем, что оптическая структура на опорной поверхности, локально открытого оптического волокна или кремниевой подложки, формируется из осаждаемой фазы, минуя стадию плавления. В данных условиях подавленность процессов диффузии и конвективного массопереноса в объёме оптической среды позволяет статистически равномерно распределить активные ионы эрбия в стекле

7. Созданы модифицированные оптические волокна и планарные оптические структуры для изготовления сенсоров, волоконных датчиков и волоконно-оптических усилителей использующихся в высокоскоростных ВОЛС. Выявлено, что осажженные модифицированные оптические структуры имеют эффективность согласования с сердцевиной оптического волокна 65% до 75%. В результате данного свойства возрастает эффективность переходов излучения лазера «сердцевина - оптическая среда - сердцевина» обеспечивая эффективное усиление сигнала на 5-10 дБ с локально модифицированного участка размером 2-5 см.

8. Созданы коротко-дистанционные оптические усилители для интегральных оптических систем в виде планарно модифицированных оптических структур наращенных на подложке кварца. Доказано что, данные усилители имеют возможность усиления группового оптического сигнала DWDM системы в диапазоне C-Band (1529 - 1565 нм). Групповой сигнал на выходе такого усилителя имеет сглаженный и линеаризованный характер без применения широкополосных сглаживающих фильтров.

9. Экспериментально доказано, что созданные оптические усилители на базе модифицированных оптических сред с экстремально высокой концентрацией активных ионов редкоземельного элемента имеют низкий параметр шум - фактора, что способствует увеличению показателя OSNR (Optical signal noise ratio) в системах DWDM.

**SCIENTIFIC COUNCIL 16.07.2013.T/FM.29.01 at TASHKENT
UNIVERSITY of INFORMATION TECHNOLOGIES and NATIONAL
UNIVERSITY of UZBEKISTAN on AWARD of SCIENTIFIC DEGREE
of DOCTOR of SCIENCES**

TASHKENT UNIVERSITY OF INFORMATION TECHNOLOGIES

AKMAL INOGAMOV

**MODIFICATION METHODS OF OPTICAL FIBERS
WITH RARE EARTH ELEMENTS AND THEIR
SPECTRAL CHARACTERISTICS**

**05.04.02 – Radio engineering, radionavigation, radiolocation and television systems and
devices. Mobile, fibrous-optical communication systems
(technical sciences)**

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Tashkent – 2016

The subject of doctoral dissertation is registered on N30.09.2014/B2014.5.T329 at Supreme Attestation Commission of the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan.

Doctoral dissertation is carried out at the Tashkent University of Information Technologies.

Abstract of dissertation in three languages (Uzbek, Russian and English) is placed on the web-page Scientific council (www.tuit.uz) and Educational information site «ZIYONET» (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant:	Radjabov Telman Dadayevich doctor of physical-mathematical sciences, professor
Official opponents:	Abdukayumov Abdurashid Abdulhairovich doctor of technical sciences, professor Bahromov Sadulla Abdullayevich doctor of physical-mathematical sciences, professor Rahimov Nematjon doctor of technical sciences, professor
Leading organization:	«UNICON.UZ» Scientific-engineering and marketing researches center

The defense of dissertation will take place on « 25 » February 2016 at 10⁰⁰ o'clock at the meeting of scientific council 16.07.2013.T/FM.29.01 at the Tashkent University of Information Technologies and National University of Uzbekistan. (Address: 100202, Tashkent, Amir Temur str. 108. Ph.: (99871) 238-64-43; fax: (99871) 238-65-52; e-mail: tuit@tuit.uz).

The doctoral dissertation is available in Information-resource center of the Tashkent University of Information Technologies (registration number № _____). (Address: 100202, Tashkent, Amir Temur str., 108. Ph.: (99871) 238-64-43).

The abstract of dissertation is sent out on « 25 » January 2016.
(mailing report № _____ on « ____ » _____ 2016).

H.K.Aripov

Chairman of scientific council on award of scientific degree, doctor of physics-mathematics sciences, professor

M.S.Yakubov

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degree, doctor of technical sciences, professor

T.N.Nishonboyev

Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degree, doctor of technical sciences, professor

Introduction (Annotation of doctoral dissertation)

Topicality and demand of the theme of dissertation. In the global arena, the relation of information and communication technologies directly from throughput capacity of fiber-optical communication networks and a rapid development of market of telecommunications, radio and mobile communication system detects the necessity of implementing modification methods of optical fibers with rare earth elements in order to increase the bandwidth of backbone of optical network which connects convergence nodes of communication systems with high-speed traffic. In the main segments of the communication networks - urban, trunk, international and local area networks, according to the statistics of 2005, the use of the optical fiber was more than 68 million km and increased by industry in general by 15%. At the end of 2012 the index of manufactured and applied optical fibers was 225 million km, 35-36 million km of which belongs to Japan, China People's Republic 100 million km, the United States 32 million km and the countries of the European Union 26 million km.

Broadband LTE (Long Term Evolution) mobile technology of fourth generation began to be applied all over the world. According to the 3GPP (3rd Generation Partnership Project) and the International Organization IMT-Advanced requirements in fourth generation mobile networks the information transmission rate to a single subscriber should not fall below 1Gbps. The application of modified optical fibers in optical communication systems provides base stations of mobile operators with high data rate traffic and contributes to the growth of the number of subscribers.

In this regard, the solution of issues such as modification of the optical fiber with rare earth elements, modification of optical fiber with the application the methods of the quartz resonator and controlled thermal vacuum deposition, high-precision control of the thickness and composition of the deposited multicomponent optical film to locally open core optical fiber, simultaneously controlled vacuum deposition of oxides of erbium, ytterbium, silicon and aluminum, the creation of samples with suppressed the clustering of erbium ions and obtainment of high concentrations of the active ions of rare earth element (10^{20} - 10^{21}) cm^{-3} in formed optical structures, the study of spectral characteristics of modified optical fibers doped with a multicomponent layers Er_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_x and Er_2O_3 - Yb_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_x , ($1 < x < 2$) obtained by thermal vacuum deposition, the creation efficient planar and fiber optical amplifiers with high (10^{20} - 10^{21}) cm^{-3} content of the active ions of rare earth elements, the development of methods of processing fiber-optic materials and development on their basis of optoelectronic data transmission systems in order to solve the problems of low noise figure and high-factor parameter of OSNR (Optical signal noise ratio) in optical amplifiers created based on modified optical fibers with a high concentration of erbium are topical for telecommunications, radio and mobile communication systems.

In order to create high range erbium ions concentrations in modified optical fibers, enhance the processes of effective modification of optical fibers with rare

earth elements and create effective short-distance fiber optical amplifiers there is a representing special interest for the development methods for multicomponent vapor deposition, and modification of optical fibers by the controlled thermal deposition erbium oxide, ytterbium, silicon and aluminum on the optical fiber opened surface.

The subject of current dissertation is serving to provide the practical implementation tasks identified in the Decree of the President of the Republic of Uzbekistan «On measures to further the implementation and development of modern information and communication technologies» on March 21, 2012, № PR-1730 and in the resolution of the Cabinet of Ministers «On approval of the concept of e-commerce in the Republic of Uzbekistan for the period 2016-2018 years» on December 4, 2015, № 353.

Research conformity to the directions of sciences development and technologies of the republic. The dissertation is carried out according to priority directions of state scientific and technical programs of applied research as: ARP-5-«The development of information technologies, telecommunications networks, hardware and software tools, methods and systems of intelligent management and training aimed at improving information society». ARP-4-«Development of methods for using renewable energy sources, the development of technologies and devices based on nanotechnologies, photonics and other advanced technologies».

Review of international scientific researches on theme of dissertation. In world scientific centers and higher educational institutions, including companies and organizations as ITU-T (International Telecommunication Union), Furukawa, Sumitomo, Fujikura (Japan), Corning Optical Communications (USA), Alcatel (France), JSC «Fiber optic systems» (Russia), Dutch Fiber (Germany), Draka (Denmark), Samsung (South Korea) and Pirelli (Italy) the researches are carried out on manufacture and application of fiber-optic data transmission systems, improvement of the optical fiber manufacturing processes and creation of modified fibers with enhanced parameters of spectral characteristics by implementing the processes their modification with rare earth elements. The total market share of these companies in developing optical fibers in the world is about 90%.

By application optical fibers modification methods with rare earth elements, all over the world, the direction of improvement the quality of information transmission parameters and creation new generation efficient optical amplifiers, by the optical fibers modification with rare earth elements were as follows: methods of modifying of optical fibers with rare earth elements have been examined by ALCATEL-LUCENT (France), NOKIA-SIEMENS, (Finland); optical amplifiers by modifying optical mediums with rare earth elements have been developed by ZTE, HUAWEI, (China People's Republic); on the basis of liquid crystals the devices of controlled optical signals of selective switching in different directions have been created by CISCO, FINISAR (USA); the methods of practical application of optical fibers modified with rare earth elements in energy and automation have been developed by ISKRA (Slovenia); modified optical fiber preforms have been created by OPTEL, Nateks, Zelax (Russia).

Scientific research works on issues of using of modified optical fibers with rare earth elements for increasing the spectral efficiency and capacity of optical communication systems, transmission of high-speed data over long distances without the optoelectronic transformation, the creation of efficient optical amplifiers and their implementation in telecommunications, radio and mobile communication systems are carried out.

Degree of study of problem. Researches of scientists as G.P.Agrawal (University of Rochester), A.Girard (EXFO Electro-Optical Engineering), A.J.Morrow, A.Sarkar, P.C.Schultz (Research and Development Division Corning Glass Works), S.R.Nagel, J.B.Macchensey, K.L.Walker (AT&T Bell Laboratories), H.Murata (The Furukawa Electric Company), A.D.Yablon (Interfiber Analysis), N.N.Slepov (Senior researcher, Russian Academy of sciences), A.K.Przhevusky, N.V.Nikonorov (St. Petersburg State University of Information Technologies Mechanics and Optics) and others aimed to development and research the theoretical and practical problems of modifying the optical fibers with rare earth elements used in the fields of ion-plasma, vacuum technologies, optics, radio systems and communication theory, including thermal vacuum deposition methods, methods of spectral investigation of the optical parameters of the modified fibers, methods of controlling the composition of the deposited multicomponent optical films using a radio frequency method of measuring thicknesses have been considered.

Researches related to questions of the development and improving fiber-optics communication lines are held by scientists of republic, including: T.D.Radjabov, S.A.Bahromov, A.M.Nazarov, A.A.Simonov, A.I.Kamardin with their disciples have dealt with issues of application the photoluminescence properties of rare earth elements to the fiber optic lines and J.A.Abdullayev, R.I.Isayev, I.R.Berganov have held their researches on increasing the throughput capacity of optical communication systems. Despite the large number of investigations in the field of fiber-optic communication networks, the modification issues of existing optical fibers are not completely solved. There are no any researches on local modification optical fibers and investigations based on creation locally modified optical fibers which have an extremely high concentration of active rare earth ions ($\sim 10^{20}$ - 10^{21}) cm^{-3} . There are several disadvantages in the known methods of manufacturing of modified optical fibers as the complexity of technological processes with involving high temperatures and the usage of harmful and hazardous substances in modification processes. Until today, methods of precision mechanical processing and rare earth elements ions vacuum deposition on the surface opened optical fiber core with using a wedge-shaped geometry have not been applied for fabrication modified optical fibers. Also, methods of creating modified optical fiber preforms with a high concentration of rare earth elements in an optical fiber core have not been taken into account.

There are also no researches related to the issues of changes in spectral characteristics of optical fibers in modification processes from concentration of rare earth elements and the creation and study of modified optical mediums for compact optical amplifiers used in the integrated optics.

Research conformity to the plans of scientific-research works of higher educational institution. Conformity to the theme of dissertation with the plans of scientific-research works of higher educational institutions is reflected in the following fundamental and practical projects: BV-F2-002, «Investigation of the fundamentals of communication transmission and development of systems and components of fiber-optic communication systems with the use of solitons technologies» (2011-2013); A5-003 «Development of methods for optimizing spectral characteristics of high-speed broadband telecommunications networks» (2012-2014).

Purpose of research is the development of methods of optical fibers with rare earth elements modification by means of thermal vacuum deposition multicomponent films of complex geometry, the fabrication locally modified optical fibers with high concentration of rare earth elements, as well as parameters measurement of modified optical fibers by creation of the complex of optical and mechanical devices.

To achieve this goal the following **tasks of research** are formulated:

- enhancement of the method of manufacturing of optical fibers and creation precision mechanical processing device for the optical fibers modification purposes with rare earth elements in vacuum chamber;

- development of controlled vacuum deposition method for evaporation oxides of erbium, ytterbium, silicon and aluminum to opened core of an optical fiber in order to create high concentration of rare earth elements in modified optical fibers;

- creation and enhancement vacuum devices with ability to control a thickness and composition of deposited elements are created by rare earth elements evaporation in a vacuum atmosphere;

- manufacturing planar optical waveguides with high concentrations of rare earth elements ions (10^{20} - 10^{21}) cm^{-3} are formed on the fragment of local optical fiber core in order to establishment the basic preconditions of development of short-distance optical fiber amplifiers and performs of modified optical fibers;

- studying a composition and a concentration of multicomponent optical structures have obtained by implementing vacuum modification methods based on thermal evaporation rare earth elements;

- carrying out the comparative analysis of spectral characteristics of modified optical fibers with different compositions (Er_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_x and Er_2O_3 - Yb_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_x) of rare earth elements;

- developing short-distance optical amplifiers based on the modified optical mediums and investigation their amplification properties.

Object of research is a single mode optical fibers, multicomponent optical thin films (are representing planar waveguides with wedge geometry), modified optical fiber preforms obtained by vacuum deposition methods and short-distance optical fiber amplifiers based on modified optical mediums.

Subject of research is a rare earth modification methods and their spectral characteristics.

Methods of research. In the research the following methods are used the method of precision mechanical processing of optical fiber cladding, the method of

controlled vacuum deposition of multicomponent films with wedge geometry on the opened core of optical fiber; the method of transverse pumping modified section of an optical fiber by means of the radiation of a xenon lamp, the method of spectral measurements of parameters of modified optical fibers, the radio frequency method to control the thickness of the evaporated layers.

Scientific novelty of research consists in the followings:

the method of controlled vacuum deposition in modification purposes of optical fibers with rare earth elements by the implementation of quartz resonator and thermal vacuum deposition methods has been developed;

the method of simultaneously controlled vacuum deposition of erbium, ytterbium, silicon and aluminum oxides on locally opened optical fiber core surface with high thickness measurement accuracy of deposited multicomponent (Er_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_x and Er_2O_3 - Yb_2O_3 - Al_2O_3 - SiO_x) planar optical films has been developed;

the method of vacuum modification of optical fibers providing high concentration of active erbium ions (10^{20} - 10^{21}) cm^{-3} by formation of erbium ions clustering suppressed structures have been created and experimentally tested;

have been proved that modified optical films manufactured on base vacuum thermal deposition by simultaneously evaporation of metallic erbium, aluminum and silicon oxides at the atmosphere of reactive gas (oxygen) and at the vacuum pressure 0,25-0,35Pa ($(2-3) \cdot 10^{-3}$ mmHg) are causing the intense photoluminescence of Er^{3+} ions in the range of ~ 1540 nm, which represents the practical value for the field of fiber-optical communication;

the method of manufacturing activated optical fiber preforms for the fabrication of a long distance modified optical fibers and creation of effective planar and fiber optical amplifiers which include high concentration (10^{20} - 10^{21}) cm^{-3} of active rare earth ions using in high speed fiber-optical communication networks have been created;

for the erbium ions activization purposes the technique of transverse pumping of planar optical amplifiers on base modified optical mediums for integrated fiber-optical systems has been offered;

measuring methods for study and investigation throughput characteristics of modified optical fibers and amplification properties of short-distance optical amplifiers with observing and registration possibility of spectral characteristics on computer monitor have been proposed;

practical recommendations by choosing the methodology of modification optical fibers and the creation of short-distance optical amplifiers based on the modified optical mediums have been developed;

it is established that, optical amplifiers created on base of modified optical fibers with a high concentration of erbium have a low noise figure and provide high value of OSNR (Optical signal noise ratio).

Practical results of research consist in the following:

the method of preparation an optical fiber for alloying with rare earth elements by polishing the optical fiber cladding to a given depth with a large curvature radius ($R = 180$ mm) has been technically realized.

multicomponent planar waveguides formed on the local opened fragment of optical fiber core, consisting from 5 mol% erbium oxide, 70-85 mol% silicon oxide, silicon monoxide, 10-25 mol% aluminum oxide and 5 mol% ytterbium oxide, providing effectively pump out the laser radiation energy from the core of the single mode optical fiber at the expense of greater value of refractive index have been created;

it is experimentally proved that the adjustment efficiency of optical fiber core and the deposited multicomponent optical structure could reach 65-75% value and provide the amplification of the optical signal up to 5-10 dB from 2-5 cm modified region;

it is established that the maximum photoluminescence intensity of erbium ions (Er^{3+}) was fixed at room a temperature ($T=300\text{K}$) on optical fibers modified by means of vacuum thermal deposition, without annealing. The observed effect can be explained as higher concentration of active erbium ions and obtaining homogenous structure on optical film by applying vacuum thermal deposition method in comparison with chemical vapor deposition or chemical etching;

devices of modification optical fibers for manufacturing active optical mediums allowing to combine in one experimental complex the procedures as ability of control and measurement of alloying elements allows to reduce the cost of material resources by 35% and time for processing the optical fiber active performs to 50%;

application of modified optical fibers between regeneration sections of high-speed spectral multiplexed fiber-optic communication lines are allowed to keep the linear form spectrally multiplexed signal at the same level at the expense of increasing the spectral efficiency and throughput capacity of optical fiber and provide to increase a distance over 100 km without implementing repeaters;

it is established that, short-distance optical fiber amplifiers based on erbium oxide Er^{3+} have an ability to amplify an optical signal up to 15dB at the length of active alloyed section 5-10 cm, have a sensitivity -40dB and low value of the noise factor (1-2 dB), which gives the opportunity implementation them in a weak signal mode;

implementation of short-distance fiber-optical amplifiers in spectral multiplexed high speed fiber-optic communication lines increases OSNR (Optical signal noise ratio) by 3dB (twice) and creates the possibility of increasing not serving amplification sites (15 unites of optical amplifiers per 1000km) and allows to reduce the number of high cost regeneration equipment by 1,5 times.

Practical results and developed effective technical devices for measurement spectral characteristics of optical fibers and their modification allow solving topical problems as manufacturing locally modified optical fibers, preparation activated performs for creation the long distant optical fibers, manufacturing locally modified optical fibers are using in transmission, registration systems and in the systems of information processing.

Reliability of research results. Reliability of research are based on measurements results of spectral characteristics of modified optical fibers with an accuracy of 0,1 nm on the spectral analyzer constructed on the basis of the

diffraction grating with modulation light pattern. The possibility of obtaining 10^{21} cm^{-3} highly concentrated erbium doped optical structures by vacuum modification methods, is confirmed by results of composition of deposited rare earth materials are obtained by X-ray microprobe analyzer. The plausibility of results obtained from practical and scientific researches and their relative coordination are confirmed with test results of parameters of short-distance optical amplifiers in the networks of JSC «Uzbektelecom».

Scientific and practical value results of research. The scientific significance of the research results is increasing a throughput capacity and spectral efficiency fiber-optical communication network by investigation of optical fiber modification methods, enhancement the properties of spectral characteristics of optical fibers, creation the methods and principles of vacuum thermal modification of optical fibers, determination the methods of suppressing active erbium ions clustering in the modified optical fiber, achievement highly concentrated rare earth elements ions in erbium doped optical mediums, investigation the spectral characteristics of optical fibers modified with different compositions of alloying elements, researching the theoretical basis for the application efficient optical amplifiers for systems with wavelength-division multiplexing.

The practical value of the work is provisioning of effective work parameters of short-distance optical amplifiers and modified optical fibers by creation measurement devices complex on base spectrum analyzer with optical signal pattern modulation, developing the devises of transverse pumping and precision devices for mechanical processing of optical fibers, manufacture locally modified optical fibers with a high concentration of rare earth elements (10^{20} - 10^{21} cm^{-3}), creation a modified optical fiber preforms with a predetermined optical characteristics and composition of alloying elements and development short-distance optical amplifiers based on modified optical mediums for effective amplification of optical signals in the (1529 - 1565 nm) range.

Application of research results. It is implemented the method simplifying the technology of manufacturing activated preforms of optical fibers with applying the harmless, environmentally safe modification processes under the vacuum from $1 \cdot 10^{-3}$ to $5 \cdot 10^{-4} \text{ Pa}$, by vacuum thermal deposition pure erbium and germanium oxides (Republic of Uzbekistan IAP N04944 patent for the invention). The optical amplifiers and modified optical fibers obtained by the integration of technological processes as control and measurement of deposited alloying elements into an one experimental complex based on vacuum modification device have been implemented in existing fibers of JSC «Uzbektelecom» (Certificate of the Ministry of development of information technologies and communications of the Republic of Uzbekistan № 02-8/2317, June 12, 2015). The achieved possibility to reduce the cost of material resources by 35% and the time for manufacturing modified optical fiber preforms to 50%. Results as the short-distance optical amplifiers and modified optical fibers has increased the intermediate regeneration distance up to 30% (15 units of optical

amplifiers for 1000 km) and reduced the number of regeneration equipment at 1,5 times. Economic efficiency is 72 million sums.

Approbation of research results. The main theoretical and practical results of dissertation proved on 12 national and foreign practical-scientific conferences: «Vacuum Science and Technology» (Russia, Sochi, 2010); «IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet» (Uzbekistan, Tashkent, 2008); «International conference in Central Asia on Internet» (Uzbekistan, Tashkent, 2013); «Vacuum Science and Technology» (Crimea, Gaspra, 2013); «Info-communication technologies in science and education» (Uzbekistan, Tashkent, 2010); «Application of Information and Communication Technologies» (Uzbekistan, Tashkent, 2010); «IT Promotion in Asia» (Uzbekistan, Tashkent, 2011); «Engineering and communication technologies» (Uzbekistan, Tashkent, 2008); «Problems of Information Technologies and Telecommunications» (Uzbekistan, Tashkent, 2012); «Actual problems of the development of information communications and information society» (Uzbekistan, Tashkent, 2012); «Priorities in the field of science and technology in the XXI Century» (Uzbekistan, Tashkent, 2014).

Publication of research results. On the subject of the dissertation 25 scientific works were published, including 1 patent for invention, in 2 scientific foreign journals 2 scientific papers, in 4 international journals 9 scientific papers and in scientific-practical conferences 12 abstracts.

Volume and structure of dissertation. The dissertation consists of the introduction, five chapters, conclusion, references and contains 199 pages of the text, 75 figures, 14 tables and 12 appendixes.

THE MAIN CONTENTS OF DISSERTATION

In the **introduction** the topicality and demand of the theme of dissertation is substantiated, the aim and the tasks of dissertation are formulated, the object and the subject of a study is determined, the conformity of research to priority areas of the development of science and technologies in the Republic of Uzbekistan is identified, scientific novelty and practical results of the dissertation are presented, also proved the reliability of the obtained results, and the theoretical and practical significance of investigation results are described, the list of results implementations of the dissertation research in a practices and the briefly information about scientific publications and dissertation structure are given.

In the first chapter of dissertation «**Analysis of current state of systems and components of fiber-optic communication lines**» the theoretical and practical analysis of modern fiber-optic communication networks, the main components, elements and nodes implemented in a fiber-optic communication systems (FOCS) systems are considered. Also the main characteristics of modern optical fibers used in FOCS systems are studied. Examples of application of fiber-optic communication lines in wideband radio engineering systems, additional in wideband radio communication systems of fourth generation LTE (Long term evolution) are described. Methods standing for modification of optical fibers have been analyzed. Methods standing for increasing spectral efficiency of FOCS, types of the fibers are suitable for modification with rare earth elements and in particular with the cases existing fiber modification with erbium ions were also studied. In the dissertation work briefly attentions have been carried out to the classification and determination the practical implementation areas of modified optical fibers.

In conclusion of first chapter were summarized main highlights and briefly stated the objectives of the study. The objects are consist of the development a new principles of modification optical fibers with rare earth elements and increase the active erbium ions concentration up to $(10^{20}-10^{21} \text{ cm}^{-3})$, studying miniature optical structures modified with different composition of dopants, the development efficient optical amplifiers on basis of modified optical mediums, development experimental devises for the modification of existing optical fibers, the enhancement of modified optical fibers manufacturing processes, expansion of optical fiber capabilities and the creation modified optical fibers in a laboratory environments.

The second chapter of dissertation «**Development of measurement system for studying spectral characteristics of modified optical fibers**» is devoted to the development of methods and devices for measurement the spectral characteristics of modified optical fibers obtained in a result of experiments. In this chapter has targeted the creation of optical and mechanical devices for measuring spectral characteristics of modified fibers. In this chapter is practically realizing adjusting principles the optical lasers ends with modified fiber core and their design and performance are provided.

To investigate the spectral characteristics of modified fibers alloyed with rare earth elements is necessary to ensure the effective input of laser radiation into the core of single-mode optical fiber. For this purpose had been used frameless laser diodes. For the most efficient input the laser radiation in to the «optical fiber ends» was applied the special technology of producing cones and microlenses which was developed in the Tashkent Institute of Applied Physics. For creation measuring complex for studying the spectral characteristics of modified fibers was used the optical spectrum analyzer (spectrograph) on basis of a diffraction grating (fig.1).

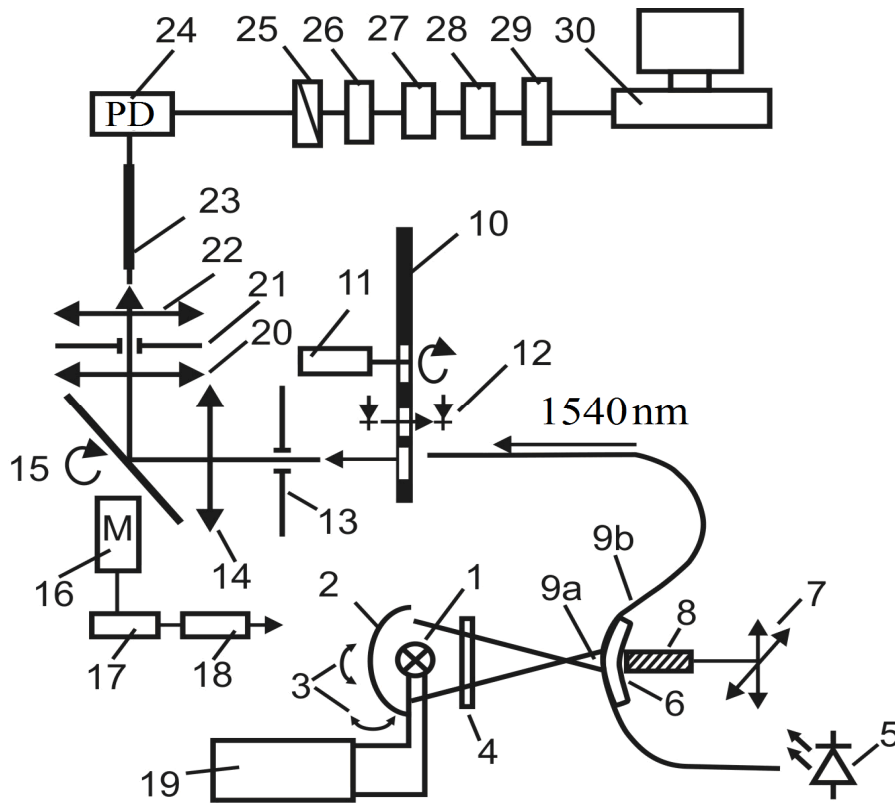


Fig. 1. Functional diagram of the measuring complex based on fiber-optic spectrometer with modulation of the light flux

Here, 1 - radiation from a xenon lamp, 2 - hemispherical mirror, 3 - the adjusting screw, 4-interference filter ($\lambda = 980\text{nm}$), 5-the radiation of a laser, 6 -metal substrate; 7-the adjusting table, 8-fixing clips, 9a - modified optical fiber, 9b-optical fiber, 10-modulating disc, 11-shaft of the engine ($f=50\text{rounds/sec}$), 12-photocoupler, 13 - the entrances slit of the spectrograph, 14-the lens, 15 -grating, 16-the engine of the diffraction grating, 17-electronic engine block, 18-microcontroller, 19 - power supply of xenon lamp, 20 - collimator, 21 - optical output slit, 22 - focusing lens, 23 - input end of an optical harness, 24 - photodiode, 25 - voltage amplifier, 26 - narrow-band filter, 27 - AC-amplifier, 28 - precision detector, 29 - MAX-232 chip based microcontroller PIC-16F873A, 30 - COM port (RS-232) of computer.

The main feature of current developed device for investigation the spectral characteristics of modified fibers is that the spectrograph combined into a single research complex with precision adjustment device. Such kind of combination is allowing the spectrum investigation procedures of modified single mode optical fibers with entered into the core laser radiation.

The implementation of methods of high-performance adjusting of semiconductor laser diode radiation with single-mode optical fiber, the improvement of an optical analyzer device, based on the light flux modulation scheme are provided an opportunity for sensitive measurement of the laser radiation and the luminescence of rare earth elements in modified optical fibers with a high accuracy. Possibilities of full reproducing of measurements has made it possible to solve the given tasks in this chapter

The third chapter of dissertation «**Development methods and devices for modification of optical fibers**» is represent the techniques of modification of existing optical fibers and briefly described the experimental equipments for the practical implementation of modification processes of optical fibers and silica based optical mediums.

The famous optical fiber preforms manufacturing methods are the internal and external axial deposition the impurities of rare earth elements with implementing high temperature treatments. These methods are followed by processing compounds of silicon and other alloying materials with high temperature. The main disadvantage of these methods are the difficulty of optical fiber preform modifying procedures and implementing high temperature treatments on optical fiber which give rise to destruction the crystal structure of silicon glass and inability to control the alloyed impurities concentration during the modification process. In this way, considering disadvantages of optical fiber preform manufacturing methods has been developed and has been brought to implementation the method of controlled vacuum deposition of multicomponent films with different compositions of alloying elements.

The problem of obtaining the most effective erbium amplifiers based on the modified optical fibers is stimulate the development of materials with extremely high concentration of rare earth element ions. It is known that the glass based on silicon dioxide (SiO_2) is a suitable matrix for erbium ions (Er) and provide in an active ions state the photoluminescence. It is proved that the optical structures based on erbium oxide (Er_2O_3), have a huge amount of erbium active ions concentration (Er^{3+}), reaching the values up to $\sim 10^{22} \text{ cm}^{-3}$. The concentration of erbium ions in these optical structures is exceed by several times the concentration of erbium ions in existing optical fibers prepared by standard EDFA (Erbium doped fiber amplifier) active fibers alloying methods.

Thus, the purpose of this chapter is creation the methods and experimental devises for the practical realization the tasks of creation high concentrated erbium mediums. Fig. 2 is representing a functional block diagram of the developed device for the controlled vacuum deposition from two metallic boats. The alloying materials evaporation occurs simultaneously from a two metallic boats with rare-earth element impurities.

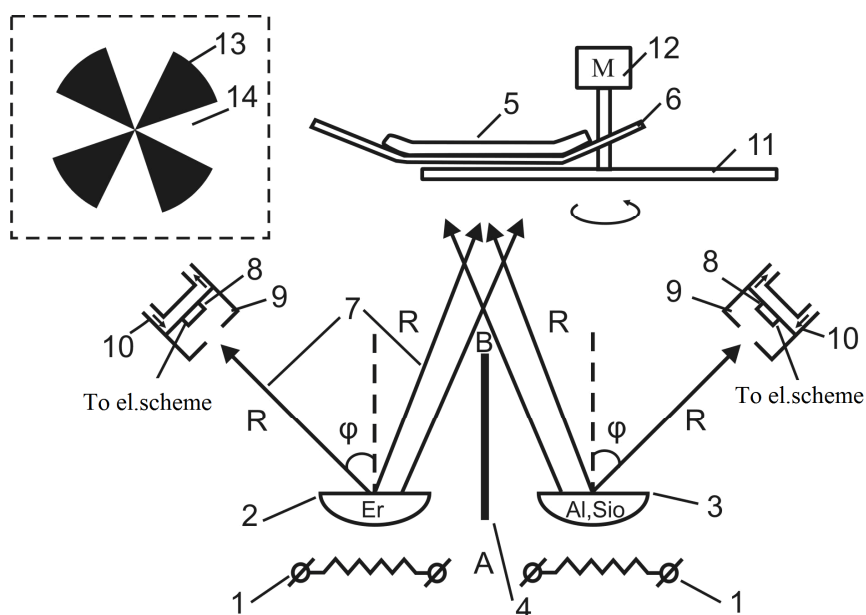


Fig. 2. The device for controlled multicomponent films deposition in a vacuum atmosphere

Here, 1 - tantalum resistive heater, 2 - container with metallic erbium (Er), 3 - container with metallic aluminum (Al) and silicon monoxide (SiO), 4 - separating screen compartments (AB), 5 - metal substrate, 6 - optical fiber with opened core after mechanical processing, 7 - propagation directions of vapors evaporated from the container with alloyed materials, 8 - quartz piezoelectric plates, 9 - casing with a diaphragm, 10 - radiator, 11 - disc obturator with four slits, 12 - engine for the stabilization of obturator speed, 13 - general view of the disk-obturator, 14 - calibrated triangular slits on a disk.

During the experiments by modifying optical structures the multicomponent films as $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-SiO}_x\text{-Al}_2\text{O}_3$ and $\text{Er}_2\text{O}_3\text{-Yb}_2\text{O}_3\text{-SiO}_x\text{-Al}_2\text{O}_3$ elements concentration were obtained on a local fragment of single mode optical fiber. For the task realization was implemented joint thermal deposition technology of metallic erbium (Er), silicon monoxide (SiO) and aluminum oxide (Al_2O_3) directly to the polished section of optical fiber. During the modification process the vacuum chamber are overlapped with reactive gas as oxygen. The experiments were carried out under the $2\text{-}3 \cdot 10^{-3}$ Pa pressure.

During the evaporation process of multicomponent thin films in a vacuum atmosphere is very important to control the thickness of the deposited film and the alloyed materials concentration. In the developed technique has been applied radio frequency depth controlling method based on a measuring the changes of quartz crystal oscillation frequency during the formation of thin film with alloying materials on a crystal surface. In addition, the quartz crystals are very sensitive to small variations of temperature. Thus current evaporation method is equipped with cooling system for quartz sensors. During modification process the compensation of evaporator thermal radiation from the resonator's frequency is guaranty that the measurements of the thickness deposited layer will be stable at 5% accuracy. Erbium and silicon monoxide evaporation was carried out in the vacuum chamber

by means of different heating tantalum boats at a pressure of the working gas (oxygen) $2 \cdot 10^{-3}$ Pa and at 1300 - 1600°C temperature.

The modification processes also include the creation and preparation samples of optical fibers with pre-set parameters. To prepare optical fibers for the modification with rare earth elements have been developed the precision mechanical processing method of an optical fiber surface with controlling the height of the fiber core. The device allows precision polishing and fixating the main fundamental mode - (HE_{11}) in the core of single-mode fiber.

For carrying out precision polishing process were prepared the special metal substrates samples for fixing optical fibers. Fixing substrates are prepared from the duralumin strips of the type (Д1, Д19) and (БАД1). Dimensions of substrates is - 15 mm x 3 mm x 120 mm (W x H x L). These strips are bent to the necessary radius of curvature $R = 180$ mm. By means of the diamond blade with a predetermined depth (0,1 mm) is carved the groove. The radius of curvature is determined accordingly by a curvature radius of aluminum strips.

As shown preliminary calculations, during the polishing process of the objects which has an ideal plane surface, with a radius of curvature - R , and at a depth - d is exposed the polishing section (chord) with a length - L . The ratio of these quantities is determined by a formula $L = \sqrt{8Rd}$ from which we can estimate the geometry of the aluminum strips. The polishing depth - d is expressed by the $d = L^2 / 8$ formula. Before bonding the fiber with duralumin plate (substrate) in to the fiber is entering He-Ne laser emission and controlled by means of microscope. Functional diagram of the developed method for the precision mechanical processing the optical fiber cladding is shown on fig. 3.

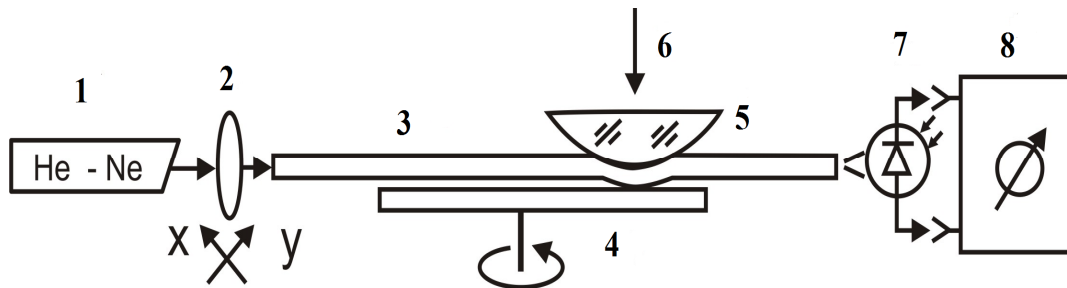


Fig. 3. The block diagram of precision polishing with controlling the depth of optical fiber cladding

Here, 1 - He-Ne laser, 2 - adjustable focusing lens, 3 - optical fiber, 4 - polishing disc, 5 - polishing substrate with fixed optical fiber, 6 - calibrated pressure load, 7 - adjusting table with a photodiode, 8 - optical tester.

The optical tester allows effectively control the polishing depth of optical fiber cladding. Residual power radiation indicates the polishing degree of the core and the cladding of an optical fiber. During the experiments, the residual radiation power was measured between 20% to 80% for different modes and samples of

optical fibers. This allows choosing the optimal mode of polishing to ensure the most effective modification of optical fibers with rare earth elements ions.

The second developed method for manufacturing a modified preforms allows avoiding the toxic compounds and all modification processes are carried out in vacuum chamber by thermal evaporation of rare earth element oxides and including the core material. All modification layers for fiber optic preform which include pure rare earth element oxides are directly evaporating from the metallic boats in to the inside of rotating silicon tube. The ability of multilayer evaporation allows an opportunity the creation optical fiber preforms with various combinations of alloying elements. Fig. 4 is illustrating the proposed method of manufacturing a modified preforms for optical fibers.

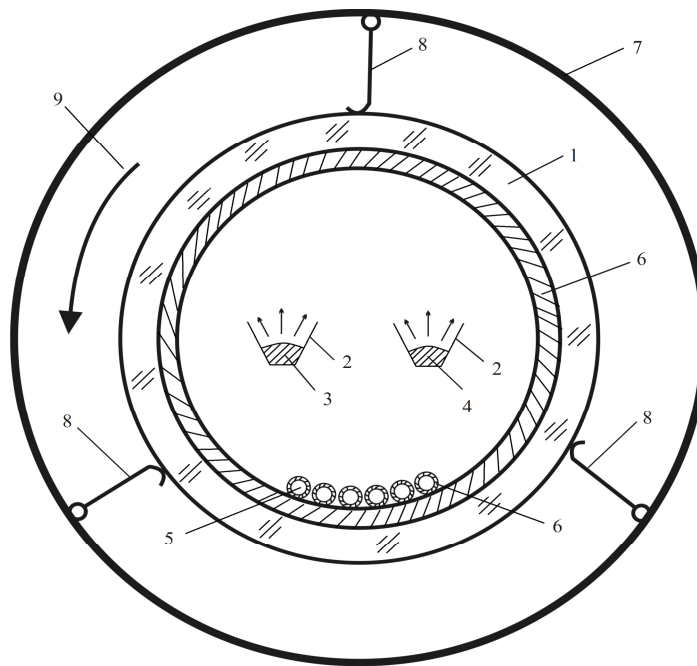


Fig. 4. The method of producing modified optical fiber preforms

Here, 1 - support tube of quartz glass fixed in a rotatable pole, 2 - electrical current heated boats prepared on the basis of refractory material, 3 - evaporating erbium, 4 - germanium dioxide, 5 - dispersed silica powder, 6 - forming on the surface of the tube and dispersed silica powder the layer of depositing materials, 7 - rotating equipment for fixing the quartz glass support tube, 8 - fastening elements, 9 - the direction of rotation and equipment fixed inside the support tube made of quartz glass.

Creating a pre-alloyed performs modified with rare earth elements allows to obtain modified optical fibers with required length and the necessary ion concentration of active element components.

The fourth chapter of dissertation «**Experimental researches of spectral characteristics modified optical fibers**» presents the main results of experimental

investigations of spectral characteristics of the modified optical fibers obtained by implementing developed methods and devices. In this chapter the photoluminescence properties of modified samples of optical fibers with different compositions of alloying rare earth elements were investigated. The structures and compositions of the deposited elements on samples of optical fibers were studied. Practical recommendations according to the developing effective optical fiber amplifiers, creating modified optical fiber preforms and components using in FOCS are considered.

Research has shown that the highest intensity of luminescence radiation of active erbium ions are demonstrated the samples modified by vacuum thermal deposition. Cardinal importance also are representing the selection the types of alloying elements which forms the film covering an open core of optical fiber and selecting the concentration of rare earth elements ions. Operating by the experimental results an additional doping quartz glass (SiO_2) with Al_2O_3 or P_2O_5 an order of magnitude increases the entering concentration limit of free rare earth elements ion oxides. In this work were selected jointly doping erbium oxide (Er_2O_3), silicon oxide (SiO_2) and aluminum oxide (Al_2O_3). Also, as mention above it is possible to use more joint evaporating impurities as phosphorus oxide (P_2O_5). Simultaneous implementing of phosphorus oxide allows compensating and increase the refractive index of the deposited film. But such kind of additional operations complicates the vacuum chamber.

During the measurement operations the spectral characteristics of an optical fiber samples were observed intense luminescence of erbium ions (Er^{3+}) in the infrared radiation range (~ 1540 nm). The spectrum characteristic of modified optical fiber is shown on fig. 5, 6. Obtained spectrums are corresponding to the (Er^{3+}) active erbium ions transition from the first excited state $^4\text{I}_{13/2}$ to the ground state $^4\text{I}_{15/2}$.

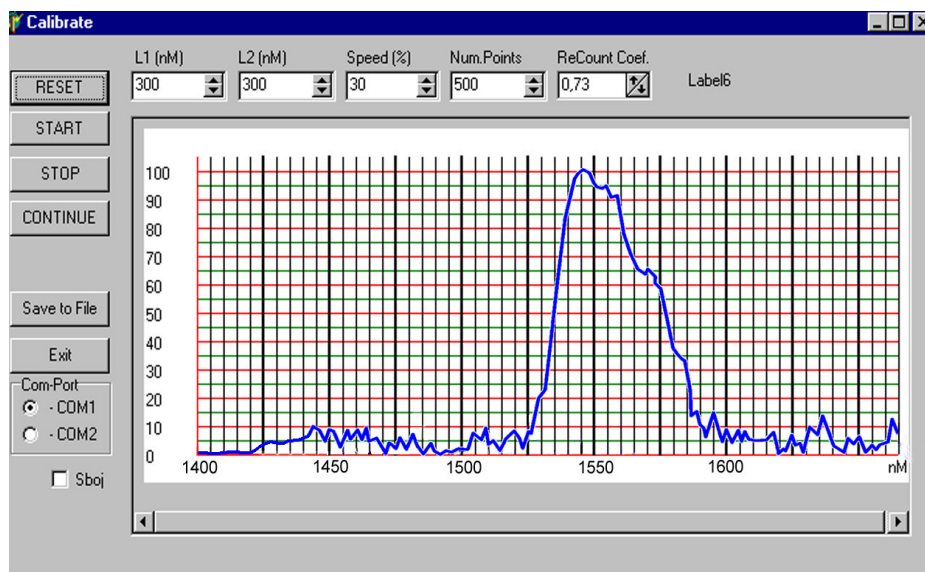


Fig. 5. Luminescence spectrum of the optical fiber modified with Er_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 composition

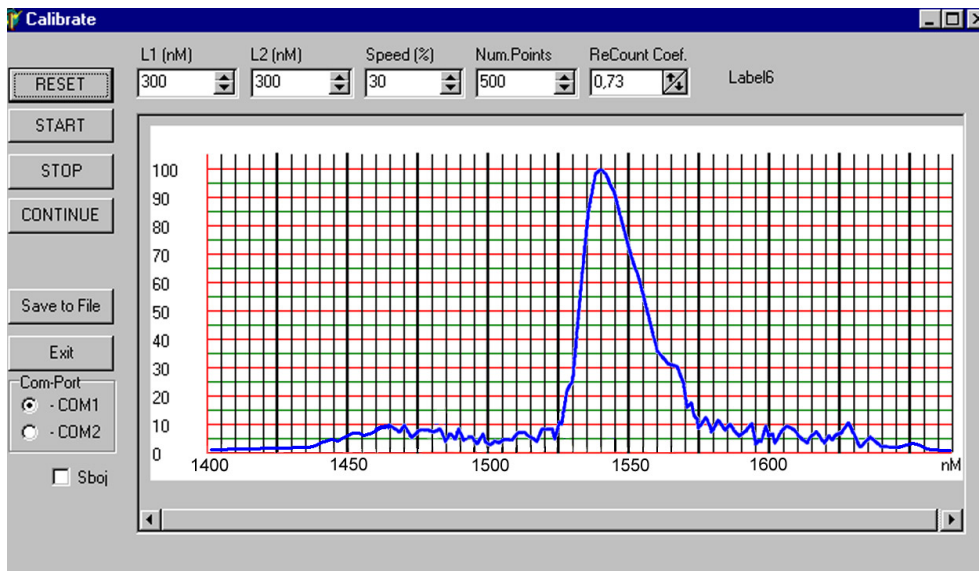


Fig. 6. Luminescence spectrum of the optical fiber modified with Er_2O_3 - Yb_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 composition

It should also be noted that, at the output of the modified optical fiber samples were observed the intense luminescence of erbium ions without high temperature processing. The erbium ions radiation at a wavelength of ~ 1540 nm and at a room temperature $T=300\text{K}$ indicates the possibility of activation Er^{3+} ions without implementing of high-temperature operations were aimed to increase the concentration of free rare earth ions in the glass.

Erbium - ytterbium modified glasses have a several advantages compared to the erbium rare earth element modified glasses. The researches have shown that the concentration of erbium ions in the core of (Yb-Er) modified optical fiber could be significantly higher than the only erbium modified optical fibers and moreover, without significant reduction of quantum efficiency of an active fiber. This effect is explained by the ytterbium ions radiationless transition transfer excitation energy to the erbium ions. In addition, the ytterbium ions have a wide absorption line (from 850 nm to 1100 nm) and the absorption line of erbium ions in the area 980 nm becomes narrow (fig. 6). Measurements of the optical samples were carried out at room temperature $T=300\text{K}$. On the spectral characteristic of optical fiber, the output power is normalized to 100%, and is shown in relative units. In absolute units the power of the luminescence modified samples was around 0,3-0,4mW.

The studying and determination the concentration of doped elements in modified samples were carried out by means electron microanalyzer at the Institute of Geology and Geophysics of Academy of science of Republic of Uzbekistan.

Established that, the vacuum synthesis under the moderate substrate temperatures ($150\text{-}200^\circ\text{C}$) are allowing to obtain the modified optical fibers and planar light guides with suppressed erbium clusterization and free erbium ions concentration up to $(10^{20}\text{-}10^{21})\text{ cm}^{-3}$. Optical losses in the created optical structure are less than 0,15dB/cm. This proves the prospects of using vacuum modification techniques in order to create the optical amplifiers with high efficiency.

Also shows that the luminescent properties of the activator in such kind of non-fusing glasses with a high content of erbium ions favorably differ from the properties of the activator in the same glasses after melting. Fig. 7 shows the luminescent characteristics of samples after heating in a muffle furnace and the changes in luminescence kinetics of erbium ions.

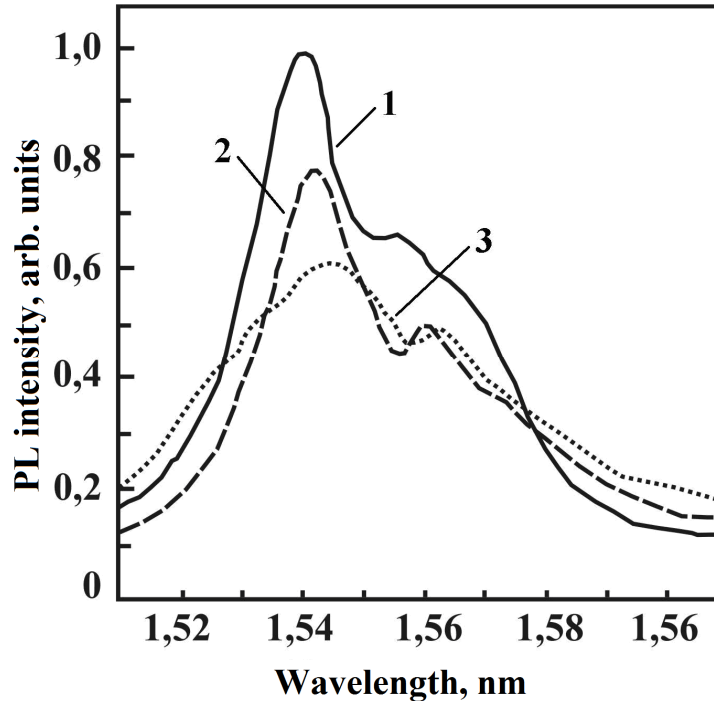


Fig. 7. Kinetics of changing the luminescence spectrums of a modified optical fiber with Er_2O_3 - SiO_x - Al_2O_3 composition

Here, 1 - without heating (melting), 2 - after heating (melting temperature 400°C), 3 - after heating (melting temperature 700°C).

Fig.7 shows the melting of a glass modified with erbium ions causes clustering of erbium. As a result of thermal processing the luminescence spectrum of modified optical samples is became wider and up-conversion processes in the energy transitions kinetics of active erbium ions could be observed. Such kind of properties are also demonstrated the examples modified by Er_2O_3 - Yb_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 composition. The spectral characteristics of modified fibers are measured by entering a laser beam to the input of optical fiber and at the same time when an external pump turned on.

In measurement equipment as the signal source were implemented semiconductor laser with a maximum output power 5mW at a wavelength of 1540 nm. For modified optical fibers the pumping are carried out by the laser with maximal output power 250 mW and 980 nm wavelength or with xenon lamp radiation obtained from infra red filter at 980 nm wavelength.

Then the samples were examined for luminescent and amplifying properties depending on the different concentration of alloying elements (fig. 8).

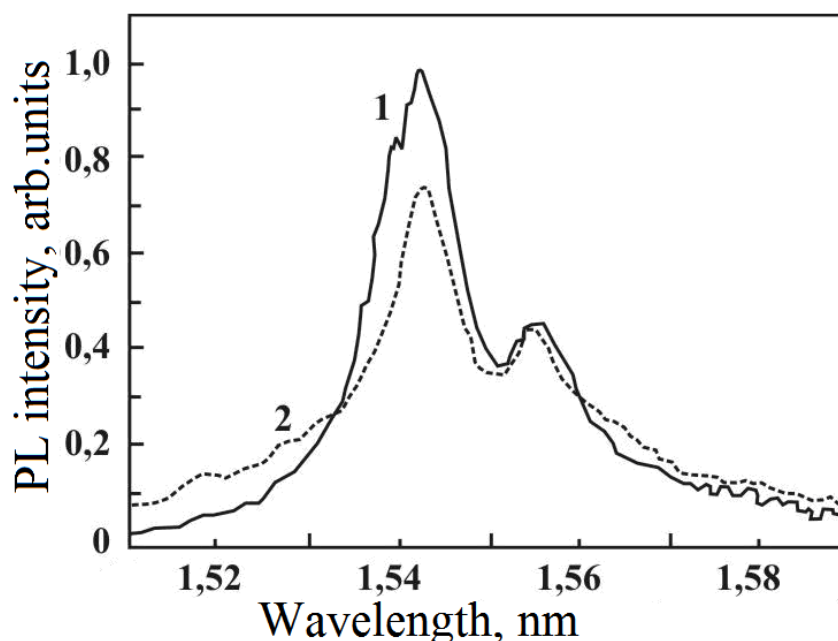


Fig. 8. The luminescence spectrums of optical fiber modified with different concentrations (Er_2O_3 - SiO_x - Al_2O_3) of alloying elements

Here, 1-optical medium modified with 10 mol.% Al_2O_3 and 3000 ppm Er_2O_3 concentration, 2- optical medium modified with 1,5 mol.% Al_2O_3 and 3000 ppm Er_2O_3 concentration.

As seen from fig. 10 the sample - 1 is demonstrated a high level of luminescence intensity relative to the sample - 2. This phenomenon is explained by the greater concentration of the additional alloying element of Al_2O_3 . According to the experimental results can be concluded that increasing the concentration of aluminum oxide in the erbium modified multicomponent composition suppresses clustering of erbium ions thereby allows increasing the photoluminescence intensity. On the spectral characteristic the output power of an optical fiber is normalized to 100% and is shown in relative units. The power luminescence of modified samples is approximately in the 0,3-0,4mW range.

Based on the conducted experiments and measurements were built the relation the quantum efficiency of the short distance fiber amplifiers from the erbium ions and aluminum impurities concentration (table 1). This relation table could be used to optimize the amplification parameters of short distance erbium doped fiber amplifiers.

The table is representing results the amplification efficiency measuring of planar light guide. All output signal values are given in relative units. For the unit «1» accepted the maximum gain obtained at the maximal doping of aluminum and at the optimal doping mode of erbium oxide.

Table 1

The results of measurements the quantum efficiency of the modified samples as an optical light amplifiers

Er₂O₃ ppm Al₂O₃ mol. %	Photoluminescence intensity in arbitrary units								
	10	50	100	250	500	1000	3000	5000	10000
0	1	0.77	0.61	0.38	0.07	—	—	—	—
1.5	1	0.94	0.92	0.79	0.60	0.29	0.02	—	—
2.5	1	0.98	0.96	0.92	0.80	0.69	0.30	0.13	—
10	1	0.98	0.96	0.94	0.85	0.73	0.34	0.15	0.03
15	1	1	0.98	0.96	0.91	0.81	0.43	0.23	0.10
18	1	1	1	0.98	0.96	0.88	0.56	0.32	0.18

Despite the fact at high concentrations of erbium oxide relative amplification efficiency decreases, but in current case the quantum efficiency is not decrease. This effect can be explained by large number of emitting centers of erbium ions after co-evaporation with aluminum oxide. Summarize, we can make a conclusion as the additional co-deposition erbium ions with aluminum oxides allows to reduce a length of active fiber and bring it to 5-10 cm without changing the amplification gain.

The fifth chapter of dissertation «**Development short-distance optical fiber amplifiers based on modified optical mediums**» is devoted to the methods of creating short-distance optical fiber amplifiers. In this chapter the experimental processes of creation planar optical amplifiers for integrated optical systems are described. Also current chapter the calculation of parameters of short-distance optical amplifiers for spectral multiplexed systems is considered. The main advantages of the short-distance optical amplifiers are the high concentration of active rare earth ions in the modified area.

In the fifth chapter were proposed two methods of manufacturing short-distance optical amplifiers. The first proposed method is manufacturing of short-distance optical fiber amplifiers with using locally modified optical fibers by implementing a method of thermal deposition. As mentioned vacuum deposited optical structures on the local modified optical fiber allow amplifying the optical signal up to 8 dB on a 4 cm surface. Optical amplifiers based on locally modified optical fibers do not require complex adjustment schemes for adjusting current amplifiers with optical fibers of DWDM system.

The second method is creation short-distance optical amplifiers for integrated optical systems by depositing modified multi-component thin films to the surface of the polished substrate of silicon monocrystal (fig. 9). The process of building a multilayer (SiO_x - GeO₂ - Er₂O₃) optical film was held in a vacuum atmosphere. According to the experimental results, obtained nanostructures with high

concentrations of active erbium ions ($10^{20} - 10^{21}$) cm^{-3} are able efficiently amplify an optical signal up to 6dB/cm.

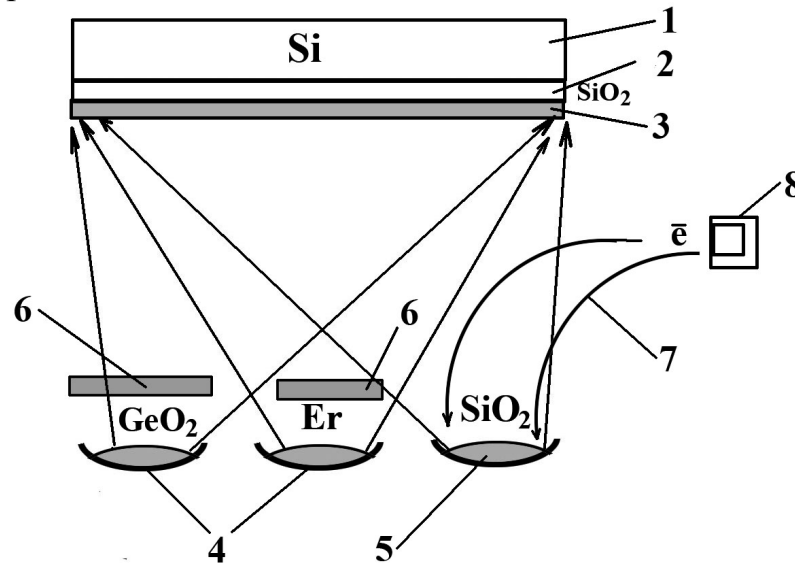


Fig. 9. The block diagram of manufacturing process short-distance fiber amplifiers for integrated optics systems

Here, 1 - silicon monocrystal substrate, 2 - a layer of oxidized silicon; 3 - formed in the core layer of the planar waveguide alloyed layer, 4 - tantalum boats for evaporation alloying materials, 5 - refractory boat from titanium diboride (TiB_2), heated by an electron beam, 6 - flaps, 7- trajectory of the electron beam, 8 - hot cathode.

For measurement purposes of spectral characteristics and amplification parameters of short distance-fiber amplifiers were implemented the following connection diagrams shown in fig. 10.

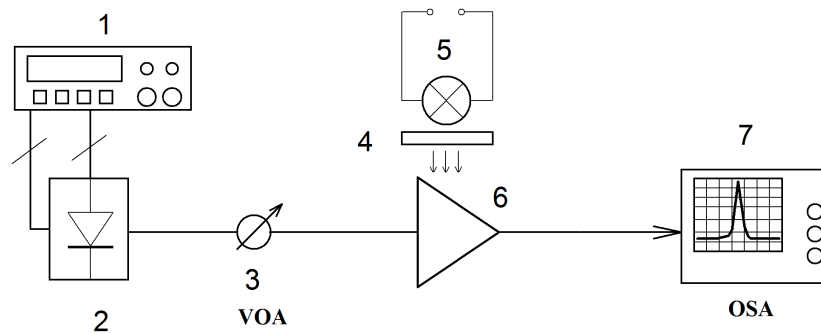


Fig. 10. The block diagram of optical devices connection for the measurement amplification gain of optical amplifier

Here, 1 - signal source (generator of a DC current), 2 - semiconductor laser, 3- optical variable attenuator, 4 - 980 nm wavelength interference filter, 5 - xenon lamp connected to the power supply with adjustable AC control, 6 - short-distance optical amplifier, 7 - spectrum analyzer (OSA).

Table 2 represents the experimental results of amplification characteristics created short-distance optical amplifiers.

Table 2

The measurement results of amplifying properties of short-distance optical amplifiers

Pumping (%)	50%	100%	50%	100%
Input power of optical signal (dBm)	Output power of optical signal (dBm)		Signal gain (dB)	
-30	-10,1	-7,2	19,9	22,8
-25	-7,1	-4,8	17,9	20,2
-20	-3,8	-1,5	16,2	18,5
-15	-1,6	1,1	13,4	16,1
-10	-0,5	2,2	9,5	12,2
-5	1	2,9	6	7,9

According to the obtained results, when a pumping power is half - 50% of its 100% value, for the low signals -30dBm, the gain of an optical amplifier will be equal to 12,02 dB. When a pump signal is equal to the maximum value - 100%, for the input signals at a range - 30dBm, the gain of optical amplifier is equal to 15,68dB. It is explained by the amplifying property of erbium-doped optical amplifier is directly proportional to the pump power. But when the input signal continues to grow the amplification gain of erbium doped optical amplifier stops and the amplifier starts to switch in to the saturation mode. This effect is common to all erbium doped optical amplifiers. Fig. 11 represents comparative characteristics of modern amplifiers and created short distance optical amplifiers.

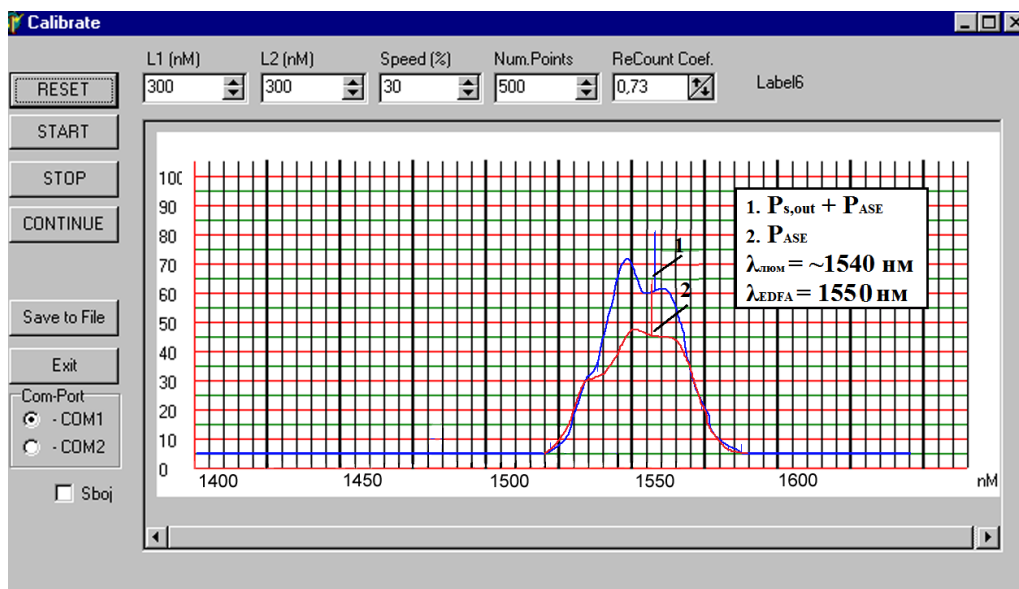


Fig. 11. Spectral characteristics of modern EDFA amplifier (modified section of optical fiber - 2 m) and short-distance amplifier (modified section - 6cm)

Here, 1 - amplified optical radiation $\lambda = 1550$ nm ($P_{S,OUT}$), 2 - automatic spontaneous emission level of erbium ions (P_{ASE}), 3 - luminescence peak of erbium ions on wavelength $\lambda = \sim 1550$ nm.

Short-distance optical amplifiers modified section length is equal 6 cm and the quantity of active erbium ions during the pumping processing can reach $(10^{20}-10^{21})$ cm⁻³. For modern EDFA amplifiers created by known modification methods of axial deposition such concentration value of erbium ions could be achieved on the length of the modified optical fiber sections more than 4 m. According to the experimental results were presented in table 2 the short-distance optical amplifiers based on modified optical mediums have a possibility of amplifying optical signals in the 10-15dB range. As seen on fig.11 the parameter of P_{ASE} for short distance optical amplifiers is significantly lower compared with modern EDFA amplifiers. Respectively for short distance optical amplifiers the noise-figure will be lower than EDFA amplifiers. In this case, the noise - figure of short distance optical amplifier is $NF=1-2$ dB. In conclusion we can say that for DWDM link OSNR budget the short distance optical amplifiers will be more prospective. Moreover, the peak of erbium luminescence of short-distance optical amplifiers during the pumping becomes smoothed and amplified signals spectrums become linear. Such effect contributes to linearization of DWDM group signals.

CONCLUSION

The main obtained results during the researches are follows:

1. It is established that, by the method of vacuum thermal evaporation could be obtained optically homogeneous dielectric erbium oxide Er_2O_3 thin film structures with a high concentration of active erbium ions $(10^{20}-10^{21}$ cm⁻³) with a high degree of transparency ($\sim 80\%$) in the visible and infra red bands and also have a high resistivity value $\sim 10^9$ Ohm cm.

2. Additional doping erbium oxide (Er_2O_3) with aluminum oxide (Al_2O_3) promotes the suppression the erbium ions clustering which lead to decrease up-conversion and modified samples fabricated by means of vacuum thermal deposition methods have an extremely high concentration of active erbium ions up to $(10^{20}-10^{21}$ cm⁻³) in a small active modified section (2-5 cm) have been experimentally proved.

3. By controlled vacuum thermal deposition Er_2O_3 - $SiO_2-Al_2O_3$ and Er_2O_3 - Yb_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 planar optical waveguides on a local fragment of the optical fiber have been manufactured. It is established that, pumping of locally modified mediums with 980 nm wavelength radiation the deposited films are excited infrared radiation at ~ 1540 nm which represents practical importance for FOCN.

4. Amplification properties of Er_2O_3 - $SiO_2-Al_2O_3$ and Er_2O_3 - Yb_2O_3 - SiO_2 - Al_2O_3 planar optical structures created by vacuum controlled thermal deposition on an optical fiber fragment and on silicon substrates (SiO_2) are investigated. In modified optical structures obtained by vacuum deposition methods the melting treatments causes clustering of erbium ions. As a result in the modified samples the

luminescence spectrum becomes wider and occurring up-conversion processes in the photoluminescence kinetics.

5. Light emitting properties of modified planar samples with direct transverse optical pumping (based on xenon lamp at 980 nm) are studied. It is established that additional doping erbium (Er) with ytterbium (Yb) promotes the narrowing luminescence spectrum bandwidth. This phenomenon is explained by the fact that, ytterbium ions transfer their energy to the erbium ions during the transition to a lower energy level.

6. Proved that the optical structures modified by vacuum deposition methods demonstrate the maximum intensity of the photoluminescence (Er^{+3}) ions at room temperature ($T = 300\text{K}$). Observed result explained by the fact modifying optical structure on the optical fiber or silicon substrate is directly formed from the deposited phase, avoiding melting stage. Furthermore, using the dopants as Al and SiO can create higher concentrations of the optically active ions Er, compared with chemical modifying methods or magnetron sputtering.

7. Modified optical fibers and planar optical structures for creation sensors, optical detectors and optical fiber amplifiers implementing in FOCN are manufactured. It is revealed, that deposited multicomponent optical structures have adjustment efficiency with fiber core around 65% to 75%. As a result of this adjustment increases the efficiency of the laser transitions «fiber core – modified medium - fiber core» providing effective signal gain around 5-10 dB from locally modified section size 2-5 cm.

8. Short-distance optical amplifiers for DWDM systems based on modified optical structures on base silicon substrate have been fabricated. Such kind of optical amplifiers have the opportunity to amplify a DWDM group optical signal in the range of C-Band (1529 - 1565 nm). The group signal at the output of this amplifier is adjusted and linearized without implementing broadband smoothing filters.

9. Its is experimentally proved that short distance optical amplifiers based on the modified optical mediums with an extremely high concentration of active rare earth ions have a low noise-figure parameter which increases the overall budget of OSNR (Optical signal noise ratio) DWDM systems.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; I part)

1. Inogamov A.M., Radjabov T.D. Modified thin-film fabrication method using vacuum thermal evaporation and vacuum synthesis: application to preparation of Er-doped fiber amplifiers// International Journal of Innovation and Applied Studies, 2014. – vol. 5, N 1. – pp. 16-22, (5) Global Impact Factor, IF = 0.786, (23) Scientific Journal Impact Factor, IF = 3.5.

2. Inogamov A.M. Improving spectral efficiency of short-distance Er^{3+} modified optical fiber amplifiers by implementing acousto-optic tunable filters//

International Journal of Engineering Research and General Science, 2015. – vol. 3, N 1. – pp. 970-975, (5) Global Impact Factor, IF = 0.564, (23) Scientific Journal Impact Factor, IF = 3.843.

3. Radjabov T.D., Inogamov A.M. Ion modification of optical materials with application of vacuum technologies// Проблемы информатики и энергетики. – Ташкент, 2012. – № 6. – С. 67-70, (05.00.00, № 5).

4. Radjabov T.D., Inogamov A.M. Application of acoustic-optical rebuild filters for optimize the spectral characteristics of EDFA// Инфокоммуникации: сети-технологии-решения. – Ташкент, 2013. – № 2(26). – С. 13-16, (05.00.00, № 2).

5. Radjabov T.D., Inogamov A.M. Preparation processes of short - distance erbium doped fiber amplifiers// Инфокоммуникации: сети-технологии-решения. –Ташкент, 2015. – № 1. – С. 13-16, (05.00.00, № 2).

6. Патент РУз №04944. Способ изготовления заготовки активированных оптических волокон/ Раджабов Т.Д., Иногамов А.М., Камардин А.И., Симонов А.А., Давронбеков Д.А., Таженев К.Е.// Расмий ахборотнома. – 2014. - №4.

7. Иногамов А.М. Стандарт CDMA 2000 1x EV-DO в сотовых сетях 3G// Вестник ТУИТ. – Ташкент, 2007. – № 3. – С. 34-36, (05.00.00, № 10).

8. Иногамов А.М. Особенности радиointерфейса стандарта CDMA2000 1x EV-DO// Вестник ТУИТ. – Ташкент, 2007. – № 4. – С. 34-36, (05.00.00, № 10).

9. Раджабов Т.Д., Иногамов А.М. Использование микрокольцевых резонаторов для организации связи с волновым мультиплексированием (WDM) в ВОЛС// Вестник ТУИТ. – Ташкент, 2010. – № 1. – С. 38-40, (05.00.00, № 10).

10. Иногамов А.М. Возможности построения высокоскоростных волоконно-оптических линий связи// Вестник ТУИТ. – Ташкент, 2010. – № 4. – С. 83-87, (05.00.00, № 10).

11. Раджабов Т.Д., Иногамов А.М. Особенности построения высокоскоростных WDM сетей в волоконно-оптических сетях передачи информации// Вестник ТУИТ. – Ташкент, 2012. – № 1. – С. 22-25, (05.00.00, № 10).

12. Иногамов А.М. Повышение эффективности оптических усилителей на основе модифицированных оптических волокон//Доклады Академии Наук Республики Узбекистан. – Ташкент, 2013. – № 2. – С. 14-17, (05.00.00, № 9).

II бўлим (II часть; II part)

13. Иногамов А.М. Применение вакуумного осаждения для изготовления модифицированных оптических материалов используемых в ВОЛС// Естественные и технические науки. – Москва, 2013. – № 5 (67). – С. 30-36.

14. Раджабов Т.Д., Симонов А.А., Иногамов А.М. Применение вакуумного осаждения для изготовления волоконно-оптических модулей и

усилителей// Научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника»: Материалы конференции. – Москва, 2010. – С. 258-261.

15. Симонов А.А., Раджабов Т.Д., Иногамов А.М. Вакуумное регулируемое осаждение многокомпонентных оптических пленок на фрагменты волоконных световодов// XX-юбилейная научно-техническая конференция с участием зарубежных специалистов «Вакуумная наука и техника»: Материалы конференции. – Москва, 2013. – С. 192-194.

16. Radjabov T.D., Hakimov Z.T, Inogamov A.M. Application of acoustic-optical rebuilding filters for optimize the spectral characteristics of fiber-optical communication networks// Fourth IEEE International Conference on Application of Information and Communication Technologies. – Tashkent, 2010. – pp. 45-49.

17. Inogamov A.M. Prospects of Using Optical Amplifiers in Fiber Optic Communication Systems// International Conference on IT Promotion in Asia. – Tashkent, 2011. – pp. 187-189.

18. Inogamov A.M. Adoption of the networks (3G) in Uzbekistan on basis radio interface IMT-MC// Fourth IEEE and IFIP International Conference in central Asia on Internet: Works. – Tashkent, 2008. – pp. 40-44.

19. Inogamov A.M. Using photoluminescent properties of rare-earth elements in a fiber optic communication system (FOCS)// International IEEE conference in Central Asia on Internet. - Tashkent, 2013. – pp. 46-47.

20. Иногамов А.М. Новый стандарт радиointерфейса IMT – MC в Узбекистане// Шестая Международная научно – техническая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов государств участников РСС/ «Техника и технология связи»: Труды. – Ташкент, 2008. – С. 115-117.

21. Иногамов А.М. Теоретические предпосылки использования солитонной технологии в ВОЛС// Фан ва таълимда ахборот-коммуникация технологиялари: Сб. статей науч. тех. конф. – Ташкент, 2010. – С. 21-25.

22. Иногамов А.М. Модифицированные оптические волокна и применение их в ВОЛС// Проблемы информационных технологий и телекоммуникаций: Сборник докладов. – Ташкент, 2012. – С. 160-162.

23. Раджабов Т.Д., Иногамов А.М. Перспективы использования оптических усилителей нового поколения// Проблемы информационных технологий и телекоммуникаций: Сборник докладов. – Ташкент, 2012. – С.178 - 181.

24. Раджабов Т.Д., Иногамов А.М. Использование фотолуминесцентных свойств редкоземельных элементов в ВОЛС// Актуальные проблемы развития инфокоммуникаций и информационного общества. – Ташкент, 2012. – С. 27-31.

25. Раджабов Т.Д., Иногамов А.М. Ионная обработка оптических волокон редкоземельными элементами// VII Международная научная конференция «Приоритетные направления в области науки и технологии в XXI веке»: Сборник статей, том-2. – Ташкент, 2014. – С. 234-237.

Автореферат «ТАТУ хабарлари» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилди. (22.01.2016 йил).

Босишга рухсат этилди: 25.01.2016 й.
Бичими 60x84 1/8. «Times Uz» гарнитураси. Офсет усулида босилди.
Шартли босма табағи 4,5. Нашр босма табағи 4,5. Тиражи 100. Буюртма: № 8
«Top Image Media» босмахонасида чоп этилди.
Тошкент шаҳри, Я. Ғуломов кўчаси, 74-уй

