

УДК 681.7.022

**ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АКТИВИРОВАННЫХ ВОЛОКОН
ПРИМЕНЯЕМЫХ В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ**

Жураева Нафиса Иноятовна – кандидат физико-математических наук, доцент,
e-mail: juraeva.0878@gmail.com

Ташкентский университет информационных технологий имени Мухаммада ал-Хорезми,
г.Ташкент, Узбекистан

Аннотация. Волоконно-оптические усилители, легированные редкоземельными элементами, дают возможность усиления на широком спектре длин волн передачи оптических сигналов, имеющих низкий уровень шума, нелинейность и совместимость с оптическими сетями. Данная статья представляет исследование и обзор технологий изготовления активированных волокон, которые широко применяются в волоконно-оптических системах передачи информации. Активированные волокна содержат добавки оптических активных веществ, таких как ионы редкоземельных металлов или полупроводниковые наночастицы, которые позволяют им выполнять функции усиления или генерации световых сигналов. Технология изготовления активированных волокон, легированных редкоземельными элементами для использования их в волоконных лазерах и усилителях является одним из важных направлений современной науки. Проведён обзор технологий получения кварцевых заготовок активированных оптических волокон, необходимых для производства волокон с улучшенными характеристиками. В частности, рассматриваются методы волоконного втягивания, отложения слоя, парофазная и жидкофазная технологии, которые позволяют контролировать концентрацию и распределение активных веществ в волокне. Приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных для определения оптимальных параметров процесса изготовления активированных волокон. Рассмотрены влияние типа и концентрации активных веществ, температурных режимов и других факторов на оптические и физические свойства волокон.

Ключевые слова: оптическое волокно, редкоземельные элементы, парофазная технология, жидкофазная технология, активированное волокно, волоконные усилители.

UDK 681.7.022

**TECHNOLOGIES FOR FABRICATION ACTIVATED FIBERS USED IN FIBER-
OPTICAL TRANSMISSION SYSTEMS**

Juraeva Nafisa Inoyatovna – Doctor of philosophy physics and mathematics (PhD), docent,
e-mail: juraeva.0878@gmail.com

Tashkent University of Information Technologies named after Muhammad Al- Khwarizmi,
Tashkent, Uzbekistan

Abstract. Rare-earth doped fiber optic amplifiers enable amplification over a wide range of optical signal transmission wavelengths, with low noise, non-linearity and compatibility with optical networks. This article presents a study and review of technologies for the manufacture of activated fibers, which are widely used in fiber optic information transmission systems. Activated fibers contain additives of optical active substances, such as rare earth metal ions or semiconductor nanoparticles, which allow them to perform the functions of amplifying or generating light signals. The technology of manufacturing activated fibers doped with rare earth elements for use in fiber lasers and amplifiers is one of the important areas of modern science. A review of technologies for obtaining quartz preforms of activated optical fibers necessary for the production of fibers with improved characteristics has been carried out. In particular, methods of fiber retraction, layer deposition, vapor-phase and liquid-phase technologies are considered, which allow controlling the

concentration and distribution of active substances in the fiber. The results of experimental studies carried out to determine the optimal parameters of the process of manufacturing activated fibers are presented. The influence of the type and concentration of active substances, temperature regimes and other factors on the optical and physical properties of fibers is considered.

Key words: optical fiber, rare earth elements, vapor phase technology, liquid phase technology, activated fiber, fiber amplifiers.

UO‘K 681.7.022

TOLALI-OPTIK UZATISH TIZIMLARIDA QO‘LLANILADIGAN FAOLLASHTIRILGAN TOLALARNI TAYYORLASH TEXNOLOGIYALARI

Jurayeva Nafisa Inoyatovna-fizika-matematika fanlari nomzodi, dotsent,
e-mail: juraeva.0878@gmail.com

Muhammad al-Xorazmiy nomidagi Toshkent axborot texnologiyalari universiteti,
Toshkent sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. Nodir yer elementlari bilan legirlangan optik tolali kuchaytirgichlar past shovqin, chiziqli bo‘lmagan va optik tarmoqlar bilan mos keladigan optik signal uzatishning keng to‘lqin uzunligi sohasiga kuchaytirish imkonini beradi. Ushbu maqolada optik tolali axborot uzatish tizimlarida keng qo‘llaniladigan kiritmali tolalarni tayyorlash texnologiyalari tadqiq qilingan. Boyitilgan tolalar optik jihatdan faol moddalarning kiritmalarini o‘z ichiga oladi, masalan, nodir yer ionlari yoki yarim o‘tkazgich nanozarrachalari, ular yorug‘lik signallarini kuchaytirish yoki hosil qilish funksiyalarini bajarishga imkon beradi. Tolali lazerlar va kuchaytirgichlarda foydalanish uchun nodir yer elementlari bilan legirlangan faollashtirilgan tolalarni tayyorlash texnologiyasi zamonaviy fanning muhim yo‘nalishlaridan biridir. Xususiyatlari yaxshilangan tolalarni ishlab chiqarish uchun zarur bo‘lgan faollashtirilgan optik tolalarning kvars preformlarini olish texnologiyalari ko‘rib chiqilgan. Xususan, toladagi faol moddalarning konsentratsiyasi va taqsimlanishini nazorat qilish imkonini beruvchi tolani uzaytirish, qatlamni cho‘ktirish, bug‘-faza va suyuqlik-faza texnologiyalari ko‘rib chiqilgan. Faollashtirilgan tolalarni ishlab chiqarish jarayonining optimal parametrlarini aniqlash uchun o‘tkazilgan eksperimental tadqiqotlar natijalari keltirilgan. Faol moddalarning turi va konsentratsiyasi, harorat rejimlari va boshqa omillarning tolalarning optik va fizik xususiyatlariga ta’siri ko‘rib chiqilgan.

Kalit so‘zlar: optik tola, nodir yer elementlari, bug‘-faza texnologiyasi, suyuqlik-faza texnologiyasi, faollashtirilgan tola, tolali kuchaytirgichlar.

Введение

Волоконно-оптические системы связи всё больше внедряются в системах передачи информации. Это связано с несколькими причинами, в частности:

- в системах оптической связи световые лучи передают информацию на скорости света, что показывает широкую пропускную способность;
- волокно состоит из диэлектрического материала, поэтому почти не подвергается влиянию электрических помех;
- повышенная защита от несанкционированного доступа;
- малое затухание сигнала, на длине волны 1550 нм. оптоволокно на один километр обладает затуханием 0.2-0.3 дБ.

В протяжённых волоконно-оптических линиях связи (ВОЛС) для усиления сигнала применяются волоконно-оптические усилители. Одним из видов усилителей являются усилители, легированные редкоземельными ионами. В сердцевину оптического волокна вводятся примеси трёхвалентных редкоземельных элементов, применение которых объясняется тем, что возбуждаемые определённым источником энергии они имеют длину

волны излучения, соответствующую диапазону с минимальными потерями, основанные на свойствах флуоресцирующей легирующей примеси редкоземельных ионов, вводимых в качестве легирующей примеси в сердцевину оптического волокна.

В волоконных усилителях в качестве активной среды в зависимости от требуемой длины волны генерации, используются такие редкоземельные ионы как Yb^{3+} , Er^{3+} , Tm^{3+} , Nd^{3+} , Pr^{3+} , Ho^{3+} и др. Свойства ионов, связанные с процессами поглощения света или люминесценцией, определяются разрешёнными внутриконтинуальными переходами между $4f^n$ состояниями, а также межконтинуальными переходами между $4f^n$ и $5d$ состояниями [1, 2].

РЗ элементы распределяются на крамерсовские - с нечётным числом $4f$ -электронов и некрамерсовские - с нечётным числом $4f$ -электронов.

Для РЗ-ионов с нечетным числом электронов в основной конфигурации применима теорема Крамерса, которая утверждает: в любом электрическом поле, но в отсутствие внешнего магнитного поля, каждый уровень энергии системы с нечетным числом электронов n -кратно вырожден, где n – четное число (не обязательно одно и то же для всех уровней). Поэтому, например, ион Er^{3+} является крамерсовским ионом с нечетным числом $4f$ -электронов (основная конфигурация – $4f^{11}$) и полудельным J (основной мультиплет – $^4I_{15/2}$). В то же время, ион Tm^{3+} – некрамерсовский с четным числом $4f$ -электронов (основная конфигурация – $4f^{12}$) и целым J (основной мультиплет – 3H_6) [3].

Методы и материалы

Первый волоконный лазер был изготовлен на основе волокна легированного ионами неодима. В настоящее время одним из распространённых РЗЭ применяющихся в системах волоконной связи является Er. Волоконно-оптический усилитель, активированный ионами трёхвалентного эрбия Er^{3+} EDFA (erbium-doped fiber amplifier), усиливает сигналы в полосе спектра 1535...1565 нм, а также в полосе 1570...1610 нм. Волоконные лазеры, легированные ионами тулия (Tm^{3+}) и гольмия (Ho^{3+}) с длиной волны излучения 1980 нм в основном применяются в медицине и в приборах, требующих использования лазерного излучения безопасного для глаз (например, лазерные дальнометры или источники для зондирования атмосферы) [4].

В волоконно-оптических линиях передачи информации используются три типа эрбиевых волоконных усилителей: усилитель мощности, линейный усилитель и предварительный усилитель.

Усилитель мощности располагается после системы мультиплексирования, линейный усилитель располагается в промежутках линий связи для компенсации ослабления сигнала на расстоянии до 160 км, которое возникает из-за затухания в оптоволокне. Усиление доходит до 18...23 дБ, предварительный усилитель располагается перед демультиплексором по длинам волн и позволяет увеличить отношения сигнал/шум на входе электронных усилительных каскадов после оптоэлектронных детекторов, регистрирующих информационные сигналы на различных длинах волн [5].

Величина усиления сигналов EDFA зависит от величины усиления для слабого сигнала, насыщенной выходной мощности, коэффициента шума и полосы пропускания [6]. Увеличение концентрации РЗ ионов в стекле при сохранении квантового выхода люминесценции приводит к сокращению длины активированного волновода, ослабляющее негативное влияние нелинейных эффектов [4]. Концентрация легированных элементов также влияет на характеристики усилителя, в частности, увеличение концентрации приводит к образованию кластеров. Образование кластеров происходит за счёт потери однородности ионов активатора пространственного распределения в сетке стекла или кристалла в матрице материала.

Еще одной из причин появления кластеров является недостаточная растворимость активированных ионов в материале матрицы. Для изготовления активированных волокон кварцевое стекло является в настоящее время основой для изготовления волоконных лазеров и усилителей [8].

Растворимость РЗЭ в кварцевом стекле мала (обычно $< 0,1$ мас. %), поэтому для повышения их концентрации без фазового разделения применяют одновременное введение с РЗЭ и модификаторов (Al_2O_3 или P_2O_5), концентрация которых составляет несколько процентов.

Для получения кварцевых заготовок оптических волокон наиболее распространены парофазные методы. Эти методы приведены в работах [7, 8]. С использованием парофазного метода можно получить оптические волокна с относительно малыми потерями ($\sim 0,2$ дБ/км на $\lambda = 1,55$ мкм) и широкой полосой пропускания (> 1 ГГц·км). По свойству образования и осаждения оксидов кремния и легирующих компонентов парофазные методы делятся на следующие виды [8]:

- метод внутреннего парофазного осаждения (модифицированное химическое парофазное осаждение – MCVD – modified chemical vapor deposition);
- метод внешнего парофазного осаждения (OVD – outside vapor deposition);
- метод парофазного осевого осаждения (VAD – vapor axial deposition);
- плазмохимические методы (PMCVD – plasma modified chemical vapor deposition, PCVD – plasma chemical vapor deposition, POD – plasma outside deposition).

Поскольку РЗЭ ионы вводятся во внутреннюю оболочку волокна, при изготовлении активных оптических волокон по способу введения РЗЭ методы получения заготовок активных волокон можно разделить на две группы [8]:

- введение РЗЭ через паровую фазу (парофазная технология);
- введение РЗЭ из раствора солей (жидкофазная технология).

В методе внутреннего парофазного осаждения в кварцевую трубку вводятся пары тетрахлорида кремния ($SiCl_4$), галогенидов легирующих компонентов ($GeCl_4$, BBr_3 , $POCl_3$ и т.д.) и кислород (рис.1) [8]. Использование кварцевого стекла с добавлением алюминия и фосфора значительно уменьшает образование кластеров редкоземельных ионов [10]. Кислородно-водородная горелка перемещается с заданной скоростью вдоль трубки. При этом происходит окисление галогенидов с образованием оксидов кремния и легирующих компонентов. При легировании редкоземельных элементов в методе MCVD, их хлориды помещаются в специальную камеру и до начала процесса нагреваются в атмосфере хлорагента для дегидратирования хлорида РЗЭ и его приплавления к стенкам кварцевой камеры. Причиной этого является то, что хлориды РЗЭ имеют высокую температуру кипения (> 1500 °С) (рис.2).

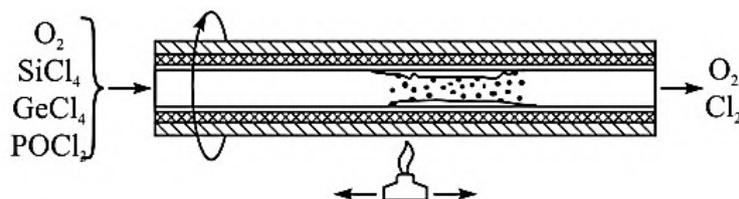


Рис. 1. Схема процесса получения заготовки методом MCVD: химическое образование и осаждение оксидов [8].

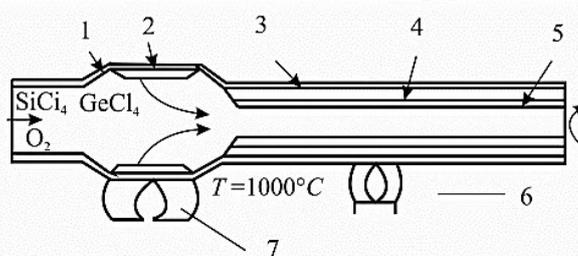


Рис. 2. Схема процесса получения заготовки, легированной РЗЭ, с использованием нагретой камеры: 1 – камера для хлорида РЗЭ, 2 – хлорид РЗЭ, 3 – опорная кварцевая трубка, 4 – светоотражающая оболочка, 5 – пористый слой сердцевинки, 6 – горелка для осаждения слоев, 7 – горелка для нагрева РЗЭ [8].

В волоконно-оптических эрбиевых усилителях используются волокна, легированные ионами эрбия и иттербия, потому что ионы иттербия обладают более широкой полосой поглощения. Парофазная технология даёт возможность введения в сердцевину оптического волокна только один вид редкоземельных элементов, так как в этом методе сложно контролировать температуру и скорости поступления двух видов РЗ элементов. Когда грелка уходит далеко от камеры, на стенке опорной трубки происходит конденсация хлорида легирующего редкоземельного элемента. По этой причине невозможно получить длинные заготовки волокна.

Для поддержания температуры нагрева галогенидов редкоземельных элементов, исключения их преждевременного окисления и минования конденсации галогенидов на холодных участках опорной трубки, метод парофазной технологии модифицирован введением электропечи для нагрева кварцевой лодочки с хлоридом эрбия (ErCl_3), и создано устройство для синхронного перемещения печи с лодочкой и рабочей горелкой [8].

Оптические волокна на основе кремнезема, легированные с высокой концентрацией Yb иттербия, изготовленные с использованием газофазного осаждения на основе технологии MCVD, исследованы для выяснения предела концентрации легирующей примеси Yb_2O_3 , которую можно было бы внедрить в кварцевое стекло без негативных последствий [11]. Наиболее часто используются в промышленности стеклянные алюмосиликатная, алюмофосфосиликатная матрицы для сердцевины активного волокна. Исследования показали, что высоколегированные Yb световоды (до 3,4 мол. % Yb_2O_3 для алюмосиликатного стекла и 2,4 мол. % для алюмофосфосиликатного стекла) могут практически полностью терять свои активные свойства, и наиболее вероятной причиной этого является концентрационное тушение люминесценции. В работе [11] также разработан самый короткий волоконный усилитель на основе кремнезема, легированного Yb, длина активного волокна которого составляла менее 4 см.

Одним из типов парофазной технологии является MCVD-метод с источником импульсного испарения хелатов РЗЭ. В данном методе нагретые выше своей температуры кипения хелаты РЗЭ испаряются и по обогреваемому трубопроводу поступают в опорную трубку в месте ее нагрева рабочей высокотемпературной печью. Для исключения преждевременной реакции окисления, основные газообразные реактивы метода MCVD и пары хелатов РЗЭ вводятся в опорную трубку в разных местах. Выделение углерода служит недостатком данного метода.

Результаты

Результаты исследований при изготовлении заготовок из кремнезема, легированного Tm, с использованием MCVD-хелатного метода показали, что метод ступенчатой добавки сажи обеспечивает более высокое включение оксида алюминия Al_2O_3 и оксида тулия Tm_2O_3 по сравнению с методом одновременного добавления сажи [12].

Для предотвращения конденсации и обеспечения равномерного массового потока важно иметь соответствующее управление температурой, чтобы эффективно подать пар. С помощью метода ступенчатой присадки сажи введены 2,4 мольных % Al_2O_3 и 1,2 мольных % Tm_2O_3 . Также была получена хорошая продольная однородность разности показателей преломления и диаметра сердцевины.

В жидкофазной технологии для получения заготовки активных волокон волоконных усилителей широко используется метод MCVD, в котором пористый слой, формирующий сердцевину, легируется растворами солей редкоземельных элементов и модификаторов. Процесс получения заготовки MCVD-методом с использованием растворов солей РЗЭ приведён на рис.3. и включает 4 этапа [8]:

- осаждение пористого слоя, формирующего сердцевину;
- пропитка пористого слоя раствором солей РЗЭ и модификатора;
- сушка пористого слоя;
- «сжатие» заготовки.

Такие факторы, как период погружения, неравномерность толщины, пористости и распределения пор по размерам в наплавленном слое сердцевины влияет на характеристики волокна, которое приводит к изменению концентрации РЗЭ и неоднородности по длине заготовки и волокна. В работе [13] проведено исследование влияния параметров, связанных с различными фазами процесса легирования раствора, а именно систематическим исследованием было выявлено осаждение сажи методом MCVD и пропитка РЗ методом легирования раствором, которое привело к оптимизации условий изготовления для достижения лучшего контроля над легированием РЗ элементов, его равномерности по длине заготовки и повышения надёжности. Показано, что за счет поддержания оптимизированных условий изготовления, воспроизводимость процесса была достигнута около 80 %. [13]

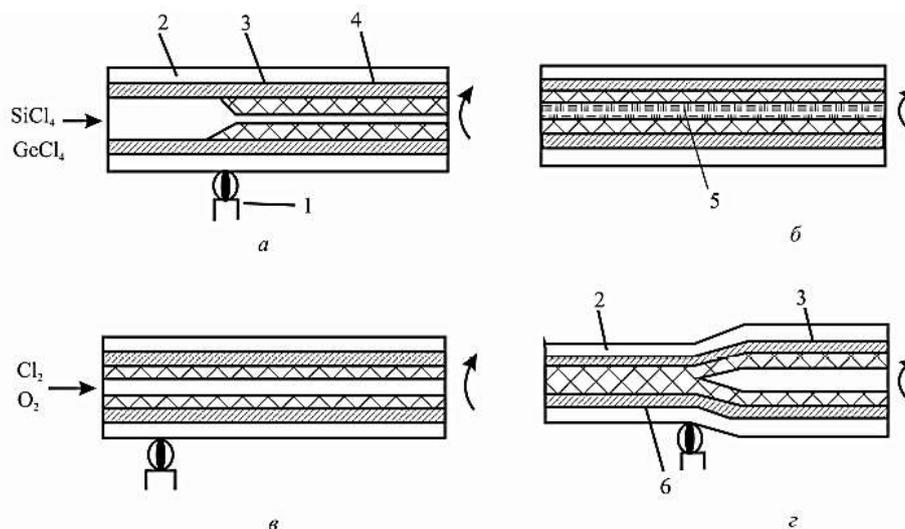


Рис. 3. Схема процесса получения заготовки MCVD-методом с использованием растворов солей РЗЭ: а – нанесение материала сердцевины, б – пропитка заготовки раствором РЗЭ, в – сушка заготовки, г – «схлопывание». 1 – горелка, 2 – опорная трубка, 3 – светотражающая оболочка, 4 – пористая сердцевина, 5 – раствор РЗЭ, 6 – остеклованная сердцевина, легированная РЗЭ [8].

Обсуждение

Изготовление волноводного усилителя, легированного эрбием-иттербием, в качестве интегрального оптического усилителя, который повышает интенсивность оптических сигналов на длинах волн связи представлен в работе [15]. Оптический волноводный усилитель для интегральной оптики изготовленный легированием редкоземельного иона эрбия Er, работает на длине волны 1,55 мкм. При нанесении волноводов из фосфатного стекла, легированного Er использован золь-гель метод, концентрация которого составляла $1-2 \cdot 10^{20}/\text{см}^3$. Удержание и коэффициент усиления волновода можно увеличить, уменьшив ширину волновода до 0,5 мкм. В этом случае чистое усиление может превышать 1 дБ. В качестве легирующей примеси в оптических усилителях, является иттербий (Yb). За счёт технологии изготовления волновод Er:Yb:Al в фосфосиликатном стекле имеет низкие потери и усиление составляет около 2 дБ. В центре внимания исследования находится технология изготовления (материалы и методы) волновода [15].

В работе [16] разработан и реализован метод контролируемого вакуумного осаждения многокомпонентных пленок с различными составами легирующих элементов. Созданные модифицированные оптические волокна и планарные оптические структуры для изготовления сенсоров, волоконных датчиков и волоконно-оптических усилителей могут использоваться в высокоскоростных ВОЛС.

Прямое осаждение из паровой фазы оксидов редкоземельных элементов, а также равномерное осаждение легируемых элементов даёт возможность увеличения концентрации

активных редкоземельных ионов [17,18]. Методом термического напыления в вакууме можно получить оптически однородные диэлектрические плёночные структуры с большой концентрацией оксида эрбия Er_2O_3 (10^{20} - 10^{21}) см^{-3} , с высокой степенью прозрачности (~80 %) в инфракрасном диапазоне и высоким удельным сопротивлением $\sim 10^9$ Ом см. Оптические усилители, созданные на базе модифицированных оптических структур с высокой концентрацией активных редкоземельных ионов имеют низкий параметр шум-фактора, что позволяет увеличить показатели OSNR (Optical signal noise ratio) в системах DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) [18].

В методе поверхностно-плазменного химического осаждения из паровой фазы (SPCVD-Surface Plasma Chemical Vapor Deposition) при изготовлении заготовок для оптического волокна на внутреннюю поверхность длинной трубки-подложки послойно наносится высокочистый и специально легированный кремнезем. После сжатия трубки заготовка напыленного стекла располагается на ее оси, образуя сердцевину из фибры, а добавки формируют радиальный профиль показателя преломления [19].

Концентрация активатора в плёнках с высоко легированным эрбием на основе кремнеза, полученных с помощью SPCVD метода, на два порядка выше характерной для волоконных лазеров. Только частичная релаксация структуры пленки в процессе синтеза препятствует передвижению ионов эрбия, что уменьшает образование кластеров, вызванных низкой взаимной растворимостью оксидов эрбия и кремния. Поэтому даже при высоких, до 10см^{-3} , концентрациях эрбия квантовая эффективность нерасплавленного аморфного композита остается высокой. Это открывает хорошие перспективы для их применения в активных устройствах интегральной оптики, в которых длина активной части канального волновода составляет всего несколько сантиметров [19].

Метод SPCVD может успешно использоваться для производства преформ, легированных РЗ ионами, совместимых с требованиями волокон с большой модовой площадью LMA (Large Mode Area) [20]. В проведённых экспериментах для получения отложений внутри кварцевой трубки для осаждения использовались реагенты SiCl_4 , BCl_3 , AlCl_3 , YbCl_3 , CeCl_3 и C_2F_6 . Осаждение происходит на начальных сантиметрах столба плазмы. Область отложения можно смещать вперед и назад, чтобы получить общую длину отложения, так как применяемая микроволновая мощность определяет длину столба плазмы, путем модуляции этой мощности. Частота сканирования плазмы модулируется в диапазоне 0,1÷20 Гц. При частоте 1 Гц при длине осаждения 400 мм в трубке 16x20 мм (внутренний диаметр x наружный диаметр) каждый нанесенный стекловидный слой имеет толщиной около 100 нанометров [20].

Заключение

Проведённый анализ технологий изготовления активированных волокон, для использования в волоконных усилителях и лазерах, применяемых в волоконно-оптических линиях связи, показывает, что основное внимание уделяется увеличению концентрации легированных редкоземельных элементов, уменьшению кластеризации и потерь, которое приводит к эффективности элементов и компонентов волоконно-оптических систем передачи информации.

Литература

- [1] Давронбеков Д.А., Жураева Н.И. Use of optical amplifiers doped with rare earth elements in FOCL. Scientific-technical journal: Vol. 5 : Iss. 1 , Article 7. 2022, P 45—50.
- [2] Davronbekov D.A., Jurayeva N.I. Features and principle of operation of fiber lasers based on active fiber doped with rare-earth ions. ICTACS – 2022. 10-12 October 2022, Tashkent.
- [3] U.V. Valiev, Sh. A. Rakhimov, N.I. Juraeva, R.A. Rupp, L. Zhao, Zh. Wang, Zh. Zhai, J.B. Gruber and G.W. Burdick. Optical and magneto-optical properties of Ho^{3+} : YGG// Phys. Stat. Sol.(b) – 2010 - Vol. 247 - No. 1 - p. 163–169.

- [4] Е.А.Савельев. Кластеризация итербия в оптических волноводах на основе аморфного диоксида кремния. Дисс. М.-2017. 101 С.
- [5] Хасанов, М. М. у. Применение присадок из редкоземельных металлов в волоконно-оптических усилителях / М. М. у. Хасанов // Актуальные проблемы науки и образования в современном вузе : сборник трудов V Международной научно-практической конференции, Стерлитамак, 16–18 сентября 2021 года. – Стерлитамак: Башкирский государственный университет, Стерлитамакский филиал, 2021. – С. 287-291. – EDN HVGGVD.
- [6] Wasfi, Mahmud. (2009). Optical Fiber Amplifiers-Review. International Journal of Communication Networks and Information Security. 1.
- [7] Digonnet, Michel. (2001). Rare-Earth-Doped Fiber Lasers and Amplifiers. Inc. New York EUA. 172-184. 10.1201/9780203904657.
- [8] Технология производства и свойства кварцевых оптических волокон: учеб. пособие / Г.А. Иванов, В.П. Первадчук. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2011. – 171 с.
- [9] L. Cognolato. Chemical Vapour Deposition for Optical Fibre Technology. J. Phys. IV France 05 (C5) C5-975-C5-987 (1995). DOI: 10.1051/jphyscol:19955115
- [10] F. Funabiki, T. Kamiya, and H. Hosono, Doping effects in amorphous oxides, Journal of the Ceramic Society of Japan 120(11), 447 – 457 (2012).
- [11] K. K. Bobkov et al., "Properties of Silica Based Optical Fibers Doped With an Ultra-High Ytterbium Concentration," in Journal of Lightwave Technology, vol. 40, no. 18, pp. 6230-6239, 15 Sept.15, 2022, doi: 10.1109/JLT.2022.3191862.
- [12] K. A. Mat-Sharif et al., "Fabrication of Tm₂O₃/Al₂O₃-silica preform by improved MCVD-chelate delivery system," 2014 IEEE 5th International Conference on Photonics (ICP), Kuala Lumpur, Malaysia, 2014, pp. 119-122, doi: 10.1109/ICP.2014.7002329.
- [13] Sen, Ranjan & Dhar, Anirban. (2012). An Improved Method of Fabricating Rare Earth Doped Optical Fiber. 10.5772/28734. <https://www.researchgate.net/publication/221925159>
- [14] Pilz, S.; Najafi, H.; El Sayed, A.; Boas, J.; Kummer, D.; Scheuner, J.; Etissa, D.; Ryser, M.; Raisin, P.; Berger, S.; et al. Progress in the fabrication of optical fibers by the sol-gel-based granulated silica method. In Proceedings of the SPIE: Microstructured and Specialty Optical Fibres, Brussels, Belgium, 3 April 2016.
- [15] Mirhosseini, S., Kazemikhah, P., Aghababa, H. *et al.* Fabrication of an erbium–ytterbium-doped waveguide amplifier at communication wavelengths for integrated optics applications. *SN Appl. Sci.* 5, 39 (2023). <https://doi.org/10.1007/s42452-022-05258-8>
- [16] Патент РУз №04944. Способ изготовления заготовки активированных оптических волокон/ Раджабов Т.Д., Иногамов А.М., Камардин А.И., Симонов А.А., Давронбеков Д.А., Таженов К.Е.// Расмий ахборотнома. – 2014. - №4.
- [17] Д.Давронбеков, З.Хакимов. Методы улучшения спектральных характеристик волоконно-оптических систем передачи информации: монография. – Т.: “Yoshlar nashriyot uyı”, 2020. – 112 с.
- [18] Hakimov Z.T., Davronbekov D.A. Equalization of spectral characterist of optical signals by acousto-optic filters // 2007 3rd IEEE/IFIP International Conference in Central Asia on Internet, ICI 2007. – p.1-3
- [19] Golant, Konstantin. (2007). Surface plasma chemical vapor deposition: 20 years of application in glass synthesis for lightguides (a review). 10.13140/2.1.3053.6640.
- [20] Barnini, Alexandre & Robin, Thierry & Cadier, Benoit & Aka, Gerard & Caurant, Daniel & Gotter, T & Guyon, Cédric & Pinsard, Emmanuel & Guitton, P & Laurent, Alexis & Montron, R. (2017). Rare earth-doped optical fiber core deposition using full vapor-phase SPCVD process. 10.1117/12.2252448.