

УДК 681.7.068

**М.Е. Лихачев¹, М.М. Худяков¹, Д.С. Липатов²,
А.Н. Абрамов², А.Н. Гурьянов²**

¹ Институт общей физики имени А.М. Прохорова
Российской академии наук, Научный центр волоконной оптики
им. Е.М. Дианова, Москва, Россия

² Институт химии высокочистых веществ имени Г.Г. Девярых
Российской академии наук, Нижний Новгород, Россия

ER-YB-СВЕТОВОДЫ НА ОСНОВЕ АЛЮМОФОСФОРСИЛИКАТНОЙ СТЕКЛЯННОЙ МАТРИЦЫ

Представлены результаты исследования свойств Er-Yb-световодов с сердцевинной из алюмофосфоросиликатного стекла. Измерена зависимость эффективности преобразования накачки в сигнал от состава стекла. Определен диапазон оптимальных составов сердцевинной, позволяющий обеспечить короткую длину усилителя (не более 1 м) и малую разность показателей преломления сердцевинной и оболочки (менее 0,0035), что открывает возможность создания одномодовых Er-Yb-световодов с большой площадью моды и высоким порогом нелинейных эффектов.

Ключевые слова: Er-Yb-световод, световоды с большой площадью моды, эрбиевый усилитель.

**M.E. Likhachev¹, M.M. Khudyakov¹, D.S. Lipatov²,
A.N. Abramov², A.N. Guryanov²,**

¹Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences, Dianov
Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, Russia

²G.G. Devyatykh Institute of Chemistry of High Purity Substances RAS,
Nizhny Novgorod, Russia

ER-YB FIBERS BASED ON ALUMINOPHOSPHOSILICATE GLASS

The paper presents results of studying properties of Er-Yb fibers based on aluminophosphosilicate glass matrix. The dependence of the pump-to-signal conversion efficiency on the glass composition is revealed. Optimal core compositions, which makes it possible to provide a short amplifier length (no more than 1 meter) and a small core-clad refractive index difference (below 0.0035), has been determined. It opens up the possibility of creating single-mode Er-Yb fibers with a large mode area and a high threshold of nonlinear effects.

Keywords: Er-Yb fiber, large mode area fiber, erbium amplifier.

Введение

Создание высокоэффективных волоконных лазеров и усилителей в спектральной области вблизи 1,55 мкм в настоящее время является крайне актуальной задачей, что связано с применением таких источников для оптической связи, дистанционного зондирования (лидары), накачки различных лазеров (тулиевых, рамановских и т.п.) [1–5]. Средние мощности уровня от нескольких ватт до сотен ватт достигаются, как правило, в данном спектральном диапазоне при помощи Er–Yb-световодов [6], либо использованием световодов, легированных только Er (не содержащих Yb), с увеличенным диаметром сердцевины [7]. В то же время помимо высокого уровня средней мощности ряд задач требует также достижения высокого уровня пиковой мощности. Это накладывает дополнительные ограничения на конструкцию как самих активных световодов, так и усилителей на их основе – такие световоды должны обладать большой площадью моды (БПМ) и иметь высокую концентрацию активной добавки (для снижения рабочей длины). Особенностью конструкции как Er–Yb, так и Er-(не содержащих иттербий) световодов с БПМ и накачкой по оболочке является достаточно низкая эффективность преобразования накачки в сигнал при достижении предельно высокой пиковой мощности. Причины снижения эффективности разные для указанных типов световодов. Для Er–Yb-БПМ-световодов это падение эффективности при увеличении коэффициента усиления, а для эрбиевого световода с накачкой по оболочке – большой процент непоглощенной накачки. Решить проблему низкой эффективности оказалось возможным путем реализации конструкции так называемого комбинированного усилителя, который состоит из Er-световода, сваренного последовательно с Er–Yb-световодом [8]. В данном случае излучение накачки и усиливаемого сигнала вводятся попутно в Er-световод, который поглощает часть излучения накачки и обеспечивает высокий коэффициент усиления для входящего сигнала. Затем оставшаяся накачка вместе с усиленным сигналом вводится в Er–Yb-световод, который, в свою очередь, преобразовывает всю оставшуюся накачку в сигнал с высокой эффективностью при условии того, что коэффициент усиления в нем не превышает 3–5 дБ. Такая конструкция усилителя позволяет обеспечить максимальную эффективность преобразования

накачки в сигнал одновременно с достижением близкого к рекордному порога нелинейных эффектов.

Основной проблемой предложенной конструкции усилителя оказалась сложность достижения высокого качества выходного излучения, что связано с существенно неодномодовым режимом работы существующих Er-Yb-БПМ-световодов. Так, в работах [6, 8 и 9] использовался световод LMA-EYDF-25P/300-HE компании Nuferr. Данный световод обладает высокой эффективностью преобразования накачки в сигнал благодаря высокому содержанию P_2O_5 в сердцевине, однако это приводит к росту разности показателей преломления сердцевины и оболочки из нелегированного кварцевого стекла (dn) до уровня на 0,017. Режим, близкий к одномодовому, в данном случае достигается за счет создания промежуточной оболочки (пьедестала) вокруг сердцевины, показатель преломления которой всего на 0,0035 ниже, чем показатель преломления сердцевины. В стандартных световодах со ступенчатым профилем показателя преломления такая dn позволяет вывести нежелательные высшие моды путем намотки световода на катушку малого радиуса. Однако в конструкции световодов с тройной оболочкой недостаточно большой диаметр пьедестала приводит к тому, что высшие моды не могут быть эффективно выведены из сердцевины, и значительная доля их мощности продолжает распространяться в области сердцевины. Как следствие, это приводит к существенному ухудшению качества пучка при увеличении выходной мощности [9].

Таким образом, актуальной задачей является поиск новых матриц стекла, обеспечивающих высокую растворимость оксидов эрбия и иттербия и одновременно низкую апертуру сердцевины относительно нелегированного кварцевого стекла. Разработка подобных стекол позволит изготавливать световоды с БПМ без пьедестала и тем самым откроет путь для создания световодов с БПМ, работающих в одномодовом режиме. Одним из примеров реализации такого подхода являются фосфоросиликатные световоды, с высоким уровнем солегиrowания фтором [9]. В этом случае нами был продемонстрирован одномодовый Er-Yb-световод с сердцевиной диаметром 20 мкм. Однако, как показали наши исследования, фторфосфоросиликатная матрица позволяет вводить относительно небольшие концентрации иттербия (менее 2 вес. %), что приводит к достаточно большой оптимальной длине такого световода (около 5 м при накачке в области

976 нм), которая является неприемлемой для усилителей с высоким порогом нелинейных эффектов.

Целью настоящей работы является исследование алюмофосфоросиликатной (APS) матрицы для задачи одновременного легирования Er_2O_3 и Yb_2O_3 . В случае эквимольного содержания P_2O_5 и Al_2O_3 в сетке APS стекла происходит полная ассоциация легирующих оксидов в AlPO_4 -тетраэдры, параметры которых практически идентичны SiO_4 -тетраэдрам. Вследствие одинакового строения APS и кварцевое стекло имеют близкое значение показателя преломления, однако наличие в сетке стекла структурных единиц AlPO_4 на 2 порядка увеличивает растворимость оксидов РЗЭ в APS-матрице по сравнению с нелегированным кварцевым стеклом. Это делает данную матрицу перспективной с точки зрения материала сердцевины для создания высококонцентрированных Er-Yb-БПМ-световодов. В частности, в настоящей работе определены составы стекла сердцевины, позволяющие обеспечить короткую длину усилителя (менее 1 м) и одновременно низкую апертуру сердцевины (на уровне 0,09).

Эксперимент

Для изготовления преформ световодов использовался метод модифицированного химического осаждения из газовой фазы (MCVD). Все компоненты стекла осаждались полностью из газовой фазы. В качестве исходных материалов и реагентов использовались высоколетучие прекурсоры, такие как SiCl_4 , POCl_3 , GeCl_4 , $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$, и малолетучие прекурсоры, такие как AlCl_3 , $\text{Er}(\text{thd})_3$ и $\text{Yb}(\text{thd})_3$ (thd = 2,2,6,6-тетраметил-3,5-гептандионат). Твердые порошки AlCl_3 , $\text{Er}(\text{thd})_3$ и $\text{Yb}(\text{thd})_3$ подогревались до температуры выше 100°C для создания достаточного давления паров. Пары малолетучих прекурсоров дозировались в зону осаждения по отдельным линиям обогрева, чтобы исключить их конденсацию и ряд реакций взаимодействия с остальными компонентами парогазовой смеси.

Стекло сердцевины изготавливалось методом отдельного осаждения, описанным в нашей более ранней работе [10]. В этой технологии изготовления на первом этапе наносился слой частично остеклованный слой APS-матрицы при температуре $1350\text{--}1550^\circ\text{C}$. На втором этапе проводилась пропитка, и в опорную трубу поступали пары $\text{Er}(\text{thd})_3$ и $\text{Yb}(\text{thd})_3$, где они смешивались с кислородом, и в зоне нагрева ($1000\text{--}1100^\circ\text{C}$) образующиеся Er_2O_3 и Yb_2O_3 осаждались на

поверхности слоя матрицы в течение нескольких проходов горелки (в зависимости от необходимой концентрации PЗЭ). На заключительном этапе $\text{Er}_2\text{O}_3/\text{Yb}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{P}_2\text{O}_5/\text{SiO}_2$ слой спекался в прозрачное стекло (при 1850–1950 °С) в атмосфере CCl_4 и кислорода для удаления водородсодержащих примесей, образующихся на стадии пропитки. Осаждение сердцевины осуществлялось путем осаждения нескольких тонких слоев матрицы, с пропиткой и сплавлением каждого из них. Количество слоев и время пропитки определялись необходимым объемом стекла сердцевины и содержанием в ней активных добавок.

При выборе состава Er–Yb световодов мы руководствовались следующими соображениями. С одной стороны, высокая концентрация Er_2O_3 приводит к увеличению передачи возбуждения от ионов Yb^{3+} к ионам Er^{3+} , которая необходима для подавления усиленной спонтанной люминесценции (УСЛ) в области 1 мкм [11]. С другой стороны, максимальная концентрация Yb_2O_3 ограничена эффектом концентрационного тушения люминесценции ионов иттербия [12]. Так, ранее нами была продемонстрирована возможность введения около 1,3 мол. % Yb_2O_3 в APS-матрицу при сохранении высокой эффективности преобразования накачки в сигнал (ЭПНС) [12]. Этот результат был достигнут путем повышения концентрации солигирующих добавок, а именно количества AlPO_4 вплоть до 18 мол. %. Дальнейшее увеличение концентрации Yb_2O_3 в таком стекле до 2,4 мол. % приводило почти к полной потере активных свойств Yb-световодом. Не менее критичным является и выбор оптимальной концентрации Er_2O_3 . Так, известно, что слишком низкая концентрация Er_2O_3 также приводит к плохой эффективности перекачки энергии от ионов Yb^{3+} к ионам Er^{3+} [9] и, как следствие, к появлению интенсивной УСЛ в области 1 мкм. Слишком высокая концентрация Er_2O_3 , в свою очередь, приводит к снижению эффективности преобразования накачки в сигнал ионами Er^{3+} из-за эффекта ап-конверсии, возникающей вследствие кластеризации [13].

Исходя из вышеизложенного, нами в качестве базовой матрицы стекла сердцевины было выбрано APS-стекло, легированное 7–8 мол. % Al_2O_3 и 10–11 мол. % P_2O_5 , что соответствует формированию в стекле ~14–16 мол. % AlPO_4 при избыточной концентрации оксида фосфора (в форме P_2O_5) около 2–3 мол.%. Для определения оптимальных концентраций Yb_2O_3 и Er_2O_3 была изготовлена серия образцов Er-Yb-световодов с различными концентрациями данных легирующих добавок. Характеристики исследованных образцов представлены в

таблице. Для того чтобы исследовать образцы в одинаковых условиях, все световоды изготавливались с одинаковой геометрией – диаметр сердцевины составлял 20 мкм, а средний диаметр первой отражающей оболочки – 125 мкм (оболочка имела квадратную фому сечения со стороной около 110 мкм). Все световоды покрывались отражающим полимерным покрытием, обеспечивающим апертуру излучения, распространяющегося в первой отражающей оболочке, более 0,41.

Характеристики исследованных образцов

Образец	dn	Yb ₂ O ₃ [*] , мол. %	Er ₂ O ₃ ^{**} , мол. %	ЭПНС ^{***} , %	УСЛ ₁₀₃₀ ^{****} , Вт
LD638(1)	0,0033	0,19	0,065	18,8	3
LD640(1)	0,004	0,52	0,077	19,9	0,2
LD640(1)N	0,0035	0,49	0,09	16,6	2
LD641(1)	0,0077	0,83	0,091	6,8	1E-3
LD642(1)	0,005	0,49	0,15	17,8	0,07
LD643(1)	0,007	0,78	0,13	13,1	0,02
LD644(1)	0,0095	1,14	0,11	5	1E-3
LD645(1)	0,011	1,27	0,11	2,7	1E-3

*средняя концентрация, определялась по величине поглощения на длине волны 0,915 мкм (1000 дБ/м соответствует 1,3 мол. % Yb₂O₃ [12]);

**средняя концентрация, определялась по величине поглощения на длине волны 1,53 мкм (78 дБ/м соответствует 0,1 мол. % Er₂O₃ [14]);

***определялась в схеме с попутной накачкой и сигналом при уровне входного сигнала около 1,5 Вт;

****интегральная мощность УСЛ в области 1–1,1 мкм, распространяющейся в обе стороны.

Для определения активных свойств изготовленных Er-Yb-световодов была собрана установка, схема которой представлена на рис. 1, а. В данной установке использовался источник сигнала (ИС) на длине волны 1,555 мкм мощностью 1,5 Вт, который сваривался с одномодовым фильтром (ОФ), разделяющим сигнал на длине волны 1555 нм и УСЛ с длиной волны вблизи 1 мкм. Сигнал на длине вводился в объединитель сигнала и многомодовой накачки (ОНС), из которого сигнал попадал в сердцевину тестируемого световода (ТС), а накачка – в первую отражающую оболочку. В настоящей работе в качестве многомодовой накачки использовалось излучение многомодового полупроводникового лазерного диода (ЛД), длина волны излучения которого была стабилизирована при помощи объемной

брэгговской решетки в диапазоне $976 \pm 0,5$ нм. Выходной конец тестируемого световода скалывался под углом для устранения обратного отражения. Затем излучение, вышедшее из ТС, коллимировалось при помощи линзы и разделялось при помощи двух дихроичных зеркал (ДЗ). На первом ДЗ (1,0/1,55) отделялся усиленный сигнал в области 1,555 мкм. На втором ДЗ (0,98/1,03) разделялась УСЛ в области 1 мкм, распространяющаяся попутно сигналу, и непоглощенное излучение накачки. Мощность УСЛ, распространяющаяся назад (навстречу сигналу), проходила через ОНС и при помощи ОФ выводилась из схемы, измерялась при помощи измерителя мощности (ИМ). При измерениях использовали ТС различной длины (рис. 1, б), и для оптимальной длины световода (обеспечивающей максимальный выходной сигнал) измерялась наклонная эффективность преобразования накачки в сигнал и суммарная мощность УСЛ в области 1 мкм. Указанные данные для всех исследованных световодов приведены в таблице.

Для анализа полученных результатов была построена зависимость ЭПНС и мощности УСЛ в области 1 мкм от концентрации Yb_2O_3 в сердцевине исследованных световодов (рис. 2). Можно видеть, что при низкой концентрации Yb_2O_3 (около 0,2 мол. %) в сердцевине наблюдается достаточно высокая эффективность преобразования накачки в сигнал на уровне 19 % (для сравнения – LMA-EYDF-25P/300-HE компании Nufern в схожих условиях демонстрировал эффективность около 26 % [9]). В то же время проблемой такого световода оказывается очень высокий уровень УСЛ в области 1 мкм – около 3 Вт. В свою очередь, световоды с высокой концентрацией Yb_2O_3 (более 0,7 мол. %) демонстрируют практически полное отсутствие УСЛ в области 1 мкм, однако одновременно эффективность преобразования накачки в сигнал в таких световодах существенно снижается. В пограничной области концентраций Yb_2O_3 (около 0,5 мол. %) свойства световода оказываются крайне чувствительными к содержанию ионов Er^{3+} и Yb^{3+} . В частности, увеличение концентрации Er_2O_3 с 0,1 до 0,17 мол. % позволяет практически полностью подавить УСЛ в области 1 мкм (ее мощность не превосходит 70 мВт), но при этом так же сохранить близкую к оптимальной эффективность преобразования накачки в сигнал. Зависимости мощности усиленного сигнала, непоглощенной накачки и УСЛ от длины в данном световоде представлены на рис. 1, б.

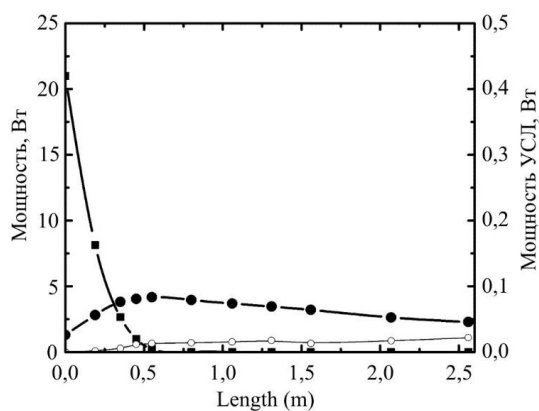
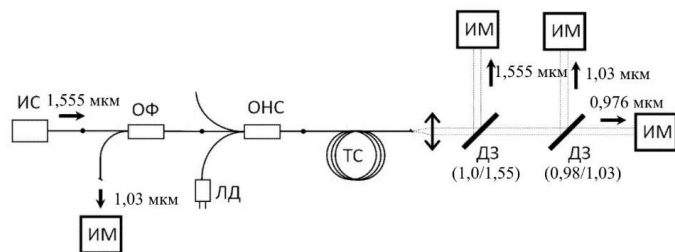


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения активных свойств тестируемых Er-Yb-световодов (а); измеренные зависимости непоглощенной накачки, усиленного сигнала и суммарной (вперед и назад) УСЛ в области 1 мкм для световода LD642(1) (б): ■ — накачка (976 нм); ● — сигнал (1555 нм); ○ — УСЛ (1–1,1 мкм)

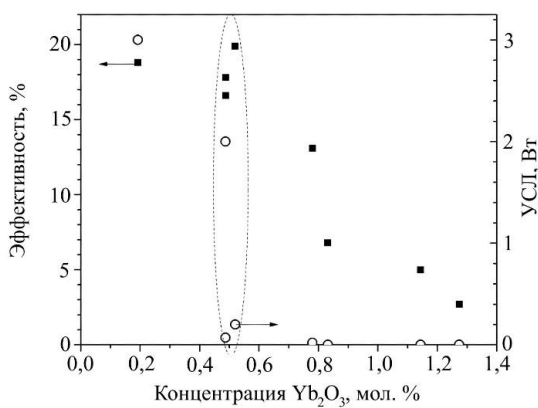


Рис. 2. Зависимость наклонной эффективности преобразования накачки в сигнал и УСЛ в области 1 мкм от концентрации Yb₂O₃ в сердцевине световода

Обсуждение результатов

В результате проведенных исследований нами были установлены наиболее перспективные составы сердцевины для создания высокоэффективных Er-Yb-световодов с БПМ. В данном случае оптимальным является использование APS-матрицы с предельно высоким содержанием AlPO_4 (около 16 мол. %) и небольшим избытком P_2O_5 . Стекло такого состава позволяет вводить достаточно высокие концентрации Yb_2O_3 (более 1 мол. %) при сохранении генерационных свойств ионов Yb^{3+} . Более того, APS-матрица практически не дает вклада в увеличение dn , что позволяет обеспечивать относительно невысокую апертуру сердцевины, ограниченную в основном собственной рефрактивностью Yb_2O_3 .

Было установлено, что в диапазоне концентраций Yb_2O_3 вплоть до 0,5 мол. %, возможно достижение высокой эффективности преобразования многомодовой накачки на длине волны 976 нм в сигнал в области 1555 нм. При этом для минимизации мощности УСЛ в области 1 мкм, наоборот, требуется увеличивать концентрацию Yb_2O_3 до 0,5 мол. % и выше. Таким образом, рабочий диапазон концентраций оказался достаточно небольшим (выделен пунктиром на рис. 2) – содержание Yb_2O_3 в сердцевине должно составлять около 0,5 мол. %. Также было показано, что увеличение концентрации Er_2O_3 до 0,17 мол. % крайне желательно для подавления УСЛ в области 1 мкм, так как позволяет снизить ее уровень до величины менее 100 мВт.

Важным итогом настоящей работы является тот факт, что благодаря использованию новой матрицы удалось существенно снизить апертуру сердцевины (по сравнению с фосфоросиликатными Er-Yb-световодами). Так, для световодов LD640(1) и LD642(1), продемонстрировавших максимальную эффективность и наименьший уровень УСЛ в области 1 мкм, dn составила всего 0,0035 и 0,005 соответственно. При этом в случае световода LD642(1) более высокая dn связана, по всей видимости, с большей избыточной концентрацией P_2O_5 и, следовательно, может быть снижена до 0,0035 путем оптимизации состава стекла (уменьшения избыточной концентрации P_2O_5) без ухудшения генерационных характеристик. Как следствие, такие световоды можно будет использовать для создания Er-Yb-световодов с увеличенным до 20 мкм диаметром сердцевины. Действительно, за счет намотки такого световода на катушку малого радиуса станет возможным эффективное подавление высших мод. Это

выгодно отличает предложенную конструкцию световода от конструкции световода с пьедесталом, получившей в последнее время широкое распространение.

Заключение

В работе показана перспективность APS-матрицы для создания Er-Yb-световодов с увеличенной площадью поля моды. Продемонстрирована высокая (до 19 %) эффективность преобразования многомодовой накачки на длине волны 976 нм в сигнал на длине волны 1555 нм. Достигнутая эффективность Er-Yb-APS-световодов сопоставима с эффективностью Er-Yb-световодов с фосфоросиликатной сердцевиной в аналогичных условиях измерений. В то же время реализованная нами конструкция световода проще и в перспективе позволит обеспечить режим работы, близкий к одномодовому.

Список литературы

1. A lidar approach to measure CO₂ concentrations from space for the ASCENDS Mission / J.B. Abshire, H. Riris, G.R. Allan, C.J. Weaver, J. Mao, X. Sun, W.E. Hasselbrack, A. Yu, A. Amediek, Y. Choi, E.V. Browell // Proc. SPIE – 2010 – 7832 (Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VI) – 78320D. – URL: <https://doi.org/10.1117/12.868567>.
2. Holmen L.G., Rustad G., Haakestad M.W. Robust eye-safe pulsed fiber laser source for 3D lidar applications // Proc. SPIE – 2017 – 10434 (Electro-Optical Remote Sensing XI) – 104340N. – URL: <https://doi.org/10.1117/12.2278397>.
3. Long range wind lidars based on novel high spectral brilliance all-fibered sources / L. Lombard, A. Dolfi-Bouteyre, C. Besson, B. Augère, P. Bourdon, A. Durécu, D. Goular, J.Le Gouët, C.Planchat, W.Renard, M. Valla, G. Canat // Proc. SPIE – 2015 – 9645 (Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XI) – 96450B. – URL: <https://doi.org/10.1117/12.2197350>.
4. Shen D.Y., Sahu J.K., Clarkson W.A. High-power widely tunable Tm: fibre lasers pumped by an Er,Yb co-doped fibre laser at 1.6µm // Opt. Express. – 2006. – Vol. 4. – P. 6084–6090.
5. Cladding-pumped continuous-wave Raman fiber laser// Conference on Lasers and Electro-Optics – 2003 – CLEO '03. – P. 2.

6. 302 W single-mode power from an Er/Yb fiber MOPA // T. Matniyaz, F. Kong, M.T. K.-Dong, Liang Dong // *Opt. Lett.* – 2020. – 45. – P. 2910–2913.

7. 75 W 40% efficiency single-mode all-fiber erbium-doped laser cladding pumped at 976 nm / L.V. Kotov, M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, O.I. Medvedkov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov, J. Lhermite, S. Février, E. Cormier // *Opt. Lett.* – 2013. – Vol. 38. – P. 2230–2232.

8. Highly efficient 3.7 kW peak-power single-frequency combined Er/Er-Yb fiber amplifier / M.M. Khudyakov, D.S. Lipatov, A.N. Gur'yanov, M.M. Bubnov, M.E. Likhachev // *Opt. Lett.* – 2020. – Vol. 45. – P. 1782–1785.

9. Single-mode large-mode-area Er-Yb fibers with core based on phosphorosilicate glass highly doped with fluorine / M.M. Khudyakov, A.S. Lobanov, D.S. Lipatov, A.N. Abramov, N.N. Vechkanov, A.N. Guryanov, M.A. Melkumov, K.K. Bobkov, S.S. Aleshkina, T.A. Kochergina, L.D. Iskhakova, F.O. Milovich, Bubnov and M.E. Likhachev // *Laser Physics Letters*. – 2019. – Vol. 16(2). – 025105. DOI: 10.1088/1612-202X/aaf7f8

10. MCVD-метод изготовления световодов $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5\text{-SiO}_2$ со строго ступенчатым профилем показателя преломления / М.В. Яшков, А.Н. Гурьянов, М.М. Бубнов, Д.С. Липатов, М.Е. Лихачев // *Неорганические материалы*. – 2018. – Vol. 54(3). – С. 291–297.

11. Effects of Yb^{3+} and Er^{3+} Concentrations and Doping Procedure on Excitation Transfer Efficiency in Er–Yb Doped Phosphosilicate Fibers / M.A. Melkumov, A.Yu. Laptev, M.V. Yashkov, N.N. Vechkanov, A.N. Guryanov, I.A. Bufetov // *Inorganic Materials*. – 2010. – Vol. 46. – С. 299–303.

12. Properties of silica based optical fibers doped with an ultra-high ytterbium concentration / K.K. Bobkov, E.K. Mikhailov, T.S. Zaushitsyna, A.A. Rybaltovsky, S.S. Aleshkina, M.A. Melkumov, M.M. Bubnov, D.S. Lipatov, M.V. Yashkov, A.N. Abramov, A.A. Umnikov, A.N. Guryanov, M.E. Likhachev // *Journal of Lightwave Technology*. – 2022. DOI: 10.1109/JLT.2022.3191862.

13. Effect of the AlPO_4 join on the pump-to-signal conversion efficiency in heavily Er-doped fibers / M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, K.V. Zotov, D.S. Lipatov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov // *Opt. Lett.* – 2009. – Vol. 34. – P. 3355–3357.

14. Фосфороалюмосиликатные световоды, легированные оксидом эрбия / М.Е.Лихачев, М.М. Бубнов, К.В. Зотов, О.И. Медведков,

Д.С. Липатов, М.В. Яшков, А.Н. Гурьянов // Квантовая электроника. – 2010. – 40(7). – С. 633–638.

References

1. Abshire J.B., Riris H., Allan G.R., Weaver C.J., Mao J., Sun X., Hasselbrack W.E., Yu A., Amediek A., Choi Y., Browell E.V. A lidar approach to measure CO₂ concentrations from space for the ASCENDS Mission. *Proc. SPIE, 2010, 7832 (Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VI) - 78320D*, available at: <https://doi.org/10.1117/12.868567>

2. Holmen L.G., Rustad G., Haakestad M.W. Robust eye-safe pulsed fiber laser source for 3D lidar applications. *Proc. SPIE, 2017, 10434 (Electro-Optical Remote Sensing XI) - 104340N*, available at: <https://doi.org/10.1117/12.2278397>

3. Lombard L., Dolfi-Bouteyre A., Besson C., Augère B., Bourdon P., Durécu A., Goular D., Gouët J.Le, Planchat C., Renard W., Valla M., Canat G. Long range wind lidars based on novel high spectral brilliance all-fibered sources. *Proc. SPIE, 2015, 9645 (Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing XI) - 96450B*, available at: <https://doi.org/10.1117/12.2197350>

4. Shen D.Y., Sahu J.K., Clarkson W.A. High-power widely tunable Tm: fibre lasers pumped by an Er,Yb co-doped fibre laser at 1.6µm. *Opt. Express, 2006, vol. 4, pp. 6084-6090.*

5. Cladding-pumped continuous-wave Raman fiber laser. *Conference on Lasers and Electro-Optics, 2003, CLEO '03, 2 p.*

6. Matniyaz T., Kong F., K.-Dong M.T., Dong Liang. 302 W single-mode power from an Er/Yb fiber MOPA. *Opt. Lett., 2020, 45, pp. 2910-2913.*

7. Kotov L.V., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Medvedkov O.I., Yashkov M.V., Guryanov A.N., Lhermite J., Février S., Cormier E. 75 W 40 % efficiency single-mode all-fiber erbium-doped laser cladding pumped at 976 nm. *Opt. Lett., 2013, vol. 38, pp. 2230-2232.*

8. Khudyakov M.M., Lipatov D.S., Gur'yanov A.N., Bubnov M.M., Likhachev M.E. Highly efficient 3.7 kW peak-power single-frequency combined Er/Er-Yb fiber amplifier. *Opt. Lett., 2020, vol. 45, pp. 1782-1785.*

9. Khudyakov M.M., Lobanov A.S., Lipatov D.S., Abramov A.N., Vechkanov N.N., Guryanov A.N., Melkumov M.A., Bobkov K.K., Aleshkina S.S., Kochergina T.A., Iskhakova L.D., Milovich F.O. Bubnov M.M., Likhachev M.E. Single-mode large-mode-area Er-Yb fibers with core based

on phosphorosilicate glass highly doped with fluorine. *Laser Physics Letters*, 2019, vol. 16(2), 025105. DOI: 10.1088/1612-202X/aaf7f8

10. Iashkov M.V., Gur'ianov A.N., Bubnov M.M., Lipatov D.S., Likhachev M.E. MCVD-metod izgotovleniia svetovodov Yb₂O₃-Al₂O₃-P₂O₅-SiO₂ so strogo stupenchatym profilem pokazatelia prelomleniia [MCVD fabrication of Yb₂O₃-Al₂O₃-P₂O₅-SiO₂ fibers with a strictly stepped refractive index profile]. *Neorganicheskie materialy*, 2018, vol. 54(3), pp. 291-297.

11. Melkumov M.A., Laptev A.Yu., Yashkov M.V., Vechkanov N.N., Guryanov A.N., Bufetov I.A. Effects of Yb³⁺ and Er³⁺ Concentrations and Doping Procedure on Excitation Transfer Efficiency in Er-Yb Doped Phosphosilicate Fibers. *Inorganic Materials*, 2010, vol. 46, pp. 299-303.

12. Bobkov K.K., Mikhailov E.K., Zaushitsyna T.S., Rybaltovskiy A.A., Aleshkina S.S., Melkumov M.A., Bubnov M.M., Lipatov D.S., Yashkov M.V., Abramov A.N., Umnikov A.A., Guryanov A.N., Likhachev M.E. Properties of silica based optical fibers doped with an ultra-high ytterbium concentration. *Journal of Lightwave Technology*, 2022. DOI: 10.1109/JLT.2022.3191862

13. Likhachev M.E., Bubnov M.M., Zotov K.V., Lipatov D.S., Yashkov M.V., Guryanov A.N. Effect of the AlPO₄ join on the pump-to-signal conversion efficiency in heavily Er-doped fibers. *Opt. Lett.*, 2009, vol. 34, pp. 3355-3357.

14. Likhachev M.E., Bubnov M.M., Zotov K.V., Medvedkov O.I., Lipatov D.S., Iashkov M.V., Gur'ianov A.N. Fosforoalumosilikatnye svetovody, legirovannye oksidom erbiia [Phosphoraluminosilicate fibers doped with erbium oxide]. *Kvantovaya elektronika*, 2010, 40(7), pp. 633-638.

Финансирование: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 20-19-00347.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Получена: 12.01.2022

Одобрена: 22.03.2022

Принята к публикации: 01.09.2022

Funding: the study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 20-19-00347.

Conflict of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors have made an equivalent contribution to the publication.

Received: 12/01/2022

Approved: 22/03/2022

Accepted for publication: 01/09/2022

Просьба ссылаться на эту статью в русскоязычных источниках следующим образом: Er-Yb-световоды на основе алюмофосфоросиликатной стеклянной матрицы / М.Е. Лихачев, М.М. Худяков, Д.С. Липатов, А.Н. Абрамов, А.Н. Гурьянов // Прикладная фотоника. – 2022. – Т. 9, № 1. – С. 73–86.

Please cite this article in English as: Likhachev M.E., Khudyakov M.M., Lipatov D.S., Abramov A.N. Guryanov Er-Yb fibers based on aluminophosphorosilicate glass // Applied photonics, 2022, no. 1, pp. 73-86.