

УДК 681.7.068

**М.М. Худяков^{1,2}, Д.С. Липатов³,
А.Н. Гурьянов³, М.М. Бубнов¹, М.Е. Лихачев¹**

¹Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, г. Москва, Россия

²Московский физико-технический институт, г. Долгопрудный, Россия

³Институт химии высокочистых веществ РАН, г. Нижний Новгород, Россия

ВЫСОКОЭФФЕКТИВНЫЙ КОМБИНИРОВАННЫЙ ER/ER-YB-УСИЛИТЕЛЬ С ВЫСОКОЙ ПИКОВОЙ МОЩНОСТЬЮ И СОХРАНЕНИЕМ ПОЛЯРИЗАЦИИ

В работе реализована ранее предложенная конструкция высокоэффективного усилителя импульсов с высокой пиковой мощностью в безопасной для глаз спектральной области около 1,55 мкм и сохранением поляризации. В усилителе одновременно используются волоконные световоды с большим полем моды, легированные только эрбием (без иттербия) и солегированные эрбием и иттербием. В реализованном усилителе продемонстрировано усиление одночастотных импульсов длительностью 380 нс на длине волны 1554 нм до пиковой мощности 660 Вт с наклонной эффективностью преобразования накачки в сигнал 32,9 %. На его основе был создан усилительный модуль с пиковой мощностью 330 Вт, имеющий хорошее качество пучка M2 1,41/1,37 и экстинкцию 18 дБ.

Ключевые слова: волоконный усилитель Er, волоконный усилитель Er-Yb, высокая пиковая мощность, высокая эффективность.

**M.M. Khudyakov^{1,2}, D.S. Lipatov³,
A.N. Guryanov³, M.M. Bubnov¹, M.E. Likhachev¹**

¹Institute of General Physics named after A.M. Prokhorov RAS,
Scientific Center for Fiber Optics named after E.M. Dianov, Moscow, Russia

²Moscow Institute of Physics and Technology, Dolgoprudny, Russia

³Institute of Chemistry of High-Purity Substances RAS,
Nizhny Novgorod, Russia

HIGHLY EFFICIENT COMBINED ER/ER-YB POLARIZATION MAINTAINING FIBER AMPLIFIER FOR HIGH PEAK POWER PULSES

In this we implement a combined amplifier design suggested earlier for polarization maintaining high peak amplifier in eye-safe spectral region near 1.55 μm . The amplifier utilizes large mode area Erbium (without Ytterbium) doped fiber and Erbium-Ytterbium codoped fiber simultaneously. Realized amplifier demonstrates amplification of 380 ns pulses at 1554 nm up to 660 W peak power with pump conversion efficiency of 32.9 %. A portable amplifier unit was built around the realized amplifier. It had peak power of 330 W with good beam quality (M2 1.41/1.37) and polarization extinction ratio of 18 dB.

Keywords: Er doped fiber amplifier, Er-Yb codoped fiber amplifier, high peak power, high efficiency.

Одночастотные лазерные источники излучения с высокой пиковой мощностью в безопасной для глаз области спектра около 1,55 мкм востребованы в ряде задач, требующих свободного распространения излучения в атмосфере, например, дистанционное измерение скорости ветра при помощи доплеровского LIDAR-a (Light Detection and Ranging «обнаружение и определение дальности с помощью света») [1], измерение концентрации CO₂ в газовом столбе [2]. В таких задачах дистанцию измерения определяют качество пучка ($M2 < 1,5$) и энергия в импульсе. В то же время для хорошего пространственного разрешения длительность одночастотного импульса должна быть достаточно маленькой (сотни наносекунд). В таких условиях нелинейный эффект, обладающий наименьшим порогом, – вынужденное рассеяние Манделъштама – Бриллюэна (ВРМБ)[3]. Волоконные лазеры позволяют получить дифракционно-ограниченное качество пучка (в случае использования одномодовых световодов) с высокой стабильностью к внешним воздействиям (в случае полностью волоконных схем). Однако большая длина взаимодействия в оптических волокнах приводит к низкому порогу ВРМБ. Увеличение поля моды позволяет повысить порог ВРМБ. Дальнейшее увеличение порога ВРМБ осуществляется путем сокращения длины активного световода с уменьшением эффективности преобразование накачки в сигнал.

Три основных типа волоконных усилителей в области спектра около 1,55 мкм – это эрбий-иттербиевые волоконные усилители с накачкой по оболочке (ЭИВУ), эрбиевые (без иттербия) усилители с накачкой по оболочке (ЭВУ) и ЭВУ с накачкой по сердцевине. Для демонстрации проблемы одновременного получения высокой эффективности и пиковой мощности на рис. 1 построена наклонная эффективность преобразования накачки в сигнал от пиковой мощности для разных типов усилителей [18]. В настоящее время самая высокая пиковая мощность для одночастотных импульсов была продемонстрирована в ЭВУ с попутной накачкой по оболочке (накачка и сигнал распространяются в одном направлении) [4]. Такая высокая пиковая мощность была получена за счет снижения эффективности с 40 % для непрерывного сигнала [5] до 5 %. Длина активного световода в [4] составляла 1 м. Увеличение длины до 3 м уменьшило пиковую мощность до 1 кВт и увеличило эффективность до 12 %. Схема со встречной накачкой позволила увеличить эффективность до 16,5 % без уменьшения порога ВРМБ [6]. Наибольшая эффективность 56 %, близкая к квантовому пределу 58,6 %

для данных длин волн, была достигнута в ЭИВУ с встречной накачкой на длине волны 915 нм и непрерывным сигналом [19]. В то же время использование ЭИВУ для усиления одночастотных импульсов привело к эффективности 16,7 % для 1 кВт [9] и 3 % для 3,5 кВт [10], что уступает эффективности ЭВУ при похожих пиковых мощностях. ЭВУ с накачкой по сердцевине на длине волны 1480 нм позволяют получить эффективность 30 % для 0,7 кВт [7] и 71 % для непрерывного излучения [8]. Однако в качестве источника накачки для этих усилителей был использован лазер на основе эффекта вынужденного комбинационного рассеяния, эффективность которого не превышает 42 % [20] по отношению к мощности излучения полупроводниковых диодов накачки. Таким образом, полная эффективность (относительно диодов накачки) ЭВУ с накачкой по сердцевине оказывается ниже, чем для ЭВУ и ЭИВУ с накачкой в оболочке.

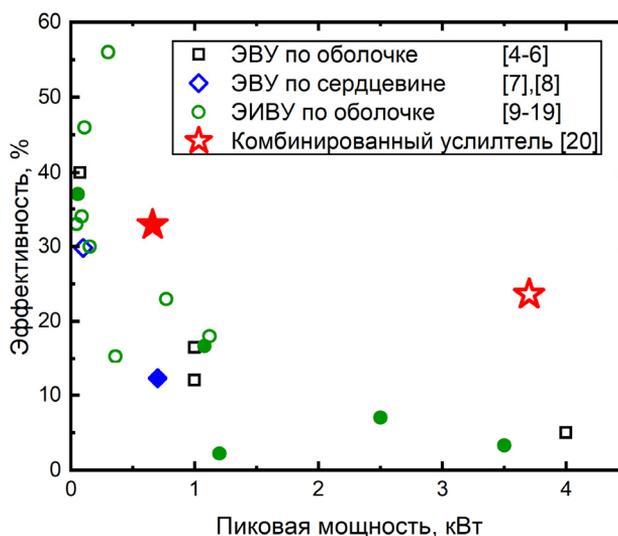


Рис. 1. Эффективность преобразования накачки в сигнал (с пересчетом на мощность диодов накачки) от максимальной пиковой мощности для разных типов усилителей; сплошные символы иллюстрируют схемы с сохранением поляризации, открытые – без нее

Основной фактор, ограничивающий эффективность ЭВУ с высокой пиковой мощностью, – слабое поглощение накачки (максимальная концентрация ионов эрбия ограничена эффектом концентрационного гашения люминесценции [21]). В [4] при пиковой мощности 4 кВт 75 % мощности накачки оказались непоглощенными. Нашей группой была проде-

монстрирована причина низкой эффективности ЭИВУ – необходимость большого входного сигнала для насыщения усилителя [22]. Входная мощность для ЭИВУ ограничена намного более низким порогом ВРМБ в предуселителе с малым полем моды. Для решения данных проблем была предложена схема комбинированного усилителя с эрбий-иттербиевым световодом, приваренным напрямую к Эрбиевому [22]. Таким образом, эрбиевый световод служит предуселителем для эрбий-иттербиевого световода, усиливая слабый (~10 мВт) входной сигнал до нескольких ватт, а большая доля непоглощенной накачки эффективно преобразуется в эрбий-иттербиевом световоде. Стоит отметить, что еще одним преимуществом данного подхода является возможность повышения порога ВРМБ при выборе световодов с разным составом стекла сердцевины (Al+P для эрбиевого световода и P для эрбий-иттербиевого). В таком случае порог ВРМБ усилителя ограничен световодом с наименьшим порогом с поправкой на распределение мощности в усилителе. В [22] была получена рекордно высокая эффективность для усилителей одночастотных импульсов в области спектра около 1,55 мкм и пиковой мощностью больше 3 кВт. Однако реализованная в работе схема не сохраняла поляризацию, что может быть критично для ряда применений. В данной работе представлен комбинированный усилитель с сохранением поляризации.

Эрбиевый световод, использованный в работе, был изготовлен нашей группой. Заготовка световода была изготовлена методом внутреннего парофазного осаждения. Сердцевина световода была легирована одновременно оксидами фосфора и алюминия. Для уменьшения чувствительности к изгибу был создан дополнительный легированный фтором слой вокруг сердцевины. В заготовку были вставлены два боросиликатных стержня для создания двулучепреломления в сердцевине. Диаметр сердцевины вытянутого световода составил 36 мкм, диаметр оболочки – 130 мкм. Световод был покрыт полимером с низким показателем преломления с числовой апертурой 0,45 для обеспечения световедущих условий для накачки, распространяющейся по оболочке. Фотография торца световода и профиль показателя преломления представлены на рис. 2. Расчетная длина волны отсечки второй моды составила 1890 нм. Расчетный диаметр поля моды составил 24,7 мкм. Экстинкция при измерении в пассивном режиме составила > 15 дБ. Пик поглощения слабого сигнала из оболочки на 976 нм составил 2,2 дБ/м.

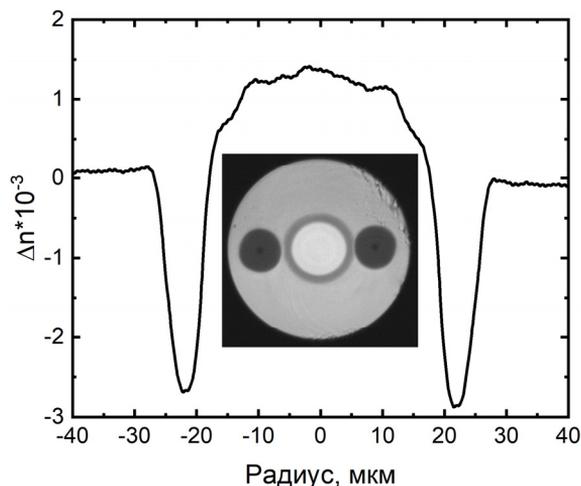


Рис. 2. Профиль показателя преломления и фотография торца эрбиевого световода

В качестве эрбий-иттербиевого световода был использован коммерчески доступный PLMA-EYDF-25P/300-HE, Nufern. Сердцевина световода была легирована 12 мол.% оксида фосфора, 7 вес.% оксида Yb и 0,45 вес.% оксида Er [22]. Сердцевина световода была окружена пьедесталом, легированным 10 мол.% оксида германия, для уменьшения числовой апертуры сердцевинки до $\sim 0,09$. Расчетный диаметр поля моды составил 18 мкм, отсечка второй моды по отношению к пьедесталу составила 3050 нм. Световод был покрыт полимером с низким показателем преломления и числовой апертурой 0,46. Подавление высших мод осуществлялось намоткой световода на алюминиевый цилиндр диаметром 8 см. Пик поглощения слабого сигнала из оболочки на 976 нм составил 14,3 дБ/м.

Схема комбинированного усилителя представлена на рис. 3. Источником импульсов служил задающий лазер, состоящий из лазерного диода с распределенной обратной связью (ЛД), излучающий 1 мВт средней мощности на длине волны 1554 нм с шириной динии 2 МГц.; полупроводникового усилителя (ПУ), который вырезал из непрерывного излучения ЛД импульсы с частотой повторения 10–100 кГц, длительностью 400 нс и пиковой мощностью 10 мВт (средняя мощность 40 мкВт); трех каскадов ЭВУ с фильтром в виде циркулятора (Ц) и волоконной брэгговской решеткой (ВБР) для очистки спектра после ЭВУ1 от усиленной спонтанной люменценции (УСЛ) из-за малой входной мощно-

сти и акустооптического модулятора (АОМ) для контроля формы импульсов с целью сохранения близкой к прямоугольной формы на выходе из комбинированного усилителя. В результате задающий лазер создавал импульсы 400 нс с частотой повторения 10 кГц, средней мощностью 10 мВт и пиковой 2,5 Вт. Эти импульсы вводились вместе с излучением от двух стабилизированных по длине волны на 976 нм многомодовых диодов накачки через объединитель сигнала и накачки 2+1 в 1 эрбиевый световод (ЭВС) длиной 2,9 м. После чего непоглощенная накачка и усиленные импульсы вводились в 0,8 м эрбий-иттербиевого световода (ЭИВС), к выходу которого был приварен маленькой длины (20 см) пассивный световод аналога Nufer PLMA-GDF-20/130 с диаметром поля моды 18 мкм и отсечкой второй моды 2,1 мкм, сколотого под углом 7° для предотвращения обратного отражения. На месте сварки ЭИВС с пассивным световодом был создан вывод накачки путем покрытия сварки на теплоотводящей пластинке полимером с высоким показателем преломления и числовой апертурой 0,24.

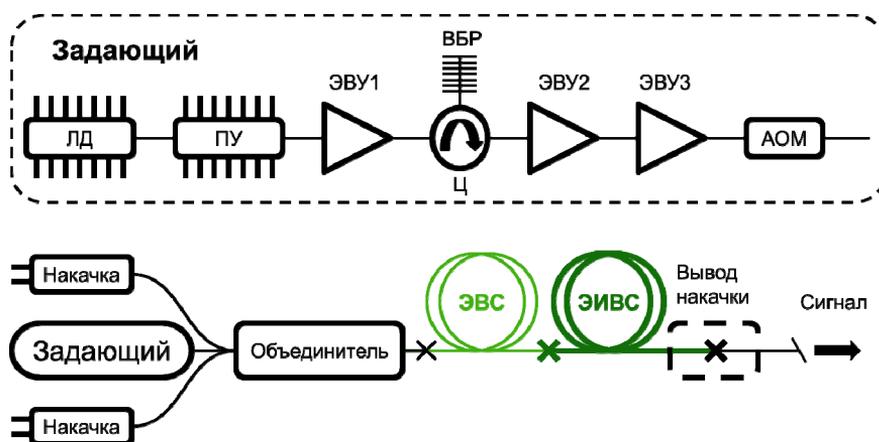


Рис. 3. Схема комбинированного усилителя

Стоит отметить, что выбранные длины световодов 2,9 и 0,8 м превышают использованные в [22] – 1,5 и 0,5 м. Одна из причин – меньшая концентрация (потери в пике поглощения) ионов эрбия в эрбиевом световоде для увеличения эффективности его работы за счет снижения уровня кластеризации и, соответственно, концентрационного тушения люминесценции. Таким образом, увеличение длины эрбиевого световода вызвано необходимостью иметь достаточное усиление

для насыщения эрбий-иттербиевого световода. Другая причина – необходимость добавления компонента на выходе усилителя для создания готового прибора на его основе, вследствие чего порог ВРМБ в приборе ограничивается длиной световодов пассивных выходных компонентов (световые имели размеры сердцевины и оболочки, равные 20 и 125 мкм). Из-за ограничений сварочного оборудования минимальная длина от сварки до компонента составляет 15 см, а минимальное расстояние между компонентами – 30 см. Это приводит к порогу ВРМБ 1,2 кВт при наличии одного выходного изолятора (длина световода после изолятора не понижает порог ВРМБ в световодах до него, так как излучение ВРМБ, распространяющееся в обратную сторону от световодов после изолятора, блокируется им). Добавление к изолятору ответвителя для контроля выходных характеристик прибора приводит к понижению порога до 600 Вт. Таким образом, длины активных световодов для усилителя были выбраны с целью получения порога ВРМБ, немного превышающего эту величину.

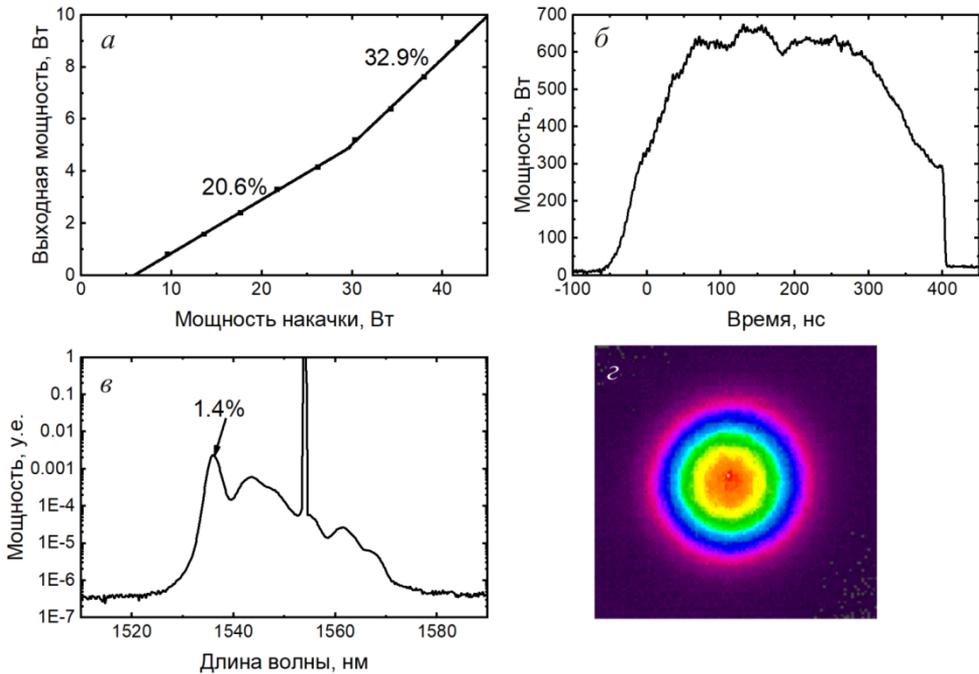


Рис. 4. Зависимость выходной мощности от введенной мощности накачки (а); форма импульса, при котором наблюдается порог ВРМБ (б); выходной спектр при пороге ВРМБ (в); выходной пучок в дальнем поле (г)

Результаты измерений выходных характеристик усилителя приведены на рис. 4. В первую очередь нами была измерена экстинкция на выходе из комбинированного усилителя путем ввода излучения суперлюминесцентного источника излучения с центром на 1550 нм и шириной спектра по полувысоте 20 нм. Экстинкция составила более 11 дБ. Порог ВРМБ измерялся вводом импульсов с частотой повторения 10 кГц, регистрировался по наблюдению импульсной нестабильности на заднем фронте импульса и составил 660 Вт (см. рис. 4, б)). Порог наблюдался при 18 Вт введенной накачки и выходной мощности 2,6 Вт. Одновременно регистрировался выходной спектр для контроля количества УСЛ. Доля УСЛ составила 1,4 % (см. рис. 4, в)). Было проведено измерение качества выходного пучка (пучок в дальнем поле представлен на рис. 4, з)) путем измерения параметра M2 на Thorlabs M2MS-BP209IR/M. M2 составил 1,43/1,31, что свидетельствует о хорошем качестве пучка. Так же была измерена эффективность усилителя при увеличении частоты повторения до 100 кГц (см. рис. 4, а)). На зависимости выходной мощности от мощности накачки наблюдается излом при мощности накачки 30 Вт. При этом наклонная эффективность вырастает с 20,6 до 32,9 %. Это происходит из-за плохой стабилизации длины волны накачек и наличия в их спектре большой доли излучения (до 60 %) с увеличивающейся от тока центральной длиной волны. При мощности накачек 41 Вт центр этого плавающего пика совпадает с пиком поглощения в эрбий-иттербиевом световоде.

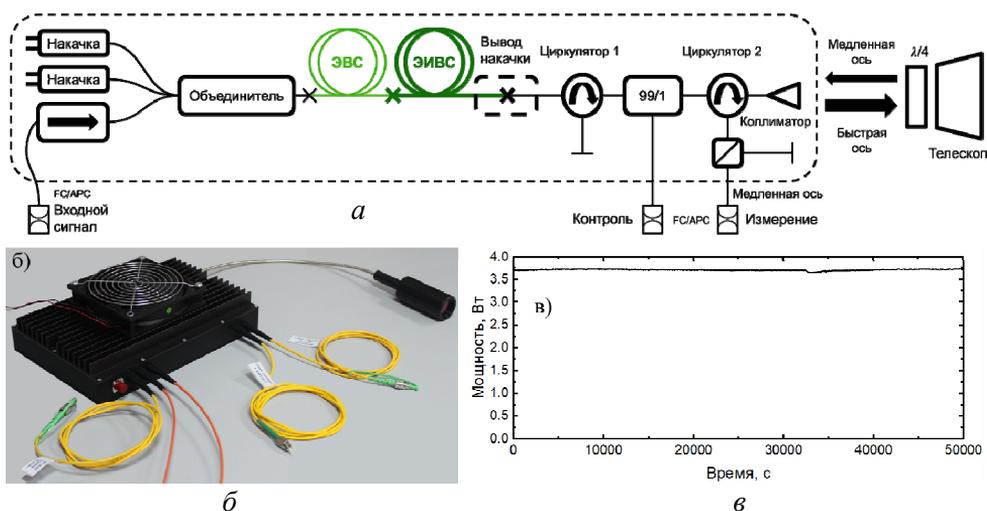


Рис. 5. Схема усилительного модуля (а); усилительный модуль, упакованный в алюминиевый корпус 25×17×4 см (б); тест долговременной стабильности усилительного модуля (в)

На основе этого усилителя был создан прибор – усилительный модуль, предназначенный для запуска усиленных входных импульсов в коллимированном пучке в атмосферу. Его схема и фото представлены на рис. 5, а, б). Входной сигнал вводился через адаптер FC/APC, после чего был использован изолятор для защиты источников входного сигнала. После усилителя были добавлены два циркулятора с ответвителем 99/1 между ними. Первый циркулятор выполнял роль поляризатора и изолятора для защиты комбинированного усилителя от ВРМБ в пассивных компонентах, 1 % хвоста ответвителя использовался для контроля мощности и формы выходного сигнала. Циркулятор 2 применялся для регистрации рассеянного излучения, запущенного через коллиматор в газ/атмосферу. Для улучшения соотношения сигнал/шум до 70 дБ перед запуском сигнала в исследуемую среду ставилась четвертьволновая пластинка, и циркулятор 2 пропускал назад обе поляризации, после чего выделялась поляризация, перпендикулярная запущенной. Стоит отметить, что компоненты, рассчитанные на большую (> 300 мВт) среднюю мощность, вносят существенные потери, которые в нашем случае составили 3 дБ. Таким образом, в собранном усилительном модуле порог ВРМБ составляет 330 Вт. При этом использование поляризующего циркулятора позволило повысить экстинкцию до 18 дБ. М2 сохранился на уровне 1,41/1,37. Был проведен тест долговременной стабильности на протяжении 14 ч (рис. 5, в)) при максимальной мощности накачки 41 Вт. Стандартное отклонение составило 0,014 Вт.

В заключение была реализована идея комбинированного усилителя для световодов, сохраняющих поляризацию. Порог ВРМБ в полученном усилителе составляет 660 Вт для 380 нс одночастотного импульса. Наклонная эффективность при частоте повторения 100 кГц составляет 32,9 %. Стоит отметить, что порог ВРМБ 660 Вт был получен для линейно поляризованного излучения и соответствует ~ 1 кВт для круговой поляризации. Таким образом, продемонстрированная эффективность примерно в 2 раза превосходит эффективность, продемонстрированную для ЭВУ с накачкой по оболочке при сравнимом пороге ВРМБ с поправкой на поляризацию [9], и в 1,8 для ЭИВУ с накачкой по оболочке [13]. На основе этого усилителя был создан компактный усилительный модуль с порогом ВРМБ 330 Вт, уменьшенном из-за потерь, вносимых выходными компонентами. М2 на выходе усилительного модуля составил 1,41/1,37, экстинкция – 18 дБ.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда (проект № 18-19-00687). Заготовка эрбиевого световода была изготовлена по программе фундаментальных научных исследований государственных академий наук на 2013–2020 гг. при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (проект № 0095-2019-0006).

Список литературы

1. Doppler Lidar-based wind-profile measurement system for offshore wind-energy and other marine boundary layer applications / Y.L. Pichugina, R.M. Banta, W.A. Brewer, S.P. Sandberg, R.M. Hardesty // J. Appl. Meteorol. Climatol. – 2012. – № 51. – P. 327–349.
2. 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 // Lidar Technol. Tech. Meas. Atmos. Remote Sens. – VI. – 2010. – № 7832. – P. 78320D.
3. Ippen E.P., Stolen R.H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers // Appl. Phys. Lett. – 1972. – № 21. – P. 539–541.
4. Record-peak-power all-fiber single-frequency 1550 nm laser / L.V. Kotov, M.E. Likhachev, M.M. Bubnov, V.M. Paramonov, M.I. Belovolov, D.S. Lipatov, A.N. Guryanov // Laser Phys. Lett. – 2014. – № 11. – P. 095102.
5. 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. – № 38. – P. 2230.
6. Record efficiency kW-level peak power single-frequency er-doped fiber amplifier / L. Kotov, M. Likhachev, M. Bubnov, D. Lipatov, A. Guryanov // Eur. Conf. Lasers Electro-Optics. – 2014. – № 095102. – P. 141700.
7. High energy, 1572.3 nm pulses for CO₂ LIDAR from a polarization-maintaining, very-large-mode-area, Er-doped fiber amplifier / J.W. Nicholson, A. DeSantolo, M.F. Yan, P. Wisk, B. Mangan, G. Puc, A.W. Yu, M.A. Stephen // Opt. Express. – 2016. – № 24. – P. 19961.
8. Continuous wave erbium-doped fiber laser with output power of >100 W at 1550 nm in-band core-pumped by a 1480nm Raman fiber laser / V.R. Supradeepa, J.W. Nicholson, K. Feder // 2012 Conf. Lasers Electro-Optics. – 2012. – № 1. – P. 1–2.

9. Single-frequency polarized eye-safe all-fiber laser with peak power over kilowatt / X. Zhang, W. Diao, Y. Liu, J. Liu, X. Hou, W. Chen // *Appl. Phys. B.* – 2014. – № 115. – P. 123–127.

10. 1.8 mJ, 3.5 kW single-frequency optical pulses at 1572 nm generated from an all-fiber MOPA system / W. Lee, J. Geng, S. Jiang, A.W. Yu // *Opt. Lett.* – 2018. – № 43. – P. 2264.

11. High-Power All-Fiber Single-Frequency Erbium–Ytterbium Co-Doped Fiber Master Oscillator Power Amplifier / Xiaolei Bai, Quan Sheng, Haiwei Zhang, Shijie Fu, Wei Shi, Jianquan Yao // *IEEE Photonics J.* – 2015. – № 7. – P. 1–6.

12. Kaczmarek P., Stachowiak D., Abramski K. 40 W All-Fiber Er/Yb MOPA System Using Self-Fabricated High-Power Passive Fiber Components // *Appl. Sci.* – 2018. – № 8. – P. 869.

13. High Peak Power Single-Frequency Efficient Erbium-Ytterbium Doped LMA Fiber / W. Renard, T. Robin, B. Cadier, J. Le Gouët, L. Lombard, A. Durecu, P. Bourdon, G. Canat // *CLEO 2015.* – 2015. – P. STh4L.6.

14. Kilowatt-level stimulated-Brillouin-scattering-threshold monolithic transform-limited 100 ns pulsed fiber laser at 1530 nm / W. Shi, E.B. Petersen, Z. Yao, D.T. Nguyen, J. Zong, M.A. Stephen, A. Chavez-Pirson, N. Peyghambarian // *Opt. Lett.* – 2010. – № 35. – P. 2418.

15. 83-W Single-Frequency Narrow-Linewidth MOPA Using Large-Core Erbium–Ytterbium Co-Doped Fiber / C. Alegria, Y. Jeong, C. Codemard, J.K. Sahu, J.A. Alvarez-Chavez, L. Fu, M. Ibsen, J. Nilsson // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 2004. – № 16. – P. 1825–1827.

16. Single-frequency fiber amplifier at 15 μm with 100 W in the linearly-polarized TEM₀₀ mode for next-generation gravitational wave detectors / O. De Varona, W. Fittkau, P. Booker, T. Theeg, M. Steinke, D. Kracht, J. Neumann, P. Wessels // *Opt. Express.* – 2017. – № 25. – P. 24880.

17. High-power tunable single-frequency single-mode erbium: ytterbium codoped large-core fiber master-oscillator power amplifier source / Y. Jeong, J.K. Sahu, D.B.S. Soh, C.A. Codemard, J. Nilsson // *Opt. Lett.* – 2005. – № 30. – P. 2997.

18. Dilley C.E., Stephen M.A., Savage-Leuchs M.P. High SBS-threshold, narrowband, erbium codoped with ytterbium fiber amplifier pulses frequency-doubled to 770 nm // *Opt. Express.* – 2007. – № 15. – P. 14389.

19. 302 W single-mode power from an Er/Yb fiber MOPA / T. Matniyaz, F. Kong, M.T. Kalichevsky-Dong, L. Dong // *Opt. Lett.* – 2020. – № 45. – P. 2910.

20. Supradeepa V.R., Nicholson J.W. Power scaling of high-efficiency 1.5 μm cascaded Raman fiber lasers // *Opt. Lett.* – 2013. – № 38. – P. 2538.

21. Effect of the AlPO₄ 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. – № 34. – P. 3355.

22. Highly efficient 37 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. – № 45. – P. 1782.

References

1. Pichugina Y.L., Banta R.M., Brewer W.A., Sandberg S.P., Hardesty R.M. Doppler Lidar-based wind-profile measurement system for offshore wind-energy and other marine boundary layer applications. *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 2012, no. 51, pp. 327-349.

2. 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. *Lidar Technol. Tech. Meas. Atmos. Remote Sens.*, VI, 2010, no. 7832, 78320D p.

3. Ippen E.P., Stolen R.H. Stimulated Brillouin scattering in optical fibers. *Appl. Phys. Lett.*, 1972, no. 21, pp. 539-541.

4. Kotov L.V., Likhachev M.E., Bubnov M.M., Paramonov V.M., Belovolov M.I., Lipatov D.S., Guryanov A.N. Record-peak-power all-fiber single-frequency 1550 nm laser. *Laser Phys. Lett.*, 2014, no. 11, 095102 p.

5. 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, no. 38, 2230 p.

6. Kotov L., Likhachev M., Bubnov M., Lipatov D., Guryanov A. Record efficiency kW-level peak power single-frequency er-doped fiber amplifier. *Eur. Conf. Lasers Electro-Optics*, 2014, no. 095102, 141700 p.

7. Nicholson J.W., DeSantolo A., Yan M.F., Wisk P., Mangan B., Puc G., Yu A.W., Stephen M.A. High energy, 1572.3 nm pulses for CO₂ LIDAR from a polarization-maintaining, very-large-mode-area, Er-doped fiber amplifier. *Opt. Express*, 2016, no. 24, 19961 p.

8. Supradeepa V.R., Nicholson J.W., Feder K. Continuous wave erbium-doped fiber laser with output power of >100 W at 1550 nm in-band core-pumped by a 1480nm Raman fiber laser. *2012 Conf. Lasers Electro-Optics*, 2012, no. 1, pp. 1-2.

9. Zhang X., Diao W., Liu Y., Liu J., Hou X., Chen W. Single-frequency polarized eye-safe all-fiber laser with peak power over kilowatt. *Appl. Phys. B*, 2014, no. 115, pp. 123-127.

10. Lee W., Geng J., Jiang S., Yu A.W. 1.8 mJ, 3.5 kW single-frequency optical pulses at 1572 nm generated from an all-fiber MOPA system. *Opt. Lett.*, 2018, no. 43, 2264 p.

11. Bai Xiaolei, Sheng Quan, Zhang Haiwei, Fu Shijie, Shi Wei, Yao Jianquan. High-Power All-Fiber Single-Frequency Erbium–Ytterbium Co-Doped Fiber Master Oscillator Power Amplifier. *IEEE Photonics J.*, 2015, no. 7, pp. 1-6.

12. Kaczmarek P., Stachowiak D., Abramski K. 40 W All-Fiber Er/Yb MOPA System Using Self-Fabricated High-Power Passive Fiber Components. *Appl. Sci.*, 2018, no. 8, 869 p.

13. Renard W., Robin T., Cadier B., Le Gouët J., Lombard L., Durecu A., Bourdon P., Canat G. High Peak Power Single-Frequency Efficient Erbium-Ytterbium Doped LMA Fiber. *CLEO 2015*, 2015, STh4L.6 p.

14. Shi W., Petersen E.B., Yao Z., Nguyen D.T., Zong J., Stephen M.A., Chavez-Pirson A., Peyghambarian N. Kilowatt-level stimulated-Brillouin-scattering-threshold monolithic transform-limited 100 ns pulsed fiber laser at 1530 nm. *Opt. Lett.*, 2010, no. 35, 2418 p.

15. Alegria C., Jeong Y., Codemard C., Sahu J.K., Alvarez-Chavez J.A., Fu L., Ibsen M., Nilsson J. 83-W Single-Frequency Narrow-Linewidth MOPA Using Large-Core Erbium–Ytterbium Co-Doped Fiber. *IEEE Photonics Technol. Lett.*, 2004, no. 16, pp. 1825-1827.

16. Varona De O., Fittkau W., Booker P., Theeg T., Steinke M., Kracht D., Neumann J., Wessels P. Single-frequency fiber amplifier at 15 μm with 100 W in the linearly-polarized TEM₀₀ mode for next-generation gravitational wave detectors. *Opt. Express*, 2017, no. 25, 24880 p.

17. Jeong Y., Sahu J.K., Soh D.B.S., Codemard C.A., Nilsson J. High-power tunable single-frequency single-mode erbium:ytterbium codoped large-core fiber master-oscillator power amplifier source. *Opt. Lett.*, 2005, no. 30, 2997 p.

18. Dilley C.E., Stephen M.A., Savage-Leuchs M.P. High SBS-threshold, narrowband, erbium codoped with ytterbium fiber amplifier pulses frequency-doubled to 770 nm. *Opt. Express*, 2007, no. 15, 14389 p.

19. Matniyaz T., Kong F., Kalichevsky-Dong M.T., Dong L. 302 W single-mode power from an Er/Yb fiber MOPA. *Opt. Lett.*, 2020, no. 45, 2910 p.

20. Supradeepa V.R., Nicholson J.W. Power scaling of high-efficiency 1.5 μm cascaded Raman fiber lasers. *Opt. Lett.*, 2013, no. 38, 2538 p.

21. 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, no. 34, 3355 p.

22. Khudyakov M.M., Lipatov D.S., Gur'yanov A.N., Bubnov M.M., Likhachev M.E. Highly efficient 37 kW peak-power single-frequency combined Er/Er-Yb fiber amplifier. *Opt. Lett.*, 2020, no. 45, 1782 p.

Получено 01.10.2020