

УДК 681.7.068

**М.М. Худяков<sup>1</sup>, М.Е. Лихачёв<sup>1</sup>**Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН,  
Научный центр волоконной оптики им. Е.М. Дианова, Москва, Россия**ОДНОЧАСТОТНЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ВОЛОКОННЫЕ  
УСИЛИТЕЛИ С ВЫСОКОЙ ПИКОВОЙ МОЩНОСТЬЮ  
НА ДЛИНЕ ВОЛНЫ 1,55 МКМ**

Приводится обзор современных волоконных лазерных усилителей импульсного одно-частотного излучения в спектральной области вблизи 1,55 мкм, основным применением которых является атмосферное зондирование.

**Ключевые слова:** эрбиевый волоконный усилитель, эрбий-иттербиевый волоконный усилитель, высокая пиковая мощность, вынужденное рассеяние Мандельштама – Бриллюэна.

**Khudyakov M.M.<sup>1</sup>, Likhachev M.E.<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy  
of Sciences, Dianov Fiber Optics Research Center, Moscow**SINGLE-FREQUENCY HIGH-PEAK-POWER  
PULSED FIBER AMPLIFIERS AT 1.55 μM**

This work provides a review of state-of-the-art single-frequency high-peak-power pulsed fiber lasers and amplifiers at 1.55 μm, the main application of which is remote atmospheric sensing.

**Keywords:** erbium doped fiber amplifier, erbium-ytterbium doped fiber amplifier, high peak power, stimulated Brillouin scattering.

**Введение**

Эрбиевые волоконные усилители (ЭВУ) обладают достаточно широким диапазоном усиления (1530–1600 нм), попадающим в область минимума оптических потерь телекоммуникационных волоконных световодов (1550 нм), что обеспечило их широчайшее распространение в волоконно-оптических линиях связи. Именно использование ЭВУ позволило передачу оптического сигнала на дальние дистанции (тысяча километров и более) без применения регенераторов (устройств, где оптический сигнал преобразуется в электрический, распознается и снова преобразуется в оптический сигнал для дальнейшей передачи по оптическому волокну), тем самым кардинально снизив

издержки на прокладку волоконно-оптических линий связи. Как следствие, за прошедшие более чем 30 лет с момента открытия ЭВУ была развита надежная и дешевая компонентная база для таких устройств. В ЭВУ была достигнута высокая эффективность, близкая к квантовому пределу, а также продемонстрирована высокая выходная мощность, гарантированно перекрывающая потребности оптических линий связи. Данные факторы привели к активному развитию альтернативных видов применения ЭВУ.

Одной из особенностей излучения с длиной волны больше 1,4 мкм является то, что оно безопасно для глаз (излучение поглощается роговицей глаза и не достигает чувствительной сетчатки [1]), и поэтому оно подходит для атмосферных применений. К таким задачам относятся, например, дистанционное измерение скорости ветра при помощи доплеровского лидара (LIDAR – LIght Detection And Ranging) [2–3] и измерение концентрации CO<sub>2</sub> в газовом столбе [4–5]. Кроме высокого качества пучка и безопасности для глаз здесь требуются малая спектральная ширина линии излучения (<10 МГц) и большая энергия импульса (>100 мкДж). В то же время увеличение пространственного разрешения в системах для решения таких задач достигается уменьшением длительности импульса до сотен наносекунд, что приводит к росту пиковой мощности и возникновению нелинейных эффектов в волоконных лазерах. Нелинейным эффектом с наименьшим порогом в таких условиях является вынужденное рассеяние Мандельштама–Бриллюэна (ВРМБ).

### **Способы повышения порога ВРМБ в волоконных усилителях**

Два основных способа увеличения порога ВРМБ и, как следствие, пиковой мощности усилителя – это увеличение диаметра сердцевины (уменьшение интенсивности) и уменьшение длины (уменьшение длины взаимодействия) активного световода в волоконном усилителе. Для атмосферных применений необходима низкая расходимость пучка выходного излучения. По этой причине рост диаметра сердцевины целесообразен только при условии сохранения одномодового режима распространения излучения в световоде. В рамках этого ограничения рост диаметра сердцевины световода сопровождается уменьшением разницы показателей преломления сердцевины и оболочки, что приводит к росту изгибных потерь в световоде. На сегодняшний день в

стандартных пассивных одномодовых световодах с большим полем моды для излучения с длиной волны 1,55 мкм диаметр сердцевины составляет 20 мкм (диаметр поля моды – 18 мкм).

В активных световодах возможно дальнейшее увеличение диаметра сердцевины без уменьшения показателя преломления. В этом случае одномодовость достигается за счет создания потерь для высших мод путём изгиба световода [6]. Это приводит к тому, что высшие моды имеют большие потери и меньшее усиление. Важно отметить, что увеличение сердцевины световода приводит к росту нормированной частоты и уменьшению необходимого диаметра изгиба для сохранения одномодовости. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению поля моды световода. Таким образом, применимость такого подхода ограничена [7].

Уменьшение длины световода приводит к уменьшению поглощения накачки и, соответственно, уменьшению эффективности преобразования излучения накачки в сигнальное излучение (далее эффективности) усилителя и выходной мощности. Компенсация меньшей длины световода возможна за счёт увеличения концентрации ионов эрбия. Однако ионы редкоземельных элементов (РЗЭ) при введении в сетку кварцевого стекла склонны к кластеризации [8–9]. В силу равенства разницы энергий между уровнями  ${}^4I_{9/2} - {}^4I_{13/2}$  и  ${}^4I_{13/2} - {}^4I_{15/2}$  в близлежащих ионах эрбия при накачке на  $\sim 980$  нм ( ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ) преобладающим процессом становится апконверсия (рис. 1). Этот процесс приводит к потере фотона накачки и уменьшению эффективности усилителя.

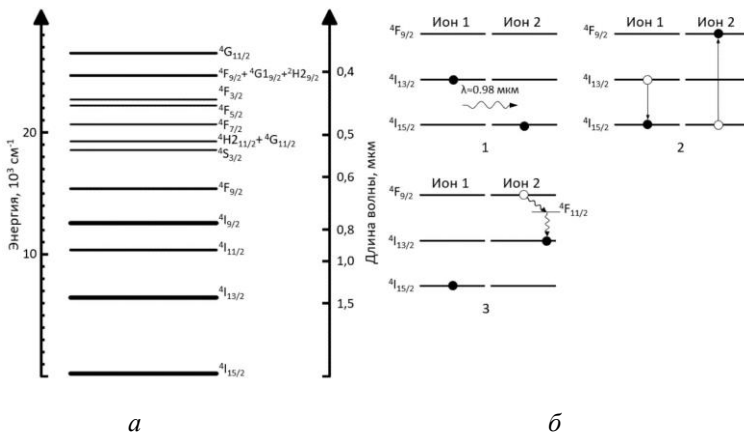


Рис. 1. Уровни энергии  $Er^{3+}$  (а); схема процесса апконверсии (б)

Легирование стекла оксидами алюминия и/или фосфора позволяет понизить долю кластеризации при фиксированной концентрации ионов РЗЭ [10]. Однако это не позволяет решить проблему кластеризации, а только может замедлить рост доли кластеризованных ионов с ростом их концентрации. Таким образом, сокращение длины эрбиевого световода невозможно компенсировать увеличением концентрации ионов эрбия без потери эффективности.

### **Схемы усилителей одночастотного излучения в спектральной области вблизи 1,55 мкм**

Существуют два основных способа накачки активных световодов: по сердцевине и по оболочке. В первом случае излучение накачки вместе с излучением сигнала распространяется по сердцевине световода. Во втором – излучение накачки распространяется по кварцевой оболочке и поглощается сердцевиной активного световода. При этом для создания волноводных условий для излучения накачки такие световоды покрываются отражающим полимером или имеют вторую стеклянную оболочку с пониженным показателем преломления. Преимуществом первого способа является существенно большее (примерно в  $A_{об}/A_c$  раз, где  $A_{об}$  – площадь оболочки,  $A_c$  площадь – сердцевины) поглощение накачки, что приводит к меньшей длине активного световода. Ещё одним преимуществом такой накачки является то, что накачка распространяется в фундаментальной моде и имеет максимальный интеграл перекрытия с фундаментальной модой сигнала. Это позволяет получать одномодовое излучение на выходе из маломодовых волоконных усилителей [11]. Преимуществом второго способа накачки является возможность использования источников накачки с существенно меньшей яркостью, но на порядок большей мощностью. Таким образом, в подавляющем большинстве современных волоконных лазеров с высокой средней мощностью ( $> 1$  Вт) применяется накачка по оболочке.

Далее будут приведены различные схемы усилителей одночастотного (как импульсного, так и непрерывного) излучения. Сводные результаты отображены на рис. 2. Некоторые схемы используют в качестве источника накачки волоконные лазеры вместо полупроводниковых лазерных диодов напрямую. Для корректности сравнения со схемами усилителей с накачкой напрямую от лазерных диодов в

тексте, в случае использования волоконных лазеров в качестве источника накачки, помимо эффективности преобразования излучения таких лазеров в сигнальное излучение будет приводиться полная эффективность преобразования излучения лазерных диодов в конечное сигнальное излучение (далее – эффективность от диодов), а на рис. 2 показана только эффективность от диодов накачки.

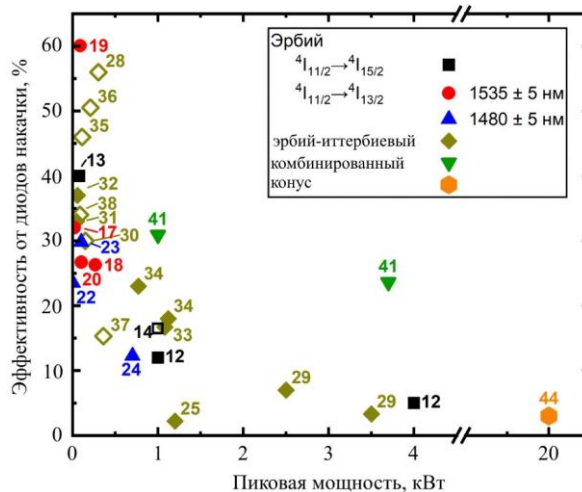


Рис. 2. Дифференциальная эффективность преобразования излучения диодов накачки в сигнальное излучение от максимальной пиковой мощности для импульсных источников или максимальной продемонстрированной средней мощности для источников непрерывного излучения для разных схем усилителей; сплошные символы соответствуют схемам с попутной накачкой, открытые – со встречной

### Эрбиевые световоды с накачкой в полосу поглощения, соответствующую переходу ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$

Из всех полос поглощения ионов эрбия в кварцевом стекле для накачки лазеров в большинстве случаев используется полоса поглощения на 980 нм. Данный факт прежде всего связан с наличием эффективных источников накачки на данных длинах волн. Также дальнейшее уменьшение длины волны накачки, например, при использовании лазерных диодов в области 800 нм, приводит к снижению эффективности эрбиевого световода и увеличению его нагрева в силу увеличивающегося квантового дефекта.

В настоящее время самая высокая пиковая мощность одночастотных импульсов в спектральной области вблизи 1,55 мкм в

однородном по длине световоде составляет 4 кВт при длительности 63 нс [12] при накачке по оболочке на длине волны 976 нм. Такая высокая пиковая мощность была получена за счёт снижения эффективности с 40 % для непрерывного сигнала [13] до 5 %. Причинами такой низкой эффективности являются большая концентрация эрбия и малое поглощение накачки при короткой длине световода. Так, в конфигурации усилителя, при которой была получена пиковая мощность 4 кВт, 1 м эрбиевого световода поглотил только 25 % введённой мощности накачки. При длине световода 3 м было поглощено 70 % мощности накачки, что привело к увеличению эффективности до 12 %, однако пиковая мощность уменьшилась до 1 кВт.

Порог ВРМБ зависит от эффективной длины взаимодействия, которая определяется распределением мощности сигнала по длине световода. Таким образом, схемы накачки с разным распределением сигнала по длине активного световода приводят к разному порогу ВРМБ для одной и той же длины световода. Альтернативой попутной накачке, использовавшейся в [12], является накачка навстречу, где излучения сигнала и накачки распространяются в противоположенных направлениях. Использование такой схемы накачки позволило увеличить длину эрбиевого световода до 6 м и повысить эффективность до 16,5 % без уменьшения порога ВРМБ [14].

### **Эрбиевые световоды с накачкой в полосу поглощения, соответствующую переходу ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$**

В отличие от перехода  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$  коммерчески доступные лазерные диоды, попадающие в полосу поглощения перехода  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ , имеют на порядок меньшую мощность. Так же они имеют в 2–2,5 раза меньшее КПД (коэффициент преобразования электрической мощности в оптическую). В связи с этим распространённый метод создания источников накачки в данном диапазоне – использование других волоконных лазеров. Накачка в пик полосы поглощения  ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  на длине волны  $1535 \pm 5$  нм (в зависимости от матрицы стекла сердцевины) может осуществляться при помощи эрбиевых и эрбий-иттербиевых лазеров. Эффективность таких многомодовых источников накачки может достигать 41,5 % [15]. Кроме накачки в пик полосы поглощения возможна накачка в её коротковолновый край на длине волны  $1480 \pm 5$  нм. Осуществляется она с помощью волоконных лазеров, основанных на многокаскадном вынужденном комбинацион-

ном рассеянии, а в качестве источника начального излучения используется иттербиевый волоконный лазер. Эффективность таких источников накачки практически совпадает с эффективностью источников накачки на длине волны  $1535\pm 5$  нм – 42 % [16]. Однако их несомненным преимуществом является их одномодовость, что позволяет их использование в схемах с накачкой по сердцевине.

### **Накачка в пик полосы поглощения на длине волны $1535\pm 5$ нм**

Накачка на длине волны  $1535\pm 5$  нм использовалась в ряде работ [17–20]. Она обеспечивает минимальный квантовый дефект, что позволяет в теории получить эффективность  $\sim 95$  %. На практике эффективность ограничивается кластеризацией эрбия, так как при накачке в пик поглощения перехода  ${}^4I_{15/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$  вероятность апконверсии значительно выше из-за отсутствия буферного уровня. Это видно на примере расчёта в статье [17], где показано, что увеличение доли кластеризованных ионов с 0,2 до 4,1 % приводит к уменьшению эффективности в два раза. С другой стороны, расчёты из [21] показывают, что для падения эффективности в два раза при накачке на 976 нм необходимо увеличить долю кластеризованных ионов с 5 до 25 % в световоде, легированном алюминием. Таким образом, схемы с накачкой на длине волны  $1535\pm 5$  нм оказываются существенно более чувствительными к кластеризации ионов эрбия.

Максимальная продемонстрированная эффективность составляет 80 % (32 % от диодов) при средней мощности 18 Вт и накачке по сердцевине [17]. Этот результат получен в эрбий-иттербиевым световоде, где иттербий использован только для уменьшения кластеризации, так как передача энергии от эрбия к иттербию при такой накачке возможна только в результате апконверсии (рис. 3, а). Максимальная мощность в схеме с накачкой на длине волны  $1535\pm 5$  нм составляет 264 Вт [18]. Она получена с использованием 36 эрбий-иттербиевых лазеров для накачки эрбий-иттербиевого световода. Эффективность составила 74 % (26,3% от диодов). При накачке напрямую многомодовыми диодами с длиной волны  $1535\pm 5$  нм было получено 88 Вт с эффективностью 60 % в эрбиевом волоконном световоде [19].

Все вышеперечисленные результаты с накачкой по оболочке были получены при длине световода более 10 м: 18 м в [18] и 15 м в [19]. Учитывая повышенную чувствительность к кластеризации,

можно сделать вывод, что накачка по оболочке на длине волны 1535 нм не подходит для создания усилителей с большой пиковой мощностью. В [17] требуется большая входная мощность для получения высокой эффективности, что так же делает такую схему непригодной для создания усилителей с большой пиковой мощностью.

### **Накачка в коротковолновый край полосы поглощения на длине волны $1480\pm 5$ нм**

Как уже упоминалось выше, относительная простота получения большой мощности накачки на длине волны  $1480\pm 5$  нм делает такую накачку привлекательной для использования в схемах с накачкой по сердцевине. Помимо низкого квантового дефекта при такой накачке возможно использование значительно неодномодовых световодов с большим полем моды, имея при этом преимущественное усиление излучения только фундаментальной моды за счёт её большего интеграла перекрытия с модой накачки [11]. Так в эрбиевом световоде с диаметром сердцевины 70 мкм (диаметр поля моды 47,4 мкм) было получено усиленное излучение с параметром качества пучка  $M^2$  равным 1,04/1,06 [22].

Максимальная продемонстрированная эффективность при таком способе накачки составила 71 % (30 % от диодов) при средней мощности 101 Вт [23]. Максимальная пиковая мощность для спектрально ограниченных наносекундных импульсов продемонстрированная с использованием такой схемы накачки составила 700 Вт с эффективностью 29,3 % (12,3 % от накачек) [24].

### **Эрбий-иттербиевые волоконные световоды**

Решить проблему малого поглощения накачки без увеличения концентрации ионов эрбия возможно путём солегирования сердцевины световода ионами иттербия. В таких эрбий-иттербиевых световодах ионы иттербия выступают в роли сенсбилизатора, который поглощает излучение накачки и передаёт возбуждение ионам эрбия. Этот процесс возможен из-за равенства энергий уровней  $^2F_{5/2}$  иттербия и  $^4I^{11/2}$  эрбия (рис. 3, а). На порядок большее сечение поглощения в ионах иттербия (см. рис. 3, б) и невозможность процесса апконверсии из-за отсутствия уровней выше  $^2F_{5/2}$  позволяют сокращать оптимальную длину эрбий-



иттербиевых световодов вплоть до нескольких сантиметров [25–26]. Кроме того, ширина полосы поглощения иттербия в области 0,9–1 мкм в несколько раз превышает ширину полосы поглощения эрбия, что позволяет использовать дешёвые нестабилизированные по длине волны диоды накачки в спектральной области 910–950 нм без потери эффективности.

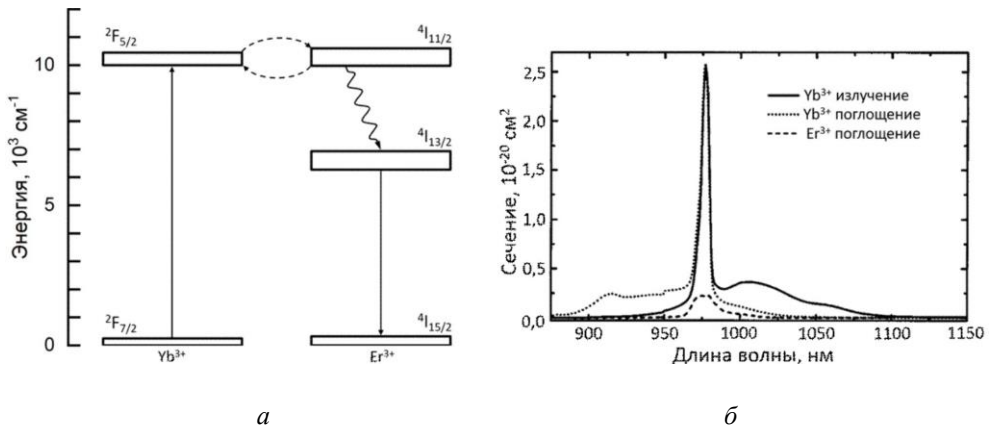


Рис. 3. Схема уровней эрбий-иттербиевого световода (а); сечения поглощения и излучения ионов эрбия и иттербия в спектральной области 850–1150 нм (б) [27]

По этим причинам в настоящий момент эрбий-иттербиевые световоды с накачкой по оболочке – основной способ повышения средней выходной мощности волоконных лазеров и усилителей в спектральной области вблизи 1,55 мкм [25, 28–38]. Использование эрбий-иттербиевого световода с накачкой по оболочке позволило получить наибольшую мощность и эффективность в непрерывном режиме в спектральной области 1,5–1,6 мкм для одномодового излучения – 302 Вт и 56 % [28]. В то же время максимальная пиковая мощность для одночастотных наносекундных импульсов в эрбий-иттербиевых световодах составляет 3,5 кВт при эффективности всего 3,3 % [31].

Эрбий-иттербиевые световоды имеют ряд недостатков. Самый большой из них – паразитная генерация ионов иттербия в спектральной области 1–1,1 мкм. Она вызвана насыщением процесса передачи энергии от ионов иттербия к ионам эрбия, что приводит к росту инверсии ионов иттербия и быстрому росту усиленной спонтанной люминесценции иттербия [39–40]. Это пороговый эффект, зависящий от параметров эрбий-иттербиевого световода и длины волны накачки.

Преодоление данного порога приводит к уменьшению эффективности и делает такие лазеры и усилители опасными для глаз [32]. Кроме того, при наличии достаточного усиления для люминесценции ионов иттербия возможно развитие лазерной генерации, что может повредить компоненты усилителя и вывести его из строя.

К не менее значимому недостатку можно отнести зависимость эффективности эрбий-иттербиевых световодов при попутной накачке от входного сигнала. Так, в [41] показано, что эффективность эрбий-иттербиевого усилителя вырастает от 16 до 31 % при увеличении входной мощности от 0,3 до 3 Вт. Это означает, что при попутной накачке эрбий-иттербиевые усилители имеют высокую эффективность при малом коэффициенте усиления. Это накладывает высокие требования на порог ВРМБ в задающем источнике и делает достижение высокой эффективности при высокой пиковой мощности трудной технологической задачей. По этой причине эрбий-иттербиевые усилители для одночастотных импульсов с высокой пиковой мощностью либо имеют низкую эффективность при попутной накачке [42], либо при встречной накачке и полностью волоконном исполнении их пиковая мощность ограничивается волоконными компонентами на выходе активного световода (в том числе световода в объединителе накачки и сигнала).

### **Комбинированный эрбий/эрбий-иттербиевый усилитель**

Ни одна из вышеописанных схем усилителей для одночастотного излучения спектрального диапазона вблизи 1,55 мкм не позволяет получить высокой эффективности при высокой пиковой мощности (см. рис. 2). В работе [41] использован комбинированный эрбий/эрбий-иттербиевый усилитель. Эрбиевый световод в такой конструкции служит для усиления слабого входного сигнала до средней мощности, достаточной для того, чтобы эрбий-иттербиевый световод имел высокую эффективность. Два световода соединены напрямую посредством сварки, что позволяет ввести всю непоглощённую в эрбиевом световоде накачку в эрбий-иттербиевый световод. Такой усилитель позволил получить пиковую мощность 3,7 кВт в 157 нс одночастотных импульсах с эффективностью 23,6 %. Это рекордная эффективность для усилителей одночастотных импульсов с пиковой мощностью более 1 кВт. При уменьшении пиковой мощности до 1 кВт из-за увеличения длин активных световодов эффективность выросла до 30,9 %.

### Эрбиевый световод-конус

Как упоминалось выше, один из способов повышения пиковой мощности волоконного усилителя – уменьшение интенсивности путём увеличения площади поля моды. В цилиндрических световодах такое увеличение ограничено при условии соблюдения одномодовости выходного излучения. Самый большой диаметр поля моды в усилителе одночастотных импульсов в спектральном диапазоне вблизи 1,55–37,4 мкм в работе [24]. Использование конической геометрии световода позволяет обойти это ограничение.

В световоде-конусе диаметр сердцевины монотонно увеличивается в несколько раз по его длине. Фундаментальная мода, возбуждённая в тонком конце такого световода-конуса, где малый размер сердцевины обеспечивает её одномодовость, распространяется к толстому одномодовому концу без перекачки энергии в моды высшего порядка. Такой процесс возможен только при адиабатическом изменении диаметра световода [43]. Кроме адиабатичности изменения диаметра необходимо, чтобы световод имел гладкий профиль показателя преломления, так как все неоднородности показателя преломления пропорциональны размерам сердцевины и, при их достаточном размере могут поспособствовать перекачке энергии в высшие моды.

Эрбиевый световод-конус позволил получить излучение с диаметром поля моды 53,4 мкм, с качеством пучка, близким к дифракционно ограниченному (параметр  $M^2 = 1,26$ ). Была продемонстрирована рекордная пиковая мощность для одночастотных импульсов в спектральной области около 1,55 мкм 20 кВт [44]. При этом эффективность составила всего 3 %. В работе [45] продемонстрирован эрбиевый световод-конус с эффективностью 18 % для непрерывного излучения. Таким образом, использование конической геометрии световода может также позволить получить высокую эффективность при ещё более высокой (по сравнению с [41]) пиковой мощности.

### Заключение

Настоящий обзор демонстрирует большое многообразие используемых схем волоконных усилителей одночастотного излучения, работающих в спектральном диапазоне 1,55 мкм. В то же время

проведенный анализ характеристик рассмотренных схем усилителей (в первую очередь с максимально достижимой пиковой мощностью выходного излучения и эффективностью преобразования накачки в сигнал) позволяет выделить две наиболее перспективные: комбинированный эрбий/эрбий-иттербиевый усилитель, позволявший получить максимальную на сегодняшний день эффективность преобразования накачки в сигнал при предельно высокой пиковой мощности (1–4 кВт для одночастотных импульсов длительностью от 100 и более нс); эрбиевый световод-конус, при помощи которого продемонстрирована пиковая мощность, более чем в пять раз превышающая рекордные значения, полученные с использованием иных схем усилителей. Более того, последние исследования демонстрируют возможность увеличения эффективности преобразования накачки в сигнал в конусных световодах до величин, сопоставимых с достигнутыми в комбинированном эрбий/иттербиевом усилителе.

### **Список литературы**

1. Anterior eye tissue transmission for the radiation with the wavelength from eye safe region / H. Jelínková, J. Pašta, J. Šulc, M. Němec, P. Koranda // *Laser Phys. Lett.* – 2005. – №2. – P. 603–607.
2. 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.
3. Monolithic high peak-power coherent Doppler lidar system / L.V. Kotov, A. Töws, A. Kurtz, K.K. Bobkov, S.S. Aleshkina, M.M. Bubnov, D. S. Lipatov, A. N. Guryanov, M. Likhachev // *Proc. SPIE.* – 2016. – №9728. – P. 97282U.
4. Applications of fiber lasers for remote sensing of atmospheric greenhouse gases / J.T. Dobler, M. Braun, J. Nagel, V.L. Temyanko, T.S. Zacheo, F.W. Harrison, E.V. Browell, S.A. Kooi // *Fiber Lasers X Technol. Syst. Appl.* – 2013. – №8601. – P. 86011Q.
5. Laser amplifier development for the remote sensing of CO<sub>2</sub> from space / A.W. Yu, J.B. Abshire, M. Storm, A. Betin // *Proc. SPIE.* – 2015. – №9342. – P. 93420M.
6. Koplw J.P., Kliner D.A.V., Goldberg L. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier // *Opt. Lett.* – 2000. – №25. – P. 442.

7. Fini J.M. Bend-resistant design of conventional and microstructure fibers with very large mode area // *Opt. Express.* – 2006. – №14. – P. 69.

8. Evidence and modeling of paired ions and other loss mechanisms in erbium-doped silica fibers / P.F. Wysocki, J.L. Wagener, M.J.F. Digonnet, H.J. Shaw // *Proc. SPIE.* – 1993. – №1789. – P.66.

9. Effects of concentration on the performance of erbium-doped fiber amplifiers / P. Myslinski, D. Nguyen, J. Chrostowski, S. Member // *J. Light. Technol.* – 1997. – №15. – P. 112–120.

10. Effect of the AlPO<sub>4</sub> 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.

11. Várallyay Z., Jasapara J.C. Comparison of amplification in large area fibers using cladding-pump and fundamental-mode core-pump schemes // *Opt. Express.* – 2009. – №17. – P. 17242.

12. 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.

13. 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.

14. Record efficiency kW-level peak power single-frequency er-doped fiber amplifier / L. Kotov, M. Likhachev, M. Bubnov, D. Lipatov, A. Guryanov // *CLEO Eur.* – 2015. – P.CJ\_P\_48.

15. High-Brightness Multimode Fiber Lasers for Resonant Pumping / L.V. Kotov, S.S. Aleshkina, M.M. Khudyakov, M.M. Bubnov, O.I. Medvedkov, D.S. Lipatov, A.N. Guryanov, M.M. Likhachev, A.N. Gur'yanov, M.M. Likhachev, A.N. Guryanov, M.M. Likhachev // *J. Light. Technol.* – 2017. – №35. – P. 4540–4546.

16. Supradeepa V.R., Nicholson J.W. Power scaling of high-efficiency 1.5  $\mu\text{m}$  cascaded Raman fiber lasers // *Opt. Lett.* – 2013. – №38. – P. 2538.

17. Lim E.-L., Alam S., Richardson D.J. Optimizing the pumping configuration for the power scaling of in-band pumped erbium doped fiber amplifiers // *Opt. Express.* – 2012. – №20. – P. 13886.

18. Jebali M.A., Maran J.-N., LaRochelle S. 264 W output power at 1585 nm in Er–Yb codoped fiber laser using in-band pumping // *Opt. Lett.* – 2014. – №39. – P. 3974.

19. Zhang J., Fromzel V., Dubinskii M. Resonantly cladding-pumped Yb-free Er-doped LMA fiber laser with record high power and efficiency // *Opt. Express.* – 2011. – №19. – P. 5574.

20. A 103W high efficiency in-band cladding-pumped 1593 nm all-fiber erbium-doped fiber laser / M.A. Jebali, J.-N.N. Maran, S. LaRochelle, S. Chatigny, M.A. Lapointe, E. Gagnon // *CLEO.* – 2012. – P. JTh11.3.

21. Millijoule pulse energy 100-nanosecond Er-doped fiber laser / L. Kotov, M. Likhachev, M. Bubnov, O. Medvedkov, D. Lipatov, A. Guryanov, K. Zaytsev, M. Jossent, S. Février // *Opt. Lett.* – 2015. – №40. – P. 1189.

22. Diffraction-limited fundamental mode operation of core-pumped very-large-mode-area Er fiber amplifiers / J.C. Jasapara, M.J. Andrejco, A. Desantolo, A.D. Yablon, Z. Várallyay, J.W. Nicholson, J.M. Fini, D.J. Digiovanni, C. Headley, E. Monberg, F.V. Dimarcello // *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* – 2009. – №15. – P. 3–11.

23. 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 // *CLEO* – 2012. – №1. – P. 1–2.

24. High energy, 1572.3 nm pulses for CO<sub>2</sub> 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.

25. 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.

26. High peak-power single-frequency pulses using multiple stage, large core phosphate fibers and preshaped pulses / E. Petersen, W. Shi, A. Chavez-Pirson, N. Peyghambarian // *Appl. Opt.* – 2012. – №51. – P. 531.

27. Accurate efficiency evaluation of energy-transfer processes in phosphosilicate Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup>-codoped fibers / M. Laroche, S. Girard,

J.K. Sahu, W.A. Clarkson, J. Nilsson // *J. Opt. Soc. Am. B.* – 2006. – №23. – P. 195.

28. 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.

29. 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.

30. 83-W Single-Frequency Narrow-Linewidth MOPA Using Large-Core Erbium–Ytterbium Co-Doped Fiber / C. Alegria, Y. Jeong, C. Codemard, J.K.K. Sahu, J.A.A. Alvarez-Chavez, L. Fu, M. Ibsen, J. Nilsson // *IEEE Photonics Technol. Lett.* – 2004. – №16. – P. 1825–1827.

31. 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.

32. 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.S. Soh, C.A. Codemard, J. Nilsson // *Opt. Lett.* – 2005. – №30. – P. 2997.

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

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

35. 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.

36. 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.

37. Single-frequency fiber amplifier at 15  $\mu\text{m}$  with 100 W in the linearly-polarized TEM<sub>00</sub> 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.

38. Single frequency 1560nm Er:Yb fiber amplifier with 207W output power and 50.5% slope efficiency / D. Creedon, H. Pretorius, J. Limongelli, S. D. Setzler // *Fiber Lasers XIII Technol. Syst. Appl.* – 2016. – №9728. – P. 97282L.

39. Modeling Er/Yb fiber lasers at high powers / L. Dong, T. Matniyaz, M. T. Kalichevsky-Dong, J. Nilsson, Y. Jeong // *Opt. Express.* – 2020. – №28. – P. 16244.

40. Han Q., Ning J., Sheng Z. Numerical investigation of the ASE and power scaling of cladding-pumped Er-Yb codoped fiber amplifiers // *IEEE J. Quantum Electron.* – 2010. – №46. – P. 1535–1541.

41. 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. – №45. – P. 1782.

42. Single frequency, 5 ns, 200  $\mu$ J, 1553 nm fiber laser using silica based Er-doped fiber / Z. Zhao, H. Xuan, H. Igarashi, S. Ito, K. Kakizaki, Y. Kobayashi // *Opt. Express.* – 2015. – №23. – P. 29764.

43. Selective excitation of the fundamental mode in a multimode fiber using an adiabatically tapered splice / Y. Jung, Y. Jeong, G. Brambilla, D.J. Richardson, Yoonchan Jeong, G. Brambilla, D.J. Richardson // *2009 14th Optoelectron. Commun. Conf.* – 2009. – №34. – P. 1–2.

44. High Peak Power Er-doped Tapered Fiber Amplifier / M.M. Khudyakov, A.E. Levchenko, V.V. Vel'miskin, K.K. Bobkov, D.S. Lipatov // *Photoptics.* – 2018. – P. 105–109.

45. Optimisation of the efficiency of tapered erbium-doped optical fibre / M.M. Khudyakov, A.E. Levchenko, V.V. Vel'miskin, K.K. Bobkov, S.S. Aleshkina, M.M. Bubnov, M.V. Yashkov, A.N. Guryanov, L.V. Kotov, M.E. Likhachev // *Quantum Electron.* – 2021. – №51. – P. 1056–1060.

## References

1. Jelínková H., Pašta J., Šulc J., Němec M., Koranda P. Anterior eye tissue transmission for the radiation with the wavelength from eye safe region. *Laser Phys. Lett.*, 2005, no. 2, pp. 603-607.

2. 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.

3. Kotov L.V., Töws A., Kurtz A., Bobkov K.K., Aleshkina S.S., Bubnov M.M., Lipatov D.S., Guryanov A.N., Likhachev M. Monolithic high peak-power coherent Doppler lidar system. *Proc. SPIE*, 2016, no. 9728, 97282U p.

4. Dobler J.T., Braun M., Nagel J., Temyanko V.L., Zaccheo T.S., Harrison F.W., Browell E.V., Kooi S.A. Applications of fiber lasers for remote sensing of atmospheric greenhouse gases. *Fiber Lasers X Technol. Syst. Appl.*, 2013, no. 8601, 86011Q p.

5. Yu A.W., Abshire J.B., Storm M., Betin A. Laser amplifier development for the remote sensing of CO<sub>2</sub> from space. *Proc. SPIE*, 2015, no. 9342, 93420M p.

6. Koplow J.P., Kliner D.A.V., Goldberg L. Single-mode operation of a coiled multimode fiber amplifier. *Opt. Lett.*, 2000, no. 25, 442 p.

7. Fini J.M. Bend-resistant design of conventional and microstructure fibers with very large mode area. *Opt. Express*, 2006, no. 14, 69 p.

8. P.F. Wysocki, J.L. Wagener, M.J.F. Digonnet, H.J. Shaw Evidence and modeling of paired ions and other loss mechanisms in erbium-doped silica fibers. *Proc. SPIE*, 1993, no. 1789, 66 p.

9. Myslinski P., Nguyen D., Chrostowski J., Member S. Effects of concentration on the performance of erbium-doped fiber amplifiers. *J. Light. Technol.*, 1997, no. 15, pp. 112-120.

10. Likhachev M.E., Bubnov M.M., Zotov K.V., Lipatov D.S., Yashkov M.V., Guryanov A.N. Effect of the AlPO<sub>4</sub> join on the pump-to-signal conversion efficiency in heavily Er-doped fibers. *Opt. Lett.*, 2009, no. 34, 3355 p.

11. Várallyay Z., Jasapara J.C. Comparison of amplification in large area fibers using cladding-pump and fundamental-mode core-pump schemes. *Opt. Express*, 2009, no. 17, 17242 p.

12. 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.

13. 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.

14. Kotov L., Likhachev M., Bubnov M., Lipatov D., Guryanov A. Record efficiency kW-level peak power single-frequency Er-doped fiber amplifier. *CLEO Eur.*, 2015, P.CJ\_P\_48.

15. Kotov L.V., Aleshkina S.S., Khudyakov M.M., Bubnov M.M., Medvedkov O.I., Lipatov D.S., Guryanov A.N., Likhachev M.M. High-Brightness Multimode Fiber Lasers for Resonant Pumping. *J. Light. Technol.*, 2017, no. 35, pp. 4540-4546.

16. Supradeepa V.R., Nicholson J.W. Power scaling of high-efficiency 1,5  $\mu\text{m}$  cascaded Raman fiber lasers. *Opt. Lett.*, 2013, no. 38, 2538 p.

17. Lim E.-L., Alam S., Richardson D.J. Optimizing the pumping configuration for the power scaling of in-band pumped erbium doped fiber amplifiers. *Opt. Express*, 2012, no. 20, 13886 p.

18. Jebali M.A., Maran J.-N., LaRochelle S. 264 W output power at 1585 nm in Er–Yb codoped fiber laser using in-band pumping. *Opt. Lett.*, 2014, no. 39, 3974 p.

19. Zhang J., Fromzel V., Dubinskii M. Resonantly cladding-pumped Yb-free Er-doped LMA fiber laser with record high power and efficiency. *Opt. Express*, 2011, no. 19, 5574 p.

20. Jebali M.A., Maran J.-N.N., LaRochelle S., Chatigny S., Lapointe M.A., Gagnon E. A 103W high efficiency in-band cladding-pumped 1593 nm all-fiber erbium-doped fiber laser. *CLEO*, 2012, JTh1I.3 p.

21. Kotov L., Likhachev M., Bubnov M., Medvedkov O., Lipatov D., Guryanov A., Zaytsev K., Jossent M., Février S. Millijoule pulse energy 100-nanosecond Er-doped fiber laser. *Opt. Lett.*, 2015, no. 40, 1189 p.

22. Jasapara J.C., Andrejco M.J., Desantolo A., Yablon A.D., Várallyay Z., Nicholson J.W., Fini J.M., Digiovanni D.J., Headley C., Monberg E., Dimarcello F.V. Diffraction-limited fundamental mode operation of core-pumped very-large-mode-area Er fiber amplifiers. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2009, no. 15, p. 3-11.

23. 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. *CLEO*, 2012, no. 1, pp. 1-2.

24. 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 CO<sub>2</sub> LIDAR from a polarization-maintaining, very-large-mode-area, Er-doped fiber amplifier. *Opt. Express*, 2016, no. 24, 19961 p.

25. 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.

26. Petersen E., Shi W., Chavez-Pirson A., Peyghambarian N. High peak-power single-frequency pulses using multiple stage, large core phosphate fibers and preshaped pulses. *Appl. Opt.*, 2012, no. 51, 531 p.

27. Laroche M., Girard S., Sahu J.K., Clarkson W.A., Nilsson J. Accurate efficiency evaluation of energy-transfer processes in phosphosilicate Er<sup>3+</sup>-Yb<sup>3+</sup>-codoped fibers. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2006, no. 23, 195 p.

28. 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.

29. 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.

30. Alegria C., Jeong Y., Codemard C., Sahu J.K.K., Alvarez-Chavez J.A.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.

31. 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.

32. 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.

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

34. Bai X., Sheng Q., Zhang H., Fu S., Shi W., Yao J., 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.

35. 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.

36. 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.

37. De Varona O., Fittkau W., Booker P., Theeg T., Steinke M., Kracht D., Neumann J., Wessels P. Single-frequency fiber amplifier at 15  $\mu\text{m}$  with 100 W in the linearly-polarized TEM<sub>00</sub> mode for next-generation gravitational wave detectors. *Opt. Express*, 2017, no. 25, 24880 p.

38. Creeden D., Pretorius H., Limongelli J., Setzler S.D. Single frequency 1560nm Er:Yb fiber amplifier with 207W output power and 50.5 % slope efficiency. *Fiber Lasers XIII Technol. Syst. Appl.*, 2016, no. 9728, 97282L p.

39. Dong L., Matniyaz T., Kalichevsky-Dong M.T., Nilsson J., Jeong Y. Modeling Er/Yb fiber lasers at high powers. *Opt. Express*, 2020, no. 28, 16244 p.

40. Han Q., Ning J., Sheng Z. Numerical investigation of the ASE and power scaling of cladding-pumped Er-Yb codoped fiber amplifiers. *IEEE J. Quantum Electron*, 2010, no. 46, pp. 1535-1541.

41. 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, no. 45, 1782 p.

42. Zhao Z., Xuan H., Igarashi H., Ito S., Kakizaki K., Kobayashi Y. Single frequency, 5 ns, 200  $\mu\text{J}$ , 1553 nm fiber laser using silica based Er-doped fiber. *Opt. Express*, 2015, no. 23, 29764 p.

43. Jung Y., Jeong Y., Brambilla G., Richardson D.J., Jeong Yoonchan, Brambilla G., Richardson D.J. Selective excitation of the fundamental mode in a multimode fiber using an adiabatically tapered splice. *2009 14th Optoelectron. Commun. Conf.*, 2009, no. 34, pp. 1-2.

44. Khudyakov M.M., Levchenko A.E., Vel'miskin V.V., Bobkov K.K., Lipatov D.S. High Peak Power Er-doped Tapered Fiber Amplifier. *Photoptics*, 2018, pp. 105-109.

45. Khudyakov M.M., Levchenko A.E., Vel'miskin V.V., Bobkov K.K., Aleshkina S.S., Bubnov M.M., Yashkov M.V., Guryanov A.N., Kotov L.V., Likhachev M.E. Optimisation of the efficiency of tapered erbium-doped optical fibre. *Quantum Electron*, 2021, no. 51, pp. 1056-1060.

**Финансирование:** исследование не имело спонсорской поддержки.

**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 not sponsored.

**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: Худяков, М.М. Одночастотные импульсные волоконные усилители с высокой пиковой мощностью на длине волны 1,55 мкм / М.М. Худяков, М.Е. Лихачёв // Прикладная фотоника. – 2022. – Т. 9, № 1. – С. 5–25.

Please cite this article in English as: Khudyakov M.M., Likhachev M.E. Single-frequency high-peak-power pulsed fiber amplifiers at 1.55  $\mu\text{m}$  // Applied photonics, 2022, no. 1, pp. 5-25.