

Экспериментальное исследование полностью оптоволоконного усилителя мощностью 100 Вт, работающего вблизи 980 нм*

М.Чен, Х.Ду, Дж.Цао, А.Лю, Чж.Пан, Чж.Хуанг, Цз.Чен

Продемонстрирован полностью волоконный усилитель мощностью 100 Вт с длиной волны генерации около 980 нм на волокне с двойной оболочкой, легированном Yb (DCYF), с диаметрами сердцевины и оболочки 60 и 125 мкм соответственно. При использовании DCYF предварительно оптимизированной длины (около 1.4 м) была достигнута общая выходная мощность около 113.4 Вт при мощности затравочного излучения 9 Вт, причем подавление усиленного спонтанного излучения (УСИ) с длиной волны 1030 нм по полной амплитуде составило около 21.5 дБ. Экспериментально исследована роль длины активного волокна. Путем интегрирования по спектру обнаружено, что, несмотря на уменьшение общей выходной мощности, выходная мощность вблизи 980 нм увеличивается по мере укорочения DCYF до 1.2 м из-за лучшего подавления УСИ на 1030 нм. Это означает, что эффектом УСИ на длине волны 1030 нм нельзя пренебрегать, если его подавление ниже 30 дБ. Экспериментально исследовано влияние мощности затравочного излучения на выходные характеристики усилителя. Обнаружено, что при большей мощности «затравки» лучше подавляется 1030-нм УСИ и повышается дифференциальный КПД. С использованием DCYF длиной 1.2 м и затравочной мощности 14 Вт в области 980 нм достигнута максимальная мощность выходного сигнала, равная согласно оценкам примерно 108.2 Вт, причем подавление УСИ на длине волны 1030 нм по полной амплитуде составило более 33 дБ при максимальной выходной мощности. Представленные результаты могут быть весьма полезны для разработки и исследования лазера с длиной волны 980 нм, а также других типов трехуровневых волоконных лазеров.

Ключевые слова: лазерные усилители, оптическое волокно, иттербий, усиленное спонтанное излучение.

1. Введение

Мощным лазерам и усилителям на волокне, легированном Yb, генерирующим в области 980 нм, уделяется большое внимание в связи с их потенциально возможным применением в качестве источников накачки для мощных волоконных лазеров, легированных Yb/Er, а также других новых источников, например синего и ультрафиолетового излучения [1–6].

Однако по сравнению с волоконным лазером на основе Yb с большей длиной волны (обычно более 1030 нм), получение мощной генерации на $\lambda = 980$ нм является сложной задачей [2, 7–11]. С одной стороны, согласно схеме уровней энергии иона Yb [2] излучение на 980 нм создается системой трех уровней (необходима инверсия населенности более 50%), тогда как излучение на большей длине волны создается с участием четырех уровней (требуется только 5%-ная инверсия населенности). Следствием этого является высокий порог накачки для генерации на $\lambda = 980$ нм и наличие серьезной конкуренции за усиление между излучениями на этой и на больших длинах волн. С другой стороны, очень трудно сделать излучение в области 980 нм доминирующим в конкуренции за

усиление из-за большого сечения поглощения света в этой области спектра у волокна, легированного Yb (существенно превышает сечение поглощения для больших длин волны [8]), результатом чего является значительное повторное поглощение излучения на 980 нм. Кроме того, следует отметить, что повторно поглощенное излучение вблизи 980 нм также может использоваться для генерации излучения с большей длиной волны, что затрудняет усиление излучения на 980 нм.

По счастью, в работе [7] было обнаружено, что испускание на длине волны 980 нм может доминировать в конкуренции за усиление с УСИ на 1030 нм в случае волокна с достаточно большим отношением диаметров сердцевины и оболочки. Исходя из этого, были разработаны и испытаны различные типы световодов, легированных Yb, например световод с воздушной рубашкой и кольцевым легированием [12], волокно на основе стержневой фотонной кристалла (фотонно-кристаллическое волокно, ФКВ) [13, 14], коническое волокно с большим диаметром сердцевины [15], седлообразное волокно [16], полностью твердотельное волокно с фотонной запрещенной зоной (ФЗЗ) [17–21]. Впервые генерация с мощностью на уровне 100 Вт на $\lambda = 980$ нм была получена от лазера на ФКВ стержневого типа, в котором для подавления УСИ на длине волны 1030 нм использовалось волокно с диаметрами сердцевины и оболочки 80 и 200 мкм. В конечном итоге был получен выходной пучок мощностью 94 Вт с дифференциальным КПД 48% [13]. Однако именно из-за большого диаметра сердцевины ФКВ оптическая схема получилась достаточно объемной, включающей передачу света между волноводом и свободным пространством [13, 14], что сделало всю систему менее надежной и компактной. Позже, в 2019 г., был продемонстрирован полностью волоконный генератор мощностью 151 Вт на

* Перевод с англ. В.Л.Дербова.

M.Chen, H.Du, J.Cao, A.Liu, Z.Pan, Zh.Huang, J.Chen. College of Advanced Interdisciplinary Studies, National University of Defense Technology, Changsha, 410073, China; State Key Laboratory of Pulsed Power Laser Technology, Changsha, 410073, China; Hunan Provincial Key Laboratory of High Energy Laser Technology, Changsha, 410073, China; e-mail: cmn2015210162@163.com

Поступила в редакцию 25 мая 2021 г., после доработки – 30 августа 2021 г.

твердотельном волокне с ФЗЗ, работающий на $\lambda = 980$ нм [21]. Достаточный уровень подавления УСИ на 1030 нм был реализован за счет высоких потерь в полосе на этой длине волны в волокне с диаметрами сердцевины и оболочки соответственно 21 и 124 мкм. В результате был получен почти дифракционно-ограниченный выходной пучок мощностью 151 Вт с дифференциальным КПД 63%.

Помимо волоконных генераторов, внимание уделяется также волоконным усилителям, работающим в области 980 нм, которые играют важную роль в масштабировании мощности волоконных лазеров. В 2017 г. был продемонстрирован полностью волоконный усилитель мощностью 34 Вт на волокне с двойной оболочкой, легированном Yb (DCYF), с диаметрами сердцевины и оболочки 95 и 125 мкм и дифференциальным КПД 66% [22]. Несмотря на то что большой диаметр сердцевины активного волокна затрудняет контроль качества пучка, такие волокна по-прежнему привлекательны в приложениях, менее требовательных к качеству пучка (например, в качестве тандемного источника накачки волоконных лазеров с редкоземельными примесями [1]). В 2020 г. был представлен полностью волоконный усилитель мощностью 39 Вт с качеством пучка, близким к дифракционному, на волокне с W-профилем [23]. Однако из-за небольшого отношения размеров сердцевины и оболочки (35/125) активного волокна полученный дифференциальный КПД составил только 19%. И хотя численные исследования показали, что волоконный усилитель на уровне 100 Вт с длиной волны 980 нм может быть реализован с помощью DCYF с большим диаметром сердцевины [24, 25], соответствующие экспериментальные исследования проводятся очень редко.

В настоящей работе представлен полностью волоконный DCYF-усилитель мощностью 100 Вт, работающий на длине волны вблизи 980 нм, с диаметрами сердцевины и оболочки 60 и 125 мкм. Используя схему двунаправленной накачки, можно получить выходную мощность более 100 Вт. Параметры усилителя тестируются полностью волоконным генератором на длине волны около 980 нм, используемым в качестве источника затравочного излучения.

Экспериментально исследовано влияние длины активного волокна и мощности затравки на выходные свойства усилителя.

2. Экспериментальная установка

Экспериментальная установка полностью волоконного усилителя показана на рис.1. В качестве активного волокна используется DCYF с диаметром сердцевины 60 мкм и внутренней оболочки 125 мкм; числовая апертура NA внутренней оболочки и сердцевины волокна составляет 0.46 и 0.1 соответственно. Такое волокно с большим отношением диаметров сердцевины и оболочки способно подавить УСИ на длине волны 1030 нм [25]. Кроме того, внутренняя оболочка DCYF является восьмиугольной, что способствует более эффективному поглощению накачки, составляющему около 6.8 дБ/м на $\lambda = 915$ нм. Это волокно также не должно испытывать фотопотемнение. Для получения высокой мощности накачки в нашем эксперименте реализована двунаправленная схема накачки с использованием двух боковых объединителей. Накачка подается через отрезки волокна от четырех лазерных диодов (ЛД) с длиной волны 915 нм. Суммарная мощность излучения накачки, которая может быть введена в активное волокно через два боковых объединителя, составляет 307 Вт. Устройство для удаления света из оболочки (cladding light stripper, CLS) отфильтровывает остаточное излучение накачки. Выходное излучение выводится через эндкап.

Для тестирования усилителя в качестве источника затравочного излучения используется полностью волоконный генератор на 980 нм (конфигурация аналогична описанной в [26]). Источник содержит четыре ЛД на 915 нм, излучение которых по отрезкам волокна подается на два волоконных $(2 + 1) \times 1$ -объединителя, а также DCYF длиной 0.46 м, волоконные брэгговские решетки с высоким отражением (ВБР ВО) и низким отражением (ВБР НО), два CLS, полосовой фильтр и адаптер поля моды (АПМ). Четыре ЛД с длиной волны 915 нм служат для накачки генератора, а две ВБР с центральной длиной

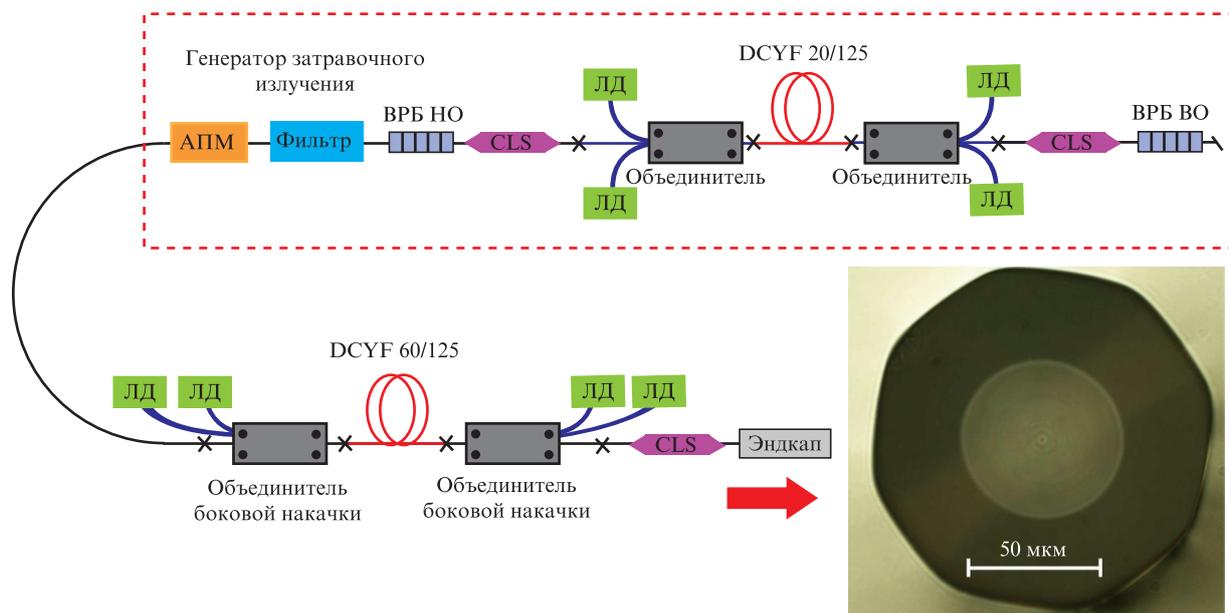


Рис.1. Экспериментальная схема полностью волоконного усилителя на 980 нм (на вставке – изображение поперечного сечения DCYF 60/125 мкм).

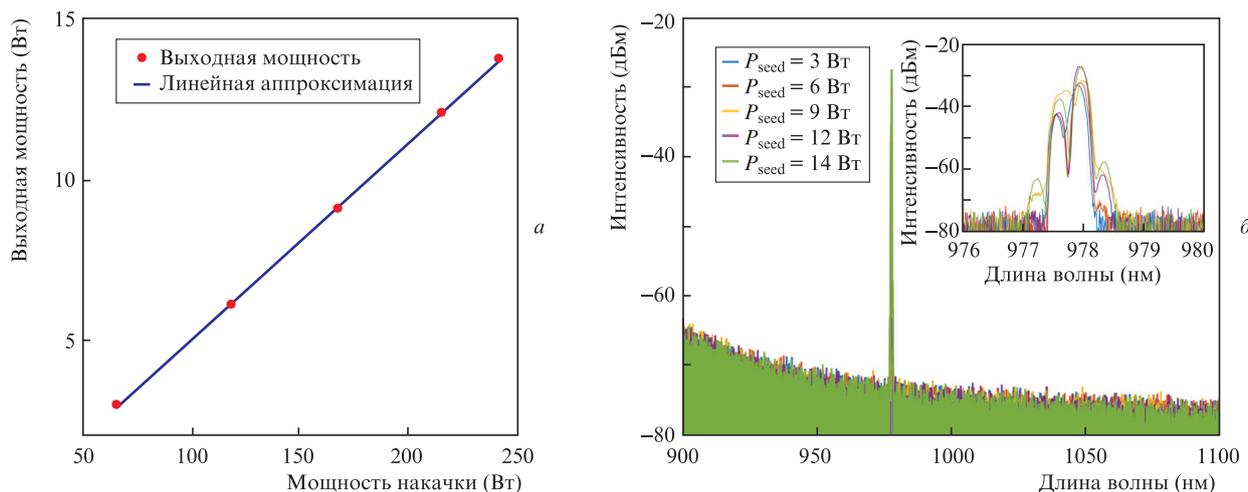


Рис.2. Выходная мощность (а) и спектр (б) затравочного излучения после АПМ (на вставке – увеличенный участок спектра в области 980 нм).

волны около 978 нм образуют резонатор генератора. ВБР ВО имеет в максимуме отражательную способность около 99.5% и полосу пропускания около 2 нм, а ВБР НО – около 15% и около 0.5 нм соответственно. DCYF длиной 0.46 м (20/125 мкм) используется в качестве активного волокна, а два CLS служат для удаления остаточного света накачки. Полосовой фильтр используется не только для фильтрации 1030-нм УСИ, создаваемого генератором, но и для защиты затравки от любой обратной связи усилителя.

Затравочное излучение вводится в усилитель через АПМ, после которого измеряются его мощность и спектр (рис.2). Видно, что мощность затравки линейно увеличивается с ростом мощности накачки. В спектре затравочного света имеется два пика на длинах волн около 977.6 и 978 нм (рис.2,б), наличие которых обусловлено спектрами отражения ВБР НО и ВБР ВО. Несмотря на это, весь затравочный свет находится в диапазоне длин волн от 977 до 978.6 нм, причем УСИ на 1030 нм не наблюдается.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

3.1. Влияние длины активного волокна усилителя

Проведенные ранее исследования показали, что длина активного волокна имеет большое значение для подавления УСИ на длине волны 1030 нм в источнике из волокна, легированного Yb, с $\lambda = 980$ нм [10, 11, 24–26]. При использовании длинного активного волокна появляется заметное 1030-нм УСИ, а излучение на 980 нм подавляется [25, 26]. Поэтому влияние длины активного волокна на выходные характеристики усилителя изучается в первую очередь. Мы использовали затравочное излучение мощностью 9 Вт. При постепенном укорачивании активного волокна усилителя было обнаружено, что УСИ на 1030 нм подавляется, когда длина волокна уменьшается до 1.4 м. Измерения выходной мощности и спектра излучения усилителя (рис.3) показали, что его выходная мощность линейно растет с мощностью накачки; в конечном итоге, при мощности накачки 307 Вт выходная мощность достигла 113.4 Вт, а дифференциальный КПД η составил около 38%. Из рис.3,б следует, что при максимальной выходной мощности подавление УСИ на длине волны 1030 нм равно 21.5 дБ.

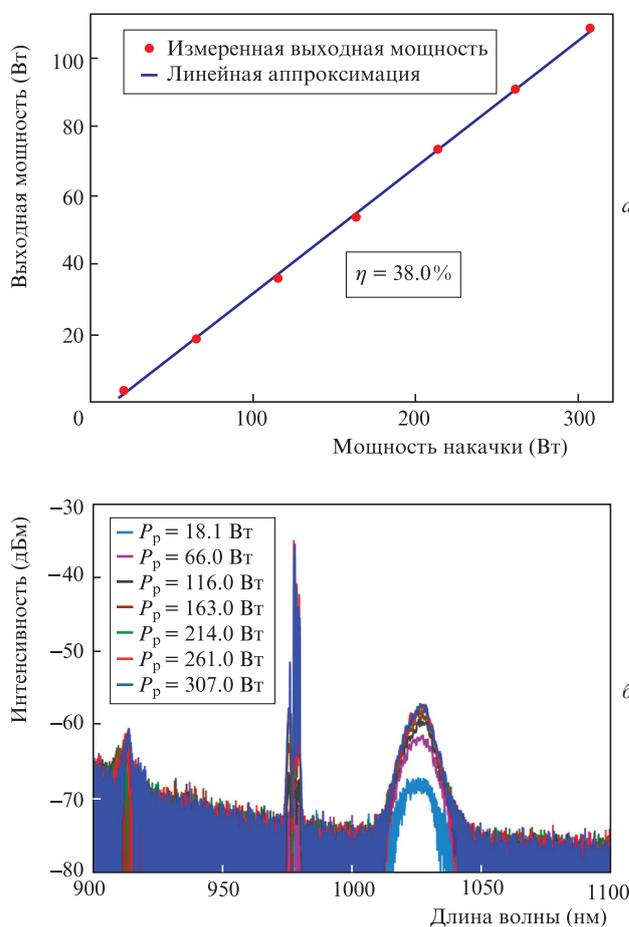


Рис.3. Зависимости выходной мощности (а) и спектра (б) усилителя от мощности накачки P_p .

Чтобы лучше изучить влияние длины активного волокна усилителя, мы дополнительно укоротили его длину и вновь измерили выходные характеристики. На рис.4 продемонстрированы изменения выходной мощности и спектра усилителя с длиной активного волокна 1.3 и 1.2 м. Из рис.4,а видно, что при длине волокна 1.3 м и мощности накачки 307 Вт достигается дифференциальный КПД 37% и выходная мощность 111.3 Вт, при этом реализуется подавление УСИ на 1030 нм по полной амплитуде в

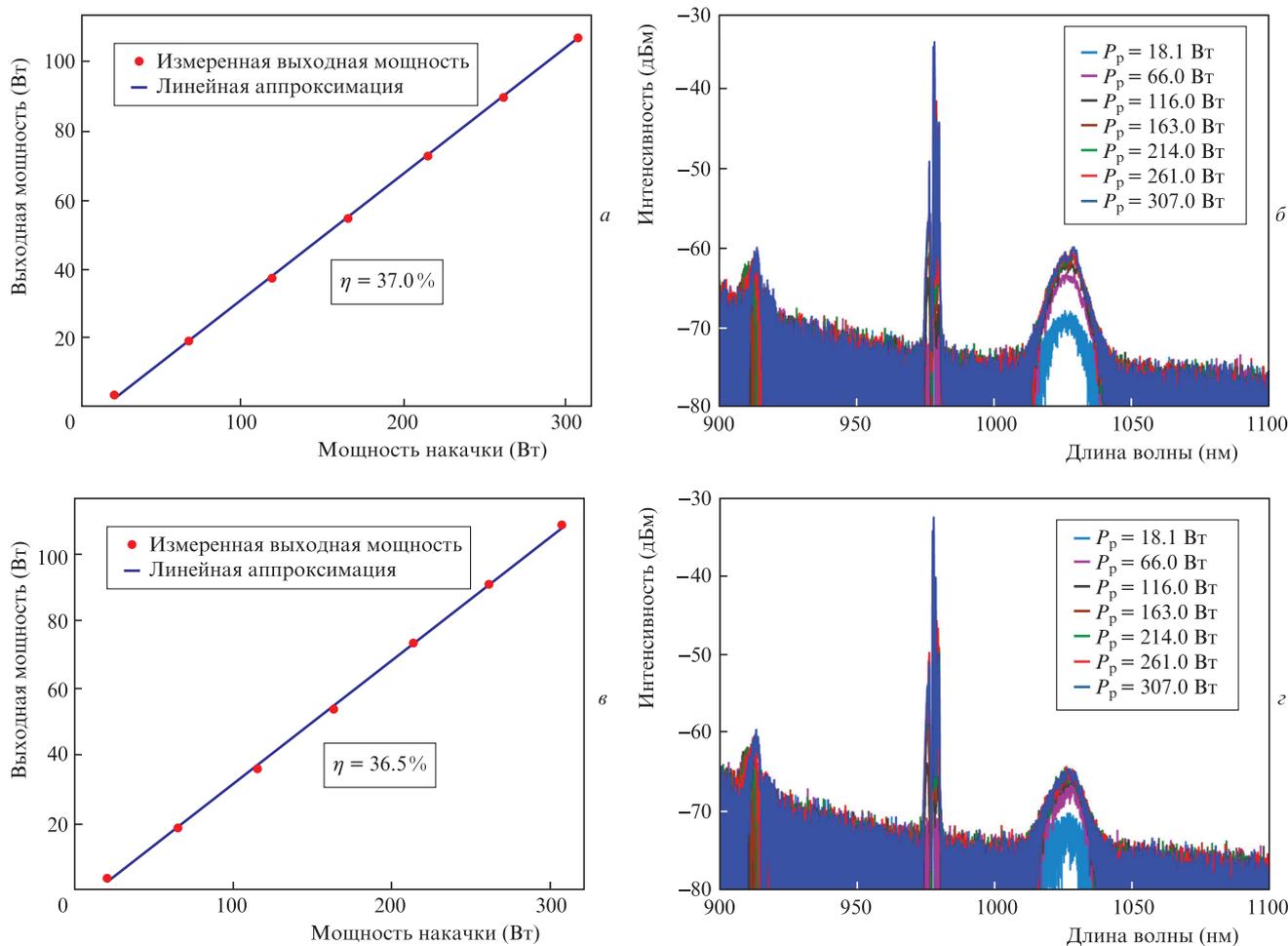


Рис.4. Зависимости выходной мощности, дифференциальной эффективности и спектра от мощности накачки при длине активного волокна 1.3 (а, б) и 1.2 м (в, з).

26 дБ (рис.4,б). При укорочении активного волокна до 1.2 м дифференциальный КПД снижается до 36.5%, выходная мощность – до 110 Вт (рис.4,в), зато подавление УСИ на 1030 нм по полной амплитуде увеличивается до 32 дБ при выходной мощности 110 Вт (рис.4,з). Сравнивая эти результаты с результатами для активного волокна длиной 1.4 м (рис.3), можно обнаружить два эффекта, вызванных сокращением длины волокна. Первый – это снижение дифференциального КПД для выходной мощности из-за меньшего поглощения накачки более коротким активным волокном; второй – лучшее подавление УСИ на длине волны 1030 нм в случае более короткого активного волокна [10, 11, 24–26].

Измерения спектров (см. рис.3,б и рис.4,б, з) показали, что выходное излучение содержит не только сигнальный свет на 980 нм, но и УСИ с длиной волны 1030 нм. Видно, что мощность УСИ падает с уменьшением длины активного волокна, но остается вопрос, как при этом изменяется мощность полезного сигнала на длине волны 980 нм. Чтобы ответить на этот вопрос, мы оценили выходную мощность сигнального излучения с $\lambda = 980$ нм путем интегрирования выходного спектра. Соответствующие результаты представлены на рис.5,а.

Немного неожиданно, но рис.5,а демонстрирует увеличение, а не уменьшение дифференциального КПД для выходной мощности на 980 нм при сокращении длины активного волокна, что отличается от результатов измерения, представленных на рис.3,а и 4,а,в. Максимальная

выходная мощность на $\lambda = 980$ нм достигается при использовании активного волокна длиной 1.2 м. Для выяснения причины мы оценили выходную мощность УСИ на 1030 нм (рис.5,б); из рисунка видно, что при длине активного волокна 1.4 м выходная мощность УСИ может достигать 15 Вт благодаря его широкой спектральной полосе, хотя подавление УСИ по полной амплитуде и составляет 21.5 дБ при максимальной выходной мощности (см. рис.3,б). Это означает, что мощность УСИ на длине волны 1030 нм должна составлять 13.2% от измеренной выходной мощности, иначе дифференциальная эффективность будет снижена. Из рис.5,б следует, что в случае длины волокна 1.3 м (подавление УСИ на 1030 нм равно 25.8 дБ) мощность подавленного УСИ (6.76 Вт), составляющая 6.07% от общей мощности, все еще существенна в выходном сигнале при максимальной мощности накачки. И только когда активное волокно укорочено до 1.2 м, мощность УСИ снижается до 2.3 Вт (около 2.1% от общей мощности). Поэтому из-за вклада относительно сильного УСИ выходная мощность на $\lambda = 980$ нм снижается при удлинении активного волокна с 1.2 до 1.4 м, хотя поглощение накачки и общая выходная мощность при этом увеличиваются. Таким образом, влиянием УСИ на длине волны 1030 нм нельзя пренебрегать, если его подавление по полной амплитуде ниже 30 дБ.

Поскольку мощность УСИ на 1030 нм составляет всего 2.1% от общей мощности при длине волокна 1.2 м, а его дальнейшее подавление мало способствует увеличе-

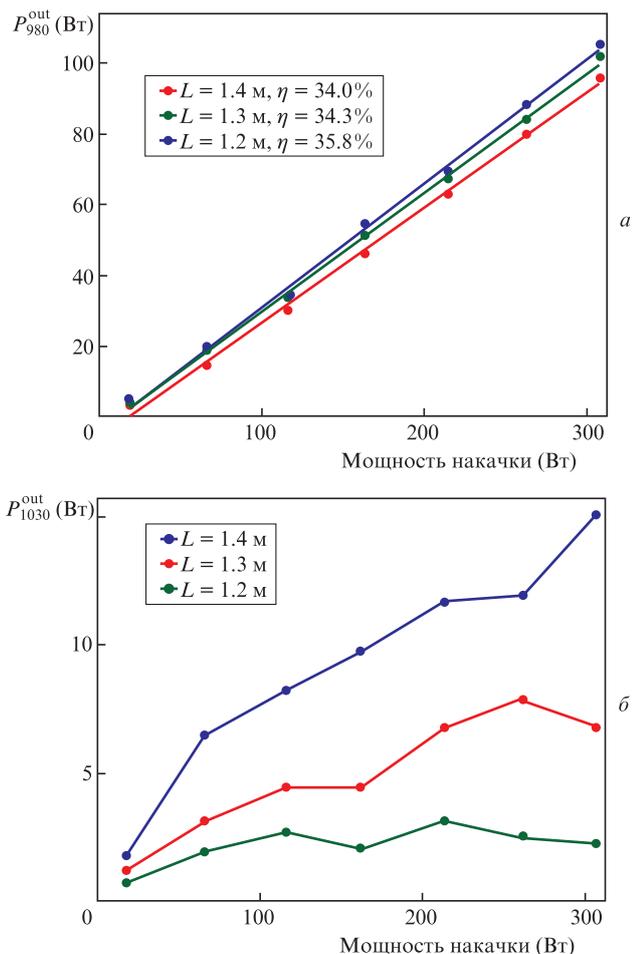


Рис.5. Зависимости расчетной выходной мощности на длине волны 980 (а) и 1030 нм (б) от мощности накачки при различных длинах активного волокна L .

нию выходной мощности, мы принимаем эту длину как оптимальную для активного волокна. При такой длине волокна выходная мощность на $\lambda = 980$ нм составляет около 105.6 Вт с дифференциальным КПД около 35.8%. Приведенные выше результаты подразумевают, что при оптимальной длине активного волокна подавление УСИ на 1030 нм по полной амплитуде не должно быть меньше 30 дБ, что согласуется с численными данными [25] (см. также рис.2 в этой работе).

3.2. Влияние мощности затравочного излучения

При исследовании влияния величины затравочной мощности на выходные параметры усилителя использовалось активное волокно оптимальной длины 1.2 м, а мощность затравки изменялась от 3 до 14 Вт. Измеренные при различных мощностях затравки зависимости выходной мощности от мощности накачки приведены на рис.6,а. Видно, что выходная мощность и дифференциальный КПД монотонно увеличиваются с ростом затравочной мощности, пока она не превышает 9 Вт. При мощностях свыше 9 Вт выходная мощность продолжает увеличиваться с ростом P_{seed} , однако дифференциальный КПД не меняется и остается на уровне 36.5%. Чтобы дополнительно проиллюстрировать влияние мощности затравки, на рис.6,б приведены значения добавленной мощности (выходная мощность минус мощность затравки)

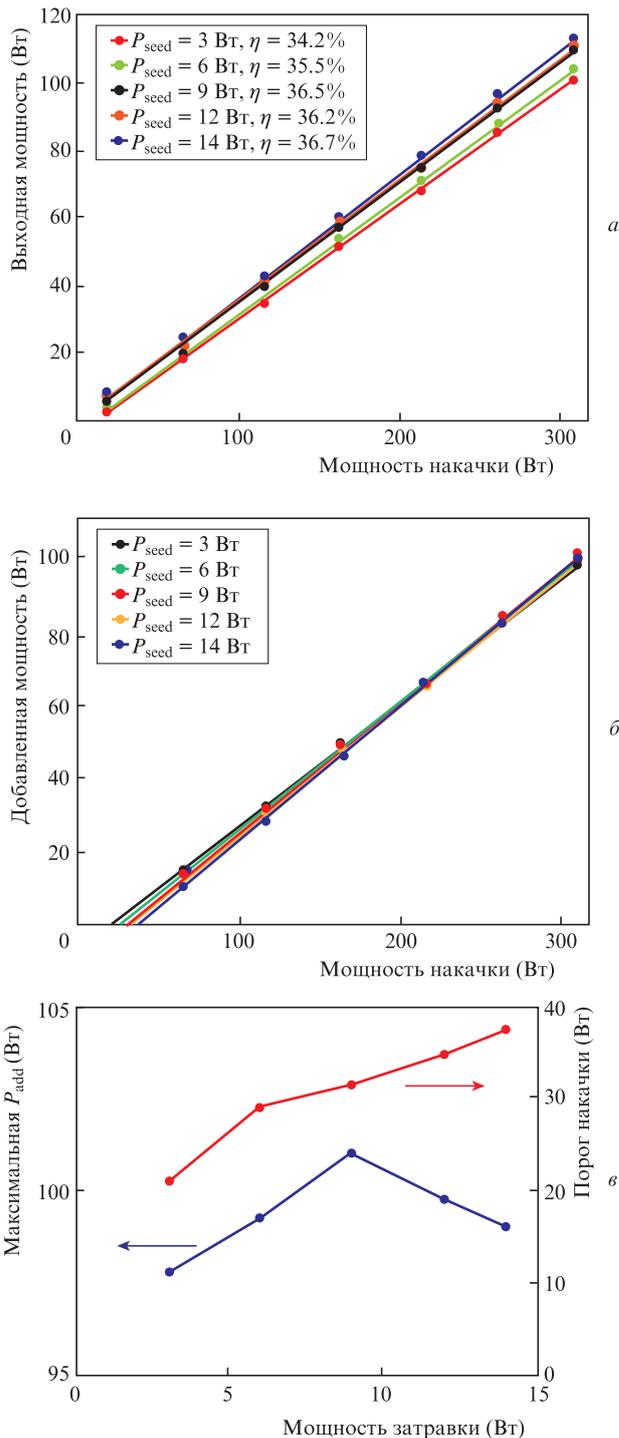


Рис.6. Зависимости выходной мощности (а) и добавленной выходной мощности P_{add} (б) от мощности накачки при различных значениях затравочной мощности P_{seed} , а также зависимости максимальной добавленной выходной мощности и порога накачки от мощности затравки (в).

при различных значениях P_{seed} . Видно, что использование добавленной мощности вместо полной выходной мощности не меняет дифференциальный КПД, причем и в этом случае он увеличивается с ростом P_{seed} . Это означает, что для усиления излучения на 980 нм предпочтительнее использовать входное излучения большей мощности из-за лучшей его конкуренции с УСИ на 1030 нм.

Расчеты показали, что максимальная добавленная мощность достигается при затравочной мощности 9 Вт и

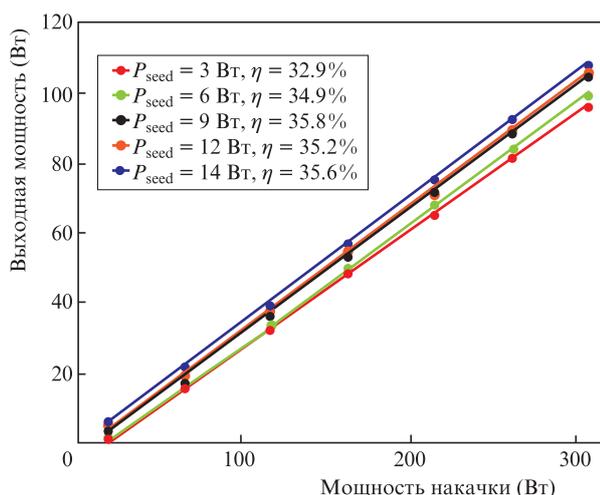


Рис. 7. Расчетные зависимости выходной мощности на 980 нм от мощности накачки при различных мощностях затравки P_{seed} .

мощности накачки 307 Вт (рис. 6, в). Как видно из рисунка, это обусловлено изменением порога накачки с изменением мощности затравки, поскольку он увеличивается с ростом P_{seed} , и для пропускания более сильного затравочного света требуется больше света накачки. Кроме того, при той же входной мощности накачки ее полезная часть, используемая для усиления сигнального света, становится меньше из-за повышения порога накачки. Когда мощность затравки превышает 9 Вт, добавленная мощность уменьшается даже при несколько более высоком дифференциальном КПД. Однако можно ожидать, что при дальнейшем увеличении мощности накачки добавленная мощность при затравочной мощности 14 Вт в конечном итоге станет самой большой.

Мы также рассчитали зависимости от мощности накачки выходной мощности сигнального излучения с $\lambda = 980$ нм (рис. 7). Установлено, что дифференциальный КПД выходной мощности на 980 нм ведет себя аналогично случаю полной мощности (см. рис. 6, а), поэтому для достижения высокого дифференциального КПД затравочная мощность не должна быть слишком малой. Этот результат вполне ожидаем, поскольку большая часть УСИ на длине волны 1030 нм будет индуцироваться при меньшей мощности затравки, что снизит выходную эффективность (с учетом того, что УСИ распространяется в двух направлениях и только часть его поступает на выход волокна). Однако выходная эффективность при затравочной мощности 14 Вт немного ниже, чем при 9 Вт, что вызвано худшим подавлением УСИ на 1030 нм (рис. 8, б). Тем не менее из рис. 7 следует, что большая выходная мощность может быть получена при большей мощности затравки. При мощности затравочного излучения 14 Вт максимальная мощность выходного сигнала на 980 нм составляет около 108.2 Вт.

Измерены также спектры выходного излучения при максимальной мощности накачки 307 Вт и различных значениях мощности затравки (рис. 8, а). Чтобы проиллюстрировать зависимость величины подавления УСИ на 1030 нм от P_{seed} , рассчитано отношение мощности УСИ на 1030 нм к полной и к добавленной мощности на 980 нм при максимальной мощности накачки (рис. 8, б). Это может помочь объяснить изменения дифференциального КПД, показанные на рис. 7: больший дифференциальный КПД должен быть результатом лучшего подавления

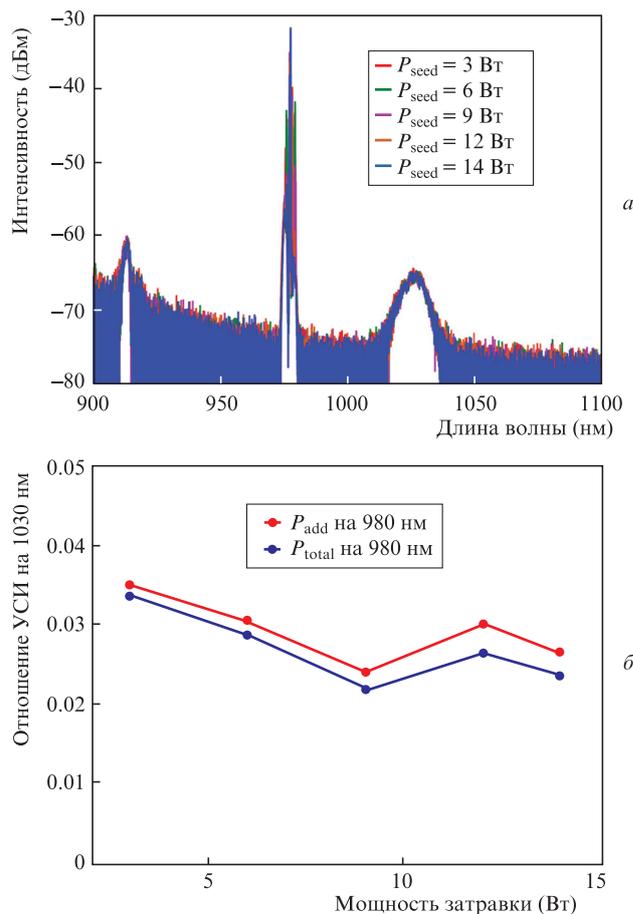


Рис. 8. Выходные спектры при различных значениях мощности затравки P_{seed} (а) и отношения мощности УСИ на 1030 нм к общей (P_{total}) и добавленной (P_{add}) мощности на 980 нм (б) при максимальной мощности накачки 307 Вт.

(снижения доли) УСИ на 1030 нм. При этом наилучшее подавление УСИ на 1030 нм имеет место при мощности затравки 9 Вт, а не при мощности 14 Вт, соответствующей наибольшему дифференциальному КПД. Худшее подавление УСИ на 1030 нм при затравочной мощности 14 Вт также должно быть обусловлено большим порогом накачки, что снижает долю мощности накачки, используемую для усиления сигнала (по сравнению со случаем $P_{seed} = 9$ Вт). Следует отметить, что подавление УСИ на длине волны 1030 нм должно улучшиться с увеличением мощности накачки, и тогда подавление этого УСИ при затравочной мощности 14 Вт будет немного хуже, чем при 9 Вт.

4. Заключение

Экспериментально продемонстрирован полностью волоконный усилитель мощностью 100 Вт, работающий на длине волны 980 нм с диаметрами сердцевины и оболочки 60 и 125 мкм соответственно. При использовании активного волокна длиной 1.4 м выходная мощность, равная 113.4 Вт, достигается при мощности излучения затравки 9 Вт. Полученный дифференциальный КПД составляет 38%, что ниже значения, приведенного в работе [22] (более 45%) для DCYF с диаметрами сердцевины и оболочки 60 и 140 мкм. Одна из возможных причин такого КПД обусловлена относительно высокими потерями излучения накачки, вызванными несовершенством по-

крытия внешней оболочки волокна и не очень хорошими условиями ввода излучения накачки через восьмигранную внутреннюю оболочку по сравнению с вводом во внутреннюю оболочку квадратного сечения, использованную в [22]. Изучение влияния длины активного волокна на характеристики усилителя показало, что, хотя большая длина активного волокна обеспечивает лучшее поглощение накачки, выходная мощность на $\lambda = 980$ нм может быть ниже из-за более сильного УСИ на 1030 нм. Путем оценки выходной мощности сигнального света на 980 нм и УСИ на 1030 нм с использованием интегрирования по спектру было установлено, что наибольшая выходная мощность на $\lambda = 980$ нм (по оценке равная примерно 105.6 Вт) может быть получена при длине активного волокна 1.2 м. Также показано, что вкладом УСИ на длине волны 1030 нм нельзя пренебрегать, если его подавление по полной амплитуде ниже 30 дБ.

Изучено также влияние мощности затравочного излучения. Выяснено, что для подавления УСИ на 1030 нм и повышения выходной эффективности усилителя затравочная мощность должна быть достаточно большой (более 9 Вт в нашем эксперименте). При мощности затравки 14 Вт полученная мощность выходного сигнала вблизи 980 нм составляет около 108.2 Вт. Возможности масштабирования мощности усилителя на 980 нм ограничены мощностью накачки. Полученные результаты могут служить руководством для разработки и исследования лазера с длиной волны 980 нм и других типов трехуровневых волоконных лазеров.

Дж.Цао хотел бы поблагодарить 23-й Научно-исследовательский институт группы электронной науки и техники Китая (23th Research institute of China electronic science and technology group) за помощь в изготовлении волокна DCYF, а также Ж.Чен, П.Лю и Кс.Ван за помощь в экспериментальных исследованиях.

1. Richardson D.J., Nilsson J., Clarkson W.A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27** (11), 63 (2010).
2. Kurkov A.S. *Laser Phys. Lett.*, **4** (2), 93 (2007).
3. Cao J., Guo S., Xu X., Chen J., Lu Q. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20** (5), 373 (2014).
4. Soh D.B.S., Codemard C., Wang S. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **16** (4), 1032 (2004).

5. Li P., Zhong G., Liu Z., Chi J., Zhang X., Yang C., Zhao Z., Li Y., Wang X., Zhao H., Jiang D. *Opt. Laser Technol.*, **44** (7), 2202 (2012).
6. Laroche M., Bartolacci C., Cadier B., Gilles H., Girard S., Lablonde L., Robin T. *Opt. Lett.*, **36**, 3909 (2011).
7. Jelger P., Engholm M., Norin L., et al. *J. Opt. Soc. Am. B*, **27** (2), 338 (2010).
8. Paschotta R., Nilsson J., Tropper A.C., Hanna D.C. *IEEE J. Quantum Electron.*, **33**, 1049 (1997).
9. Nilsson J., Minelly J.D., Paschotta R., Tropper A.C., Hanna D.C. *Opt. Lett.*, **23** (5), 355 (1998).
10. Liu Y., Cao J., Xiao H., Guo S., Si L., Huang L. *J. Opt. Soc. Am. B*, **30** (2), 266 (2013).
11. Wang R., Liu Y., Cao J., Guo S., Si L., Chen J. *Appl. Opt.*, **52**, 5920 (2013).
12. Selvas R., Sahu J.K., Fu L.B., Jang J.N., Nilsson J., Grudinin A.B., Ylä-Jarkko K.H., Alam S.A., Turner P.W., Moore J. *Opt. Lett.*, **28** (13), 1093 (2003).
13. Röser F., Jauregui C., Limpert J., Tünnermann A. *Opt. Express*, **16** (22), 17310 (2008).
14. Bouillet J., Zaouter Y., Desmarchelier R. *Opt. Express*, **16** (22), 17891 (2008).
15. Leich M., Jäger M., Grimm S., Hoh D., Jetschke S., Becker M., Hartung A., Bartelt H. *Laser Phys. Lett.*, **11** (4), 045102 (2014).
16. Aleshkina S.S., Levchenko A.E., Likhachev M.E. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **30** (1), 127 (2018).
17. Pureur V., Bigot L., Bouwmans G., Quiquempois Y., Douay M., Jaouen Y. *Appl. Phys. Lett.*, **92** (6), 061113 (2008).
18. Matniyaz T., Kalichevsky-Dong M.T., Hawkins T.W., Parsons J., Gu G., Li W., Faykus M., Selee B., Dong J.A., Dong L. *Proc. 2018 OSA Laser Congress (ASSL)* (Boston, MA, 2018, paper AM6A.28). DOI:10.1364/ASSL.2018.AM6A.28.
19. Matniyaz T., Kalichevsky-Dong M.T., Hawkins T.W., Parsons J., Gu G., Li W., Faykus M., Selee B., Dong J.A., Dong L. *Proc. SPIE*, **10897**, 108970V (2019).
20. Matniyaz T., Li W., Kalichevsky-Dong M., Hawkins T.W., Parsons J., Gu G., Dong L. *Opt. Lett.*, **44**, 807 (2019).
21. Li W., Matniyaz T., Kalichevsky-Dong M.T., Gafsi S., Hawkins T.W., Parsons J., Gu G., Dong L. *Opt. Express*, **27**, 24974 (2019).
22. Алешкина С.С., Бардина Т.Л., Липатов Д.С. и др. *Квантовая электроника*, **47** (12), 1109 (2017) [*Quantum Electron.*, **47** (12), 1109 (2017)].
23. Valero N., Feral C., Lhermite J., et al. *Opt. Lett.*, **45** (6), 1495 (2020).
24. Ren Y., Cao J., Chen H., Ying H., Pan Z., Du S., Chen J. *Opt. Express*, **26** (14), 17830 (2018).
25. Ren Y., Cao J., Du S., Chen J. *Optik*, **161**, 118 (2018).
26. Chen M., Li Z., Cao J., Liu A., Huang Z., Chen J. *Optik*, **228** (2021). DOI: 10.1016/j.ijleo.2020.166131.