

ПИСЬМА

Волоконный ВКР-лазер на основе кварцевого световода с поллой сердцевиной, генерирующий излучение на длине волны 4.4 мкм

А.В.Гладышев, А.Ф.Косолапов, М.М.Худяков, Ю.П.Яценко, А.Н.Колядин, А.А.Крылов, А.Д.Пряников, А.С.Бирюков, М.Е.Лихачев, И.А.Буфетов, Е.М.Дианов

Впервые создан волоконный ВКР-лазер с длиной волны генерации более 4 мкм. При использовании в качестве активной среды кварцевого револьверного световода с поллой сердцевиной, заполненной молекулярным водородом ($^1\text{H}_2$), получена ВКР-генерация на длине волны 4.4 мкм при накачке излучением импульсного эрбиевого волоконного лазера ($\lambda = 1.56$ мкм, $\tau = 2$ нс). Квантовая эффективность ВКР-преобразования достигала 15%, а максимальная пиковая мощность выходного излучения на длине волны 4.4 мкм составила 0.6 кВт.

Ключевые слова: волоконные лазеры, световоды с поллой сердцевиной, средний ИК диапазон, вынужденное комбинационное рассеяние.

Волоконные лазеры на основе кварцевых световодов широко применяются при решении научных и прикладных задач, поскольку конструкция таких лазеров механически устойчива и обеспечивает компактность, долговременную стабильность и высокое качество выходного пучка. Однако спектральный диапазон, для которого реализованы указанные волоконно-оптические источники излучения, принципиально ограничен областью пропускания кварцевого стекла (0.2–2.2 мкм). Расширение спектрального диапазона, доступного для волоконных лазеров, в длинноволновую область представляет большой интерес и диктуется многообразием возможных практических применений. В частности, лазеры спектрального диапазона 3–5 мкм, совпадающего с одним из окон прозрачности атмосферы, востребованы для биомедицинских применений, удаленного газоанализа, детектирования и обработки полимеров, а также в военной технике [1, 2].

Одним из подходов к расширению области генерации волоконных лазеров в средний ИК диапазон является отказ от использования кварцевого стекла и создание волоконных лазеров на основе световодов из стекол, прозрачных в этом диапазоне. Так, на основе флюоридных световодов, легированных ионами эрбия, были реализованы волоконные лазеры, генерирующие непрерывное излучение мощностью до 30 и 1.5 Вт на длинах волн 2.94 и 3.44 мкм соответственно [3–5]. Кроме того, использование эффекта ВКР в халькогенидных световодах позволило сдвинуть длину волны генерации от 3 до 3.77 мкм, получив при этом выходную мощность ~0.1 Вт в непрерывном режиме [6]. Однако флюоридные и халькогенидные световоды значительно менее технологичны, чем световоды из кварцевого стекла, и уступают им по таким параметрам, как оптическая прочность, химическая стой-

кость, устойчивость к тепловым нагрузкам. Все это существенно затрудняет создание волоконных лазеров среднего ИК диапазона на основе мягких стекол, особенно для тех применений, которые требуют высокой пиковой и/или средней мощности.

Создание световодов с поллой сердцевиной (СПС), имеющих отрицательную кривизну границы сердцевины–оболочка, открыло новые возможности для разработки волоконных лазеров среднего ИК диапазона без отступления при этом от развитой технологии производства кварцевого стекла. Среди различных типов данных СПС наиболее простую конструкцию имеют световоды, оболочка которых состоит из одного слоя цилиндрических кварцевых капилляров (вставка на рис. 1). Такие СПС были впервые предложены в работе [7] и впоследствии получили название револьверных [8, 9]. Несмотря на простоту конструкции, револьверные СПС обеспечивают крайне слабое перекрытие поля моды оптического излучения

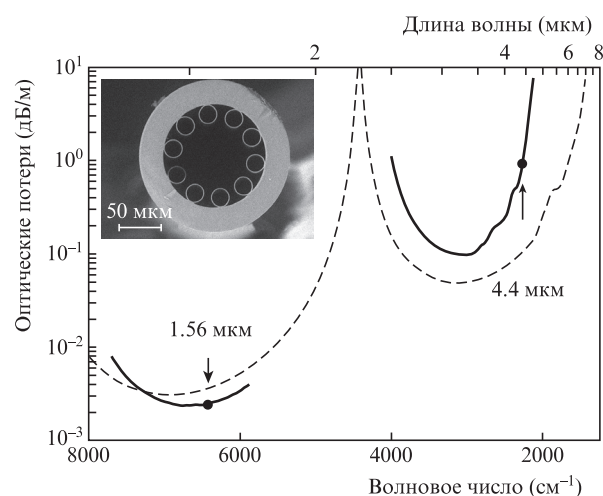


Рис. 1. Рассчитанный спектр оптических потерь револьверного СПС (сплошная кривая). Штриховая кривая ориентировочно показывает положение зон прозрачности световода. Точки – оптические потери, соответствующие длинам волн накачки (1.56 мкм) и ВКР-генерации (4.4 мкм). На вставке – фотография поперечного сечения световода, полученная с помощью электронного микроскопа.

А.В.Гладышев, А.Ф.Косолапов, М.М.Худяков, Ю.П.Яценко, А.Н.Колядин, А.А.Крылов, А.Д.Пряников, А.С.Бирюков, М.Е.Лихачев, И.А.Буфетов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: alexglad@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 14 апреля 2017 г.

с материалом оболочки, что обуславливает низкие оптические потери даже в области фундаментального поглощения кварцевого стекла. Так, в работе [10] был продемонстрирован кварцевый револьверный световод, обладающий волноводными свойствами вплоть до длины волны ~ 8 мкм, а измеренные оптические потери на длине волны 3.39 мкм составили 50 дБ/км, что примерно в 1000 раз меньше материальных потерь в кварцевом стекле [11].

Введение молекулярных газов в сердцевину полых световодов превращает их в активную среду для волоконных лазеров. Например, лазерная генерация в спектральном диапазоне 3.1–3.2 мкм была получена в СПС, заполненных ацетиленом [12]. При этом генерация осуществлялась за счет создания инверсии населенностей на колебательно-вращательных уровнях ацетилена с помощью оптической накачки. Пиковая мощность выходного излучения составляла 10 Вт. Другим методом генерации длинноволнового лазерного излучения в СПС является ВКР в газах, заполняющих сердцевину этих световодов. Особенно привлекательным в данной схеме выглядит использование молекулярного водорода, точнее – наиболее распространенного легкого изотопа водорода ^1H . Молекулы $^1\text{H}_2$ характеризуются очень большим сдвигом частоты при колебательном комбинационном рассеянии – 4155 см^{-1} . Для сравнения, аналогичный сдвиг частоты в молекулярном дейтерии уже существенно меньше – 2991 см^{-1} . Эффективное ВКР в СПС, заполненных водородом, было продемонстрировано при генерации излучения в ближнем ИК диапазоне на $\lambda = 1.8$ [13] и 1.9 мкм [8]. При этом доля квантов накачки с $\lambda \approx 1$ мкм, преобразованных в стоксово излучение, составила 80% и 60% соответственно. В недавней работе [14] при использовании револьверного СПС, заполненного смесью изотопов водорода, была реализована ВКР-генерация в среднем ИК диапазоне на длинах волн 2.9 и 3.5 мкм с квантовой эффективностью 10% и 6% соответственно. Наибольшая длина волны ВКР-генерации, наблюдавшаяся в СПС, на сегодняшний день составляет 3.9 мкм [15], однако квантовая эффективность преобразования в этом случае не превышала 0.1%.

В настоящей работе описан впервые созданный волоконный ВКР-лазер с длиной волны генерации более 4 мкм. При использовании в качестве активной среды кварцевого револьверного СПС, заполненного молекулярным водородом ($^1\text{H}_2$), получена ВКР-генерация на длине волны 4.4 мкм при накачке излучением импульсного эрбиевого волоконного лазера ($\lambda = 1.56$ мкм, $\tau = 2$ нс) с высокой пиковой мощностью. Квантовая эффективность ВКР-преобразования достигала 15%, а максимальная пиковая мощность выходного излучения на длине волны 4.4 мкм составила 0.6 кВт.

Фотография поперечного сечения световода, использованного в данной работе, показана на вставке на рис. 1. Диаметр полой сердцевины равнялся 77 мкм, что соответствует диаметру поля моды $d = 56$ мкм, рассчитанному для основной моды световода на длине волны накачки 1.56 мкм. Оболочка световода образована десятью несоприкасающимися капиллярами из кварцевого стекла марки F300. Толщина стенки капилляров составляла 1.15 мкм. Положение спектральных зон прозрачности световода ориентировочно показано штриховой кривой на рис. 1 (оптические потери оценены по модели ARROW [16] и уменьшены в 60 раз). Результаты детального расчета, выполненного в среде COMSOL для наиболее существенных частей спектра оптических потерь световода, пред-

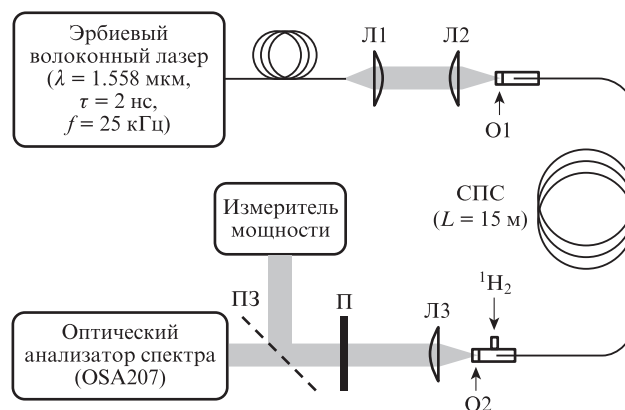


Рис.2. Оптическая схема ВКР-лазера:

Л1 и Л2 – линзы из плавящего кварца; О1 и О2 – сапфировые окна газовых ячеек; Л3 – коллимирующая линза из ZnSe на выходе волоконного лазера; П – германиевая пластинка толщиной 2 мм; П3 – полупрозрачное зеркало; L – длина СПС.

ставлены на рис. 1 сплошной кривой. Видно, что световод имеет зоны пропускания с минимальными потерями вблизи длин волн 1.5 и 3.3 мкм. Расчетные значения оптических потерь для основных мод на стоксовой длине волны 4.4 мкм (находится в нулевой, самой длинноволновой зоне пропускания) и на длине волны накачки 1.56 мкм (находится в следующей, первой зоне) равны 0.92 и 0.0025 дБ/м соответственно.

Волоконный ВКР-лазер был собран по однопроходной схеме (рис.2). Отрезок револьверного СПС длиной 15 м заполнялся молекулярным водородом $^1\text{H}_2$ под давлением 30 атм. Величина давления выбиралась из условия достижения максимального значения ВКР-усиления [17]. Концы полого световода герметично вклеивались в миниатюрные газовые ячейки, имеющие сапфировые окна для ввода/вывода излучения. Для накачки ВКР-лазера был разработан импульсный эрбиевый волоконный лазер, генерирующий неполяризованное излучение на длине волны 1.558 мкм. Задающим генератором для эрбиевого лазера служил полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью, имеющий узкую линию генерации (2 МГц) и излучающий импульсы длительностью 2 нс с частотой следования 25 кГц за счет прямой модуляции током накачки. Излучение задающего генератора усиливалось в двухкаскадном одномодовом эрбиевом волоконном предусилителе с накачкой в сердцевину, после чего оно проходило через узкополосный фильтр для подавления усиленного спонтанного излучения. Затем усиленное излучение с $\lambda = 1.558$ мкм поступало в накачиваемый по оболочке усилитель мощности на основе легированного эрбием световода с большим диаметром поля моды. Более подробное описание аналогичной схемы можно найти в [18]. Излучение эрбиевого лазера накачки на длине волны 1.558 мкм вводилось в полый световод с помощью двух плосковыпуклых линз – Л1 и Л2 (рис.2), при этом средняя мощность излучения накачки, вводимого в полый световод, достигала 1.2 Вт, что соответствует пиковой мощности 24 кВт. Выходное излучение ВКР-лазера коллимировалось линзой из ZnSe и пропускалось (при необходимости) через германиевую пластинку толщиной 2 мм, которая служила поглощающим фильтром для излучения ближнего ИК диапазона. После этого излучение ВКР-лазера поступало на оптический анализатор спектра ($\lambda = 1–12$ мкм, Thorlabs OSA207) и измеритель мощности.

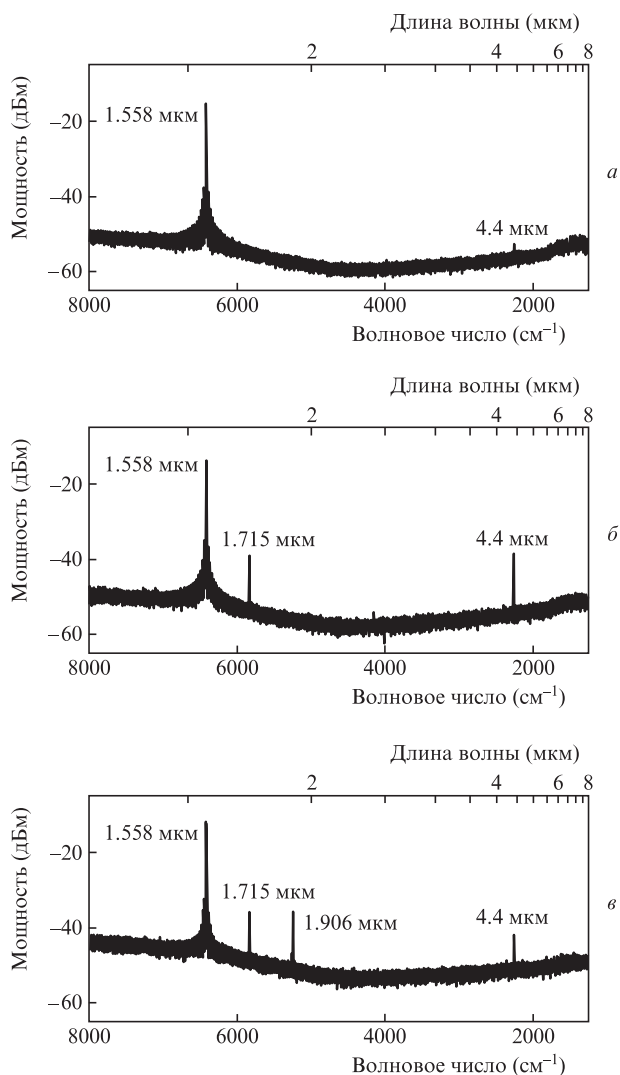


Рис.3. Спектры излучения на выходе СПС, заполненного водородом $^1\text{H}_2$ под давлением 30 атм, измеренные при пиковой мощности накачки 4.7 (а), 5.4 (б) и 18 кВт (в).

Спектры излучения, измеренные на выходе СПС, заполненного водородом, выявили наличие двух конкурирующих нелинейных процессов (рис.3). Видно, что с ростом мощности излучения накачки, введенного в полый световод, последовательно возникает генерация на длинах волн 4.4 и 1.715 мкм (рис.3,а,б). Указанные спектральные компоненты являются результатом ВКР излучения накачки ($\lambda = 1.558$ мкм) на колебательном переходе $Q(1)$ ($\Omega_{\text{vib}} = 4155 \text{ см}^{-1}$) и вращательном переходе $S_0(1)$ ($\Omega_{\text{rot}} = 587 \text{ см}^{-1}$) молекулярного водорода. Дальнейшее возрастание мощности накачки приводило к генерации на длине волны 1.906 мкм, соответствующей второй стоксовой компоненте вращательного ВКР в водороде (рис.3,в).

Для измерения выходной мощности ВКР-лазера в среднем ИК диапазоне интенсивное излучение накачки отфильтровывалось германиевой пластинкой. Суммарная мощность стоксовых компонент измерялась после германиевого фильтра и пересчитывалась в мощность на выходе световода с учетом потерь во всех оптических элементах измерительного тракта (рис.4, кривая 1). Мощность каждой спектральной компоненты была восстановлена исходя из относительных амплитуд компонент, полученных при спектральных измерениях (рис.4). Видно, что ко-

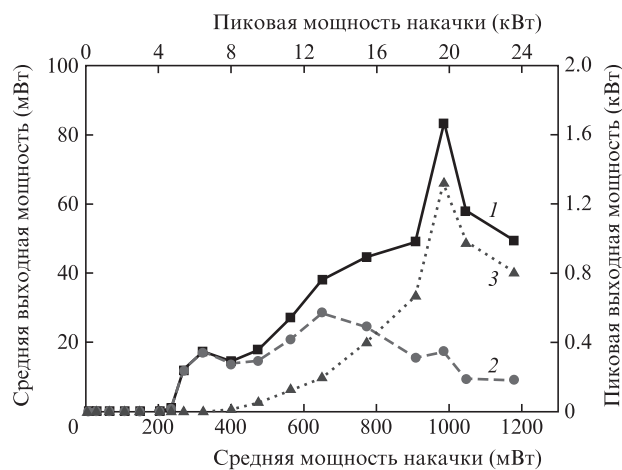


Рис.4. Зависимости средней (пиковой) мощности излучения на выходе волоконного ВКР-лазера от средней (пиковой) мощности излучения накачки, введенного в световод, для всего излучения, прошедшего через германиевый фильтр (1), а также для спектральных компонент на длинах волн 4.4 (2) и 1.906 мкм (3).

лебательная стоксова компонента на длине волны 4.4 мкм имеет наименьший порог генерации, отвечающий пиковой мощности накачки 4.7 кВт. Наибольшая квантовая эффективность преобразования $\lambda = 1.56$ мкм $\rightarrow \lambda = 4.4$ мкм составила 15% (при пиковой мощности накачки ~ 6.5 кВт), а максимальная пиковая выходная мощность излучения на длине волны 4.4 мкм достигала ~ 0.6 кВт, что соответствует средней мощности ~ 30 мВт (рис.4).

На основе численного решения системы уравнений связанных волн для колебательного ВКР в молекулярном водороде было проведено предварительное теоретическое рассмотрение ВКР-генерации на длине волны 4.4 мкм. При этом использовались расчетные значения оптических потерь СПС 0.0025 и 0.92 дБ/м на длинах волн 1.56 и 4.4 мкм соответственно (рис.1), а также значение коэффициента рамановского усиления $g_R = 0.43 \text{ см}^2/\text{ГВт}$, вычисленное для преобразования $\lambda = 1.56$ мкм $\rightarrow \lambda = 4.4$ мкм исходя из известных данных о ширине линии и сечении рассеяния для колебательного перехода $Q(1)$ молекулы H_2 [19, 20]. Теоретическая оценка пороговой пиковой мощности составила 3.3 кВт. Небольшое расхождение теоретического и экспериментального (4.7 кВт) значений порога генерации можно объяснить тем, что реальные оптические потери на длине волны 4.4 мкм несколько превышают расчетную величину. Оптимальная длина ВКР-лазера, полученная при теоретическом рассмотрении для пиковой мощности накачки 24 кВт, была равна ~ 3.5 м, что существенно меньше длины полого световода (15 м), использованной в эксперименте. Следовательно, оптимизация длины полого световода в дальнейших экспериментах позволит значительно повысить выходную мощность и эффективность ВКР-генерации на длине волны 4.4 мкм.

Таким образом, в настоящей работе описан впервые созданный волоконный лазер на основе кварцевых световодов, генерирующий в среднем ИК диапазоне на длине волны более 4 мкм. В качестве активной среды использовался револьверный СПС, заполненный молекулярным водородом $^1\text{H}_2$. При накачке револьверного СПС излучением импульсного эрбиевого волоконного лазера ($\lambda = 1.56$ мкм, $\tau = 2$ нс) с высокой пиковой мощностью получена ВКР-генерация на длине волны 4.4 мкм. Квантовая эффективность ВКР-преобразования достигала 15%, а

максимальная пиковая мощность выходного излучения на длине волны 4.4 мкм составила 0.6 кВт. Эти величины могут быть значительно увеличены за счет оптимизации длины и геометрических параметров поперечного сечения револьверного световода, а также за счет создания полностью волоконной конструкции, включающей ВКР-лазер и лазер накачки.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда №16-19-10513.

1. Walsh B.M., Lee H.R., Barnes N.P. *J. Lumin.*, **169**, 400 (2016).
2. Wade L.G. Jr. *Organic Chemistry* (New Jersey: Pearson Prentice Hall Inc., 2006).
3. Fortin V., Bernier M., Bah S.T., Vallee R. *Opt. Lett.*, **40**, 2882 (2015).
4. Henderson-Sapir O., Jackson S.D., Ottaway D.J. *Opt. Lett.*, **41**, 1676 (2016).
5. Fortin V., Maes F., Bernier M., Bah S.T., D'Auteuil M., Vallee R. *Opt. Lett.*, **41**, 559 (2016).
6. Bernier M., Fortin V., El-Amraoui M., Messaddeq Y., Vallée R. *Opt. Lett.*, **39**, 2052 (2014).
7. Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Kosolapov A.F., Plotnichenko V.G., Semjonov S.L., Dianov E.M. *Opt. Express*, **19**, 1441 (2011).
8. Гладышев А.В., Колядин А.Н., Косолапов А.Ф., Яценко Ю.П., Прямиков А.Д., Бирюков А.С., Буфетов И.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **45**, 807 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 807 (2015)].
9. Gladyshev A.V., Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Yatsenko Yu.P., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Bufetov I.A., Dianov E.M. *Laser Phys.*, **27**, 025101 (2017).
10. Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. *Opt. Express*, **21**, 9514 (2013).
11. Прямиков А.Д., Косолапов А.Ф., Алагашев Г.К., Колядин А.Н., Вельмискин В.В., Бирюков А.С., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **46**, 1129 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 1129 (2016)].
12. Hassan M.R.A., Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Optica*, **3**, 218 (2016).
13. Benoit A., Beaudou B., Debord B., G r me F., Benabid F. *Proc. SPIE*, **10088**, 100880H (2017).
14. Gladyshev A.V., Kosolapov A.F., Khudyakov M.M., Yatsenko Yu.P., Senatorov A.K., Kolyadin A.N., Krylov A.A., Plotnichenko V.G., Likhachev M.E., Bufetov I.A., Dianov E.M. *Proc. CLEO-2017* (San Jose, 2017, paper STu1K.2).
15. Beno t A., Beaudou B., Alharbi M., Debord B., G r me F., Salin F., Benabid F. *Opt. Express*, **23**, 14002 (2015).
16. Litchinitser N.M., Abeeluck A.K., Headley C., Eggleton B.J. *Opt. Lett.*, **27**, 1592 (2002).
17. Bischel W.K., Dyer M.J. *Phys. Rev. A*, **33**, 3113 (1986).
18. Kotov L., Likhachev M., Bubnov M., Medvedkov O., Lipatov D., Guryanov A., Zaytsev K., Jossent M., F vrier S. *Opt. Lett.*, **40**, 1189 (2015).
19. Reintjes J.F., in *Handbook of Laser Science and Technology, Suppl. 2: Optical Materials* (Boca Raton: CRC Press, 1995, p.334).
20. Bischel W.K., Black G. *AIP Conf. Proc.*, **100**, 181 (1983).