

Волоконные ВКР-лазеры среднего ИК диапазона на основе полых световодов из кварцевого стекла

А.В.Гладышев, А.Ф.Косолапов, А.Н.Колядин, М.С.Астапович,
А.Д.Пряников, М.Е.Лихачев, И.А.Буфетов

Дан краткий обзор основных вариантов конструкций, последних достижений и дальнейших перспектив волоконных ВКР-лазеров среднего ИК диапазона на основе полых световодов из кварцевого стекла.

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

Волоконные лазеры, генерирующие в спектральном диапазоне 3–5 мкм, востребованы для решения многих научных и прикладных задач. Этот спектральный диапазон, совпадающий с одним из окон прозрачности атмосферы, удобен для спектроскопии и удаленного газоанализа [1]. В нем находятся интенсивные линии поглощения О–Н-связей (~3 мкм), С–Н-связей (3.3–3.5 мкм) и молекул CO₂ (4.2–4.3 мкм) [2], поэтому лазеры с указанными длинами волн генерации имеют многочисленные применения в таких областях, как биомедицина, лазерное детектирование и обработка углеводородов, а также контроль состояния атмосферы. Кроме того, лазерные источники этого спектрального диапазона представляют интерес для оборонных применений.

Создание световодов с поллой сердцевиной (СПС), обладающих низкими оптическими потерями [3], открыло путь к разработке лазеров нового типа – газовых волоконных лазеров (ГВЛ), генерирующих в том числе и в среднем ИК диапазоне. Такие лазеры способны сочетать в себе преимущества как волоконных лазеров (компактность, надежность, высокое оптическое качество пучка, одномодовое излучение), так и газовых лазеров (широкий диапазон длин волн генерации, высокая выходная мощность, малая ширина линии генерации). Активной средой газовых волоконных лазеров служит газ, заполняющий полую сердцевину световода и обладающий дипольно-активными или комбинационно-активными переходами. При этом полый световод обеспечивает малый диаметр поля моды и большую длину взаимодействия излучения с активной средой, в результате чего пороги нелинейных процессов, таких как вынужденное комбинационное рассеяние (ВКР), могут быть снижены на несколько порядков по сравнению с неволноводными схемами [4, 5]. Кроме того, полые световоды могут обладать низкими оптическими потерями даже в тех областях спектра, где материал, из которого изготовлен световод, имеет сильное фундаментальное поглощение [6–9]. Этот факт

дает возможность реализовывать ГВЛ с длиной волны генерации более 3 мкм на основе полых световодов, изготовленных из кварцевого стекла [10–13].

На сегодняшний день активно развивающейся областью исследований является разработка газовых волоконных лазеров среднего ИК диапазона на основе ВКР. За последнее время в этой области был достигнут ряд значимых результатов. В частности, на основе кварцевых СПС продемонстрированы ВКР-лазеры, генерирующие на длинах волн от 2.9 до 4.4 мкм [10–12]. В настоящей работе дается краткий обзор волоконных ВКР-лазеров среднего ИК диапазона на основе полых световодов из кварцевого стекла.

В большинстве работ газовые волоконные лазеры создаются по безрезонаторной однопроходной схеме [4, 14–17]. Благодаря высокой локализации излучения в сердцевине (диаметром $d \sim 5\text{--}50$ мкм) на протяжении всей длины световода (1–10 м), заполненные активным газом полые световоды обеспечивают усиление за один проход, достаточное для развития генерации из квантовых шумов. Таким образом, однопроходная схема позволяет реализовывать эффективные ГВЛ на основе как ВКР [14–16], так и инверсии населенностей [13]. Создание резонатора для ГВЛ на сегодняшний день остается технически сложной задачей, поскольку для полых световодов отсутствуют такие компоненты, как волоконные ответветели и аналоги волоконных брэгговских решеток. Тем не менее в нескольких работах исследовались резонаторные схемы ГВЛ с использованием кольцевого резонатора на объемных элементах [13] и резонатора Фабри–Перо, образованного брэгговскими решетками, приваренными к торцам активного полого световода [18].

В качестве активной среды газовых волоконных ВКР-лазеров интерес представляют легкие молекулярные газы: легкий водород (¹H₂), дейтерий (D₂), метан (CH₄) или этан (C₂H₆), поскольку они обладают большим рамановским сдвигом (4155, 2987, 2917 и 2954 см⁻¹ соответственно). Это обстоятельство открывает возможности для создания однокаскадных волоконных ВКР-лазеров среднего ИК диапазона, источником накачки для которых могут служить импульсные наносекундные эрбиевые волоконные лазеры, генерирующие в хорошо освоенном спектральном диапазоне около 1.5 мкм.

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

Поступила в редакцию 23 октября 2017 г.

Ключевым компонентом для создания эффективных волоконных ВКР-лазеров среднего ИК диапазона является полый световод, характеристики которого должны удовлетворять определенным условиям. Необходимым условием для ВКР-генерации является превышение ВКР-усиления над величиной оптических потерь в световоде. Известно [19], что можно ввести своего рода параметр качества (P_f), который характеризует световод как среду с ВКР-усилением:

$$P_f = \left(\sqrt{\frac{\alpha_p}{g_R} A^{\text{eff}}} + \sqrt{\frac{\alpha_s}{g_R} A^{\text{eff}}} \right)^2, \quad (1)$$

где g_R – коэффициент ВКР-усиления активной среды; α_i ($i = s, p$) – оптические потери в световоде, нижние индексы «р» и «s» отвечают длинам волн накачки и ВКР-генерации соответственно; A^{eff} – эффективная площадь ВКР-преобразования в световоде. Физический смысл величины P_f , имеющей размерность мощности (Вт), заключается в следующем (как это следует из работы [19]): P_f – величина пороговой мощности накачки непрерывного ВКР-лазера на рассматриваемом волоконном световоде, помещенном в высокодобротный резонатор. Таким образом, чем меньше величина P_f при условии достаточно длинного импульса накачки, тем ближе световод по своим характеристикам к оптимальному для выбранного ВКР-преобразования длин волн $\lambda_p \rightarrow \lambda_s$. При этом важно, что величина P_f должна быть существенно ниже, чем доступная мощность излучения накачки.

Оценим параметр P_f для модельного световода с диаметром полый сердцевин ~ 75 мкм ($A^{\text{eff}} \approx 2.4 \times 10^{-5}$ см²), заполненного молекулярным водородом при комнатной температуре и давлении более 10 атм ($g_R \approx 1$ см/ГВт). Считая принципиально достижимыми в таком световоде оптические потери $\alpha_p \leq 0.1$ дБ/м (в ближнем ИК диапазоне) и $\alpha_s \leq 1$ дБ/м (в среднем ИК диапазоне), получим, что параметр качества $P_f \leq 100$ Вт. Пиковая мощность излучения, многократно превышающая данное значение, может быть достигнута с помощью существующих как твердотельных, так и волоконных импульсных лазеров наносекундной длительности. Однако следует отметить, что создание кварцевых полых световодов с уровнем оптических потерь не более 1 дБ/м в среднем ИК диапазоне представляет собой нетривиальную задачу, поскольку материальное поглощение кварцевого стекла в диапазоне длин волн 3–5 мкм резко возрастает от ~ 50 до ~ 50000 дБ/м. Таким образом, определяющее значение приобретает выбор конструкции полого световода, которая должна обеспечивать минимальное пространственное перекрытие моды оптического излучения с кварцевой оболочкой.

Различные варианты конструкции полых световодов из кварцевого стекла показаны на рис. 1. Одним из видов СПС являются фотонно-кристаллические полые световоды (рис. 1, а), которые позволяют получать низкие оптические потери в относительно небольшой спектральной области. В частности, в таких световодах были продемонстрированы оптические потери менее 0.1 дБ/м в диапазоне длин волн 3.1–3.7 мкм [9]. Однако в фотонно-кристаллических СПС невозможно получение низких оптических потерь в спектральном диапазоне, достаточно широком для того, чтобы обеспечить ВКР-преобразование излучения из ближнего в средний ИК диапазон. Другим видом СПС являются полые световоды с оболочкой типа Кагоме (рис. 1, б). Такие световоды хорошо зарекомендовали себя при создании ВКР-лазеров в видимом и ближнем ИК диапазонах [4, 5, 16, 18, 23–25], где кварцевое стекло имеет малое поглощение. Теоретический анализ [26] показал, что волноводный режим в световодах типа Кагоме обеспечивается только первым слоем границы сердцевина–оболочка, в то время как остальные слои оболочки (необходимые для механического крепления этого первого слоя) служат источником дополнительных потерь. Таким образом, оболочка световодов типа Кагоме (рис. 1, б) имеет сложную многослойную структуру, приводящую к избыточному перекрытию поля оптического излучения с материалом оболочки. В результате кварцевые СПС с оболочкой типа Кагоме не оптимальны для создания эффективных ВКР-лазеров среднего ИК диапазона.

В ряде работ [6–8] были предложены новые конструкции СПС с упрощенной структурой оболочки (рис. 1, в–д). Необходимо особо отметить работу [6], в которой было впервые введено понятие отрицательной кривизны границы сердцевина–оболочка, показано ее влияние на снижение оптических потерь в СПС. Кроме того, в [6] была предложена конструкция так называемых револьверных световодов (рис. 1, в) и продемонстрировано пропускание излучения в спектральной области до ~ 4 мкм в кварцевых СПС такого типа. Похожие результаты были получены в световодах, оболочка которых состоит из элементов в форме «рожка мороженого» или «парашютиков» (рис. 1, з) [7]. Модификация револьверных СПС (рис. 1, д) позволила еще сильнее локализовать излучение в полый сердцевине и обеспечить пропускание в кварцевых СПС вплоть до длины волны ~ 8 мкм [8]. Таким образом, револьверные СПС с оболочкой, состоящей из одного слоя несприкасающихся капилляров, являются наиболее перспективными световодами для создания газовых волоконных ВКР-лазеров среднего ИК диапазона.

За последний год на основе кварцевых револьверных световодов нами были впервые продемонстрированы га-

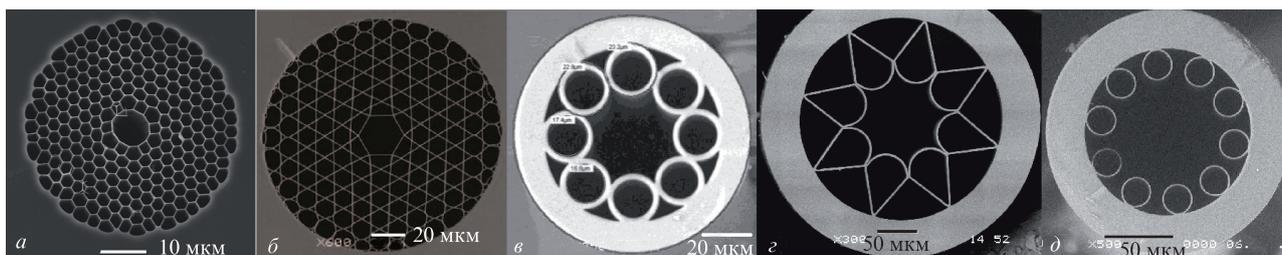


Рис. 1. Фотографии торцов световодов с полый сердцевинной, полученные с помощью электронного микроскопа, – световоды с многослойной оболочкой типа фотонный кристалл [20] (а) и типа Кагоме [21] (б), а также световоды упрощенной конструкции с отрицательной границей сердцевина–оболочка: револьверный световод с соприкасающимися капиллярами [6] (в), световод с элементами оболочки в виде «парашютиков» [7] (з) и револьверный световод с несприкасающимися капиллярами [22] (конструкция предложена в [8]) (д).

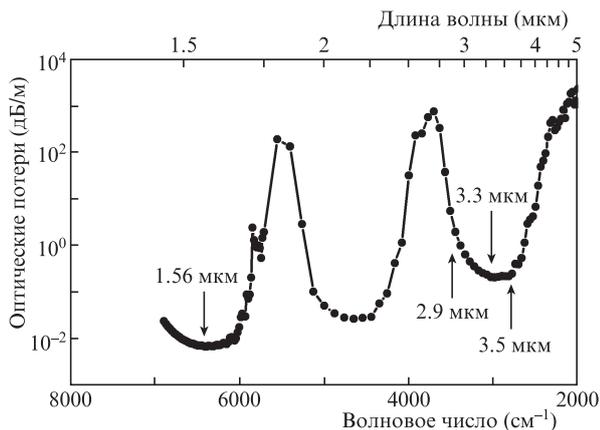


Рис.2. Спектр оптических потерь световода с полой сердцевинной, разработанного для создания ГВЛ в спектральном диапазоне 2.9–3.5 мкм [10, 22].

зовые волоконные ВКР-лазеры среднего ИК диапазона [10–12, 22, 27]. В качестве лазера накачки использовался импульсный наносекундный эрбиевый волоконный лазер с длиной волны генерации ~ 1.56 мкм. Длительность импульсов накачки составляла 3.5 нс, пиковая мощность до 34 кВт, средняя выходная мощность до 3 Вт. Ширина линии генерации, измеренная при пиковой мощности накачки ~ 20 кВт со спектральным разрешением 0.02 нм, составила 0.065 нм (9 ГГц). Хотя на данном этапе сопряжение лазера накачки с СПС осуществлялось с помощью линз, в перспективе возможна разработка полностью волоконной конструкции ВКР-лазера.

В работах [10, 22] использовался кварцевый револьверный световод, теоретический спектр пропускания которого показан на рис.2. Длина световода составляла 15 м, диаметр поля моды был равен 45 мкм. При заполнении полой сердцевинной молекулярным дейтерием D_2 (парциальное давление 28 атм) с примесью молекулярного легкого водорода 1H_2 (парциальное давление 2 атм) была получена ВКР-генерация на длинах волн 2.9, 3.3 и 3.5 мкм (рис.3). Пиковая мощность наиболее интенсивных спектральных компонент в среднем ИК диапазоне составила 0.25 кВт ($\lambda = 2.9$ мкм) и 0.37 кВт ($\lambda = 3.5$ мкм), что соот-

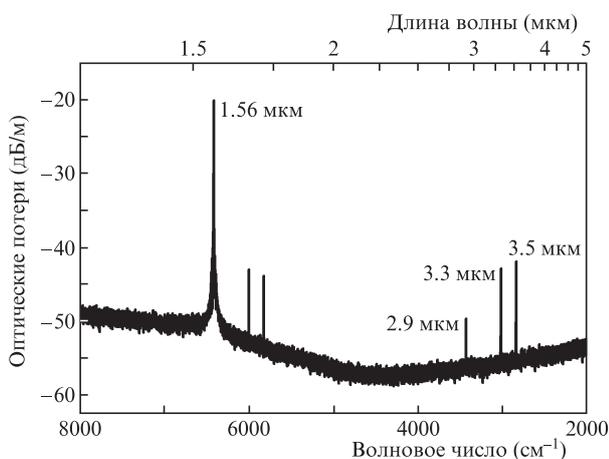


Рис.3. Спектр излучения, измеренный на выходе газового волоконного ВКР-лазера [22] с активной средой из смеси молекулярных дейтерия и легкого водорода при комнатной температуре и парциальных давлениях 28 и 2 атм соответственно; пиковая мощность накачки на длине волны 1.56 мкм составляла 14 кВт.

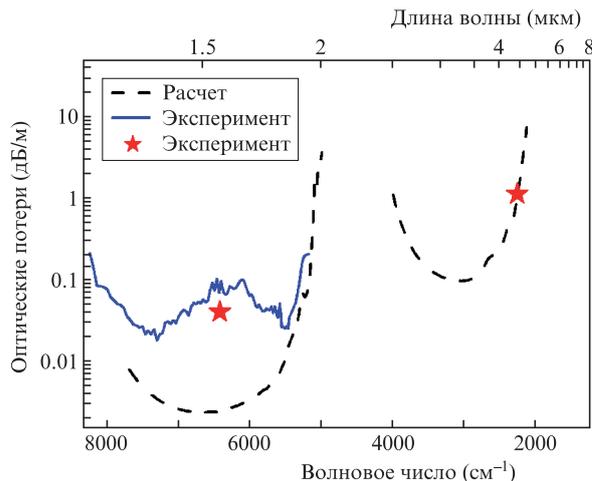


Рис.4. Расчетный спектр оптических потерь револьверного световода с полой сердцевинной (штриховые кривые) [12], спектр потерь, измеренный с помощью источника суперконтинуума в ближнем ИК диапазоне (сплошная кривая), а также значения оптических потерь, измеренные с помощью узкополосных лазерных источников на длинах волн 1.56 и 4.4 мкм [27] (звездочки).

ветствует средней мощности 23 и 37 мВт соответственно. Квантовая эффективность преобразования составила 10% (для $\lambda = 2.9$ мкм) и 6% (для $\lambda = 3.5$ мкм) и допускает дальнейшую оптимизацию. Отметим, что, подбирая парциальные давления газов 1H_2 и D_2 и регулируя мощность накачки, удавалось добиться преимущественной генерации на длине волны 2.9 либо 3.5 мкм.

В работах [11, 12, 27] использовался кварцевый револьверный световод, конструкция которого была модифицирована так, чтобы сместить спектр пропускания в область ~ 4 мкм (рис.4). Диаметр поля моды составлял 56 мкм. При заполнении полой сердцевинной молекулярным водородом 1H_2 при давлении 30 атм нами была впервые получена ВКР-генерация на длине волны 4.4 мкм (рис.5) [11, 12]. С помощью одномодового излучения созданного ВКР-лазера были измерены потери в револьверном световоде на этой длине волны. Они составили

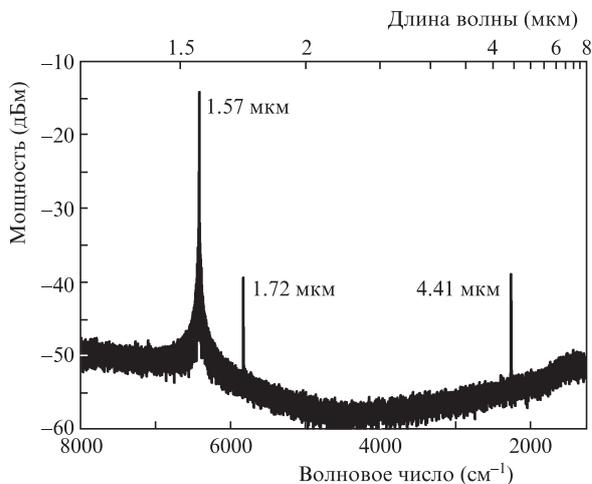


Рис.5. Спектр излучения на выходе СПС, заполненного легким водородом 1H_2 при комнатной температуре и давлении 30 атм. Введенная пиковая мощность накачки 18 кВт [11, 12]. Наряду с непоглощенной накачкой (1.57 мкм) видны вращательная (1.72 мкм) и колебательная (4.41 мкм) ВКР-компоненты.

1.13 дБ/м, что хорошо соответствует результатам численного моделирования (0.92 дБ/м) [27]. Для сравнения отметим, что материальное поглощение в кварцевом стекле на данной длине волны составляет ~ 4000 дБ/м. При использовании револьверного СПС длиной 15 м была получена ВКР-генерация с квантовой эффективностью $\sim 15\%$, а средняя мощность на длине волны 4.4 мкм составила 30 мВт [12].

Путем численного решения системы уравнений связанных волн для колебательного ВКР в молекулярном водороде $^1\text{H}_2$ было проведено теоретическое рассмотрение ВКР-генерации на длине волны 4.4 мкм. При этом были использованы измеренные значения оптических потерь 0.04 и 1.13 дБ/м на длинах волн 1.56 и 4.4 мкм соответственно (рис.4), а также значение коэффициента рамановского усиления $g_R = 0.43$ см/ГВт, вычисленное для преобразования длин волн $1.56 \rightarrow 4.4$ мкм на основе известных данных о ширине линии и сечении рассеяния колебательного перехода $Q(1)$ молекулы $^1\text{H}_2$ [28–30]. Оптимальная длина ВКР-лазера, полученная теоретически, составила ~ 3.5 м, что существенно меньше длины полого световода (15 м), использованной в эксперименте.

Одним из интересных результатов работы [27] является возможность сохранять стационарный режим ВКР при накачке газовых волоконных лазеров наносекундными импульсами. Известно [28], что если длительность импульса накачки τ_p и время поперечной релаксации оптических фононов T_2 удовлетворяют соотношению $\tau_p \leq 20T_2$, то ВКР-преобразование переходит в нестационарный режим, в котором коэффициент ВКР-усиления снижается. Для колебательного перехода $Q(1)$ в молекулярном водороде при комнатной температуре и давлении ~ 10 атм время поперечной релаксации $T_2 \approx 0.64$ нс, и, как следствие, импульсы накачки длительностью несколько наносекунд должны приводить к нестационарному режиму ВКР-генерации. Однако время T_2 можно легко контролировать, изменяя давление газа, т. к. с ростом давления возрастает частота столкновения молекул, что приводит к более частому сбою фазы молекулярных колебаний и, следовательно, к снижению T_2 . Указанный эффект наблюдался в [27] при изменении давления водорода в диапазоне 10–70 атм и позволил увеличить выходную мощность ВКР-лазера (рис.6), накачка которого осуществлялась импульсами длительностью 3.5 нс.

В результате оптимизации длины световода и давления водорода в полой сердцевине нам удалось продемонстрировать ВКР-генерацию наносекундных импульсов на длине волны 4.4 мкм со средней мощностью ~ 250 мВт и квантовой эффективностью 36%, при этом вращательные компоненты на длинах волн 1.72 и 1.91 мкм были существенно подавлены (рис.7) [27].

Обсуждая факторы, ограничившие эффективность ВКР-лазера на уровне $\sim 36\%$, необходимо отметить, что экспериментально полученная выходная мощность на длине волны 4.4 мкм практически соответствует результатам теоретического расчета, сделанного с учетом оптических потерь в световоде (рис.7). Этот факт означает, что эффективность ВКР-лазера на данном этапе ограничена уровнем оптических потерь (~ 1 дБ/м) на стоксовой длине волны. Однако из рис.4 видно, что меньший на порядок уровень потерь (0.1–0.2 дБ/м) достигается в спектральной области короче 4 мкм. В этой области спектра могут быть созданы более эффективные газовые ВКР-лазеры на основе уже существующих револьверных све-

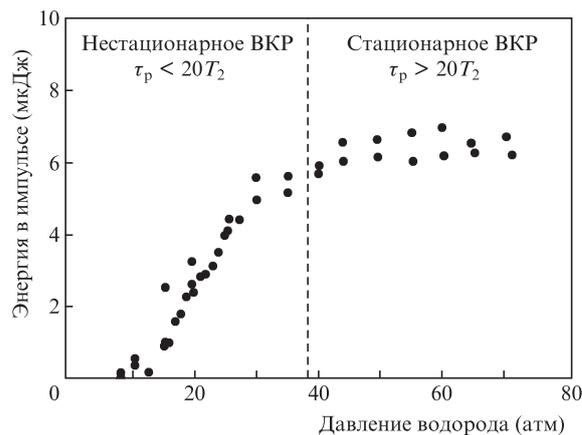


Рис.6. Экспериментально измеренная зависимость энергии импульса выходного излучения на длине волны 4.4 мкм от давления легкого водорода в полой сердцевине [27]. Длительность импульсов накачки $\tau_p = 3.5$ нс. Вертикальная штриховая линия соответствует давлению 38 атм, при котором время поперечной релаксации молекулярных колебаний водорода $T_2 = 0.175$ нс, что удовлетворяет соотношению $\tau_p = 20T_2$.

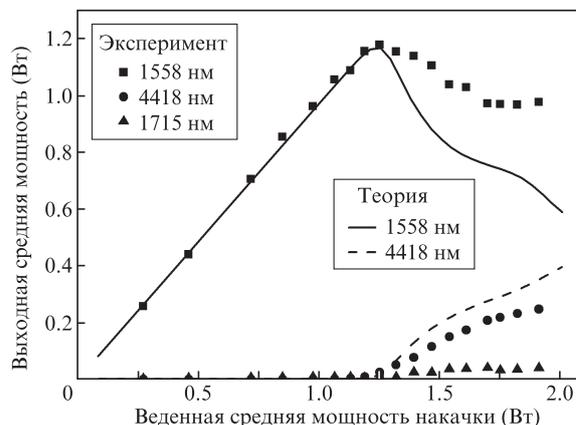


Рис.7. Расчетные (кривые) и экспериментальные (точки) зависимости выходной средней мощности спектральных компонент газового волоконного ВКР-лазера от введенной средней мощности накачки: сплошная кривая – результат численного моделирования ВКР для непоглощенной мощности накачки на $\lambda_p = 1.56$ мкм, штриховая кривая – для мощности стоксовой компоненты на $\lambda_s = 4.4$ мкм; измерения и расчеты проводились при оптимальных длине световода 3.2 м и давлении водорода 50 атм [27].

товодов из кварцевого стекла. Рост оптических потерь на длинах волн свыше 4 мкм обусловлен резким возрастанием материального поглощения (а также снижением показателя преломления) кварцевого стекла. Для уменьшения оптических потерь в этой области спектра требуются новые решения, способные еще более минимизировать перекрытие поля моды оптического излучения с кварцевой оболочкой. Отметим также, что применение лазеров накачки с более высокой пиковой мощностью может повысить эффективность газовых волоконных ВКР-лазеров среднего ИК диапазона, т. к. в этом случае влияние оптических потерь можно снизить, используя более короткие отрезки полых световодов.

Продемонстрированная на сегодняшний день пиковая мощность импульсных наносекундных газовых волоконных ВКР-лазеров, генерирующих в диапазоне 3–5 мкм, составляет ~ 2 кВт [27]. Эта величина ограничена не характеристиками револьверных СПС, а доступной мощ-

ностью твердотельного волоконного эрбиевого лазера накачки. В недавних работах [31, 32] были продемонстрированы газовые волоконные ВКР-лазеры с выходной пиковой мощностью 400 и 150 кВт на длинах волн 1.55 и 1.9 мкм соответственно. Применение таких лазеров в качестве источника накачки газонаполненных кварцевых СПС открывает путь к созданию эффективных газовых волоконных ВКР-лазеров, генерирующих наносекундные импульсы с пиковой мощностью ~ 100 кВт в спектральном диапазоне 3–5 мкм. Более того, такие лазеры среднего ИК диапазона могут быть реализованы за счет двухкаскадного ВКР в одном и том же отрезке револьверного световода, заполненного одним или несколькими газами.

Известно, что ВКР-преобразование из ближнего ($\lambda = 1.56$ мкм) в средний ИК диапазон ($\lambda = 3-5$ мкм) сопровождается большим квантовым дефектом, который может затруднять получение высокой средней мощности на стоковой длине волны. Однако в недавней работе [17], посвященной газовым волоконным лазерам на основе инверсии населенностей, была продемонстрирована эффективная генерация излучения на длине волны 3.1 мкм при накачке на $\lambda_p = 1.53$ мкм. Несмотря на большой квантовый дефект, сопоставимый с квантовым дефектом в ВКР-лазерах, была достигнута выходная мощность более 1 Вт в непрерывном режиме. Данный результат характеризует возможность генерации высокой средней мощности в среднем ИК диапазоне газовых волоконных лазеров, в том числе и ВКР-лазеров.

В заключение необходимо сказать, что световоды среднего ИК диапазона, для создания которых подходит широко распространенная и хорошо освоенная технология кварцевого стекла, открыли новые возможности для освоения среднего ИК диапазона. При этом простота конструкции и изготовления полых револьверных световодов позволяет многим научным группам участвовать в разработке таких световодов и лазеров на их основе. Достигнутые за последнее время результаты по лазерной генерации в спектральном диапазоне 3–5 мкм убедительно демонстрируют, что газовые волоконные ВКР-лазеры могут быть эффективными источниками лазерного излучения среднего ИК диапазона. При этом они имеют большой потенциал для наращивания средней и пиковой выходной мощности и, несомненно, найдут разнообразные применения в таких областях, как биомедицина, газоанализ и обработка материалов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты № 15-02-08840-А и 15-02-99688-А), а также при поддержке программы Президиума РАН I.25П «Фундаментальные и прикладные проблемы фотоники и физика новых оптических материалов».

- Walsh B.M., Lee H.R., Barnes N.P. *J. Luminescence*, **169**, 400 (2016).
- Wade L.G. Jr. *Organic Chemistry* (Pearson Prentice Hall Inc., 2006).
- Cregan R.F., Mangan B.J., Knight J.C., Birks T.A., Russell P.St.J., Roberts P.J., Allan D.C. *Science*, **285**, 1537 (1999).
- Benabid F., Knight J.C., Antonopoulos G., Russell P.St.J. *Science*, **298**, 399 (2002).
- Benabid F., Bouwmans G., Knight J.C., Russell P.St.J. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 123903 (2004).
- Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Kosolapov A.F., Plotnichenko V.G., Semjonov S.L., Dianov E.M. *Opt. Express*, **19**, 1441 (2011).
- Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Opt. Express*, **20**, 11153 (2012).
- Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. *Opt. Express*, **21**, 9514 (2013).
- Wheeler N.V., Heidt A.M., Baddela N.K., Fokoua E.N., Hayes J.R., Sandoghchi S.R., Poletti F., Petrovich M.N., Richardson D.J. *Opt. Lett.*, **39**, 295 (2014).
- 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).
- Gladyshev A.V., Kosolapov A.F., Khudyakov M., Yatsenko Y.P., Kolyadin A.N., Krylov A.A., Pryamikov A., Biriukov A.S., Likhachev M.E., Bufetov I.A., Dianov E.M. *Proc. CLEO-2017* (San Jose, 2017, paper JTh5A.7).
- Гладышев А.В., Косолапов А.Ф., Худяков М.М., Яценко Ю.П., Колядин А.Н., Крылов А.А., Прямиков А.Д., Бирюков А.С., Лихачев М.Е., Буфетов И.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **47**, 491 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 491 (2017)].
- Hassan M.R.A., Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Optica*, **3**, 218 (2016).
- Wang Z., Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 105807 (2014).
- 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)].
- Benoit A., Beaudou B., Debord B., G r me F., Benabid F. *Proc. SPIE*, **10088**, 100880H (2017).
- Xu M., Yu F., Knight J. *Opt. Lett.*, **42**, 4055 (2017).
- Couny F., Benabid F., Light P.S. *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 143903 (2007).
- Буфетов И.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **30**, 873 (2000) [*Quantum Electron.*, **30**, 873 (2000)].
- Humbert G., Knight J.C., Bouwmans G., Russell P.St.J. *Opt. Express*, **12**, 1477 (2004).
- Couny F., Benabid F., Light P.S. *Opt. Lett.*, **31**, 3574 (2006).
- Gladyshev A.V., Kosolapov A.F., Khudyakov M.M., Yatsenko Yu.P., Kolyadin A.N., Krylov A.A., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Likhachev M.E., Bufetov I.A., Dianov E.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **24** (2018) (submitted).
- Couny F., Benabid F., Roberts P.J., Light P.S., Raymer M.G. *Science*, **318**, 1118 (2007).
- Benoit A., Beaudou B., Alharbi M., Debord B., G r me F., Salin F., Benabid F. *Opt. Express*, **23**, 14002 (2015).
- Tani F., Belli F., Abdolvand A., Travers J.C., Russell P.St.J. *Opt. Lett.*, **40**, 1026 (2015).
- Fevrier S., Beaudou B., Viale P. *Opt. Express*, **18**, 5142 (2010).
- Astapovich M.S., Kolyadin A.N., Gladyshev A.V., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Khudyakov M.M., Likhachev M.E., Bufetov I.A. *Opt. Express* (submitted).
- Hanna D.C., Pointer D.J., Pratt D.J. *IEEE J. Quantum Electron.*, **22**, 332 (1986).
- Reintjes J.F., in *Handbook of Laser Science and Technology, Suppl. 2: Optical Materials* (Boca Raton: CRC Press, 1995, p. 334).
- Bischel W.K., Black G. *AIP Conf. Proc.*, **100**, 181 (1983).
- Chen Y., Wang Z., Gu B., Yu F., Lu Q. *Opt. Lett.*, **41**, 5118 (2016).
- Wang Z., Gu B., Chen Y., Li Z., Xi X. *Appl. Opt.*, **56**, 7657 (2017).