

## Рамановская генерация со средней мощностью более 1 Вт на длине волны 4.4 мкм в кварцевом револьверном световоде

М.С.Астапович, А.В.Гладышев, М.М.Худяков, А.Ф.Косолапов, М.Е.Лихачев, И.А.Буфетов

*Впервые создан одномодовый газовый волоконный рамановский лазер со средней мощностью 1.4 Вт на длине волны 4.42 мкм. Активной средой служил кварцевый револьверный световод с поллой сердцевиной, заполненной молекулярным водородом ( $^1\text{H}_2$ ). Благодаря использованию линейно поляризованного излучения накачки на длине волны 1.56 мкм и схеме рамановского лазера, позволяющей сохранять поляризацию излучения, достигнута квантовая эффективность 53% для однокаскадного преобразования 1.56 → 4.42 мкм. Разработанный волоконный рамановский лазер может найти применения в медицине, газоанализе и ряде других областей.*

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

Лазерные источники среднего ИК диапазона (с длиной волны  $\lambda \geq 3$  мкм) важны для многих научных и практических применений. Особый интерес представляет разработка лазеров, генерирующих одномодовое излучение со средней мощностью более 1 Вт в среднем ИК диапазоне [1]. Такое излучение может быть использовано как для накачки нелинейных кристаллов с целью получения перефокусируемой по длине волны параметрической генерации, так и для накачки халькогенидных световодов с целью генерации широкополосного суперконтинуума с высокой спектральной плотностью мощности ( $\sim 1$  мВт/нм).

В последние годы активно развивается техника генерации широкополосного излучения среднего ИК диапазона во флюоридных волоконных световодах [2]. Длина волны нулевой дисперсии в таких световодах лежит в спектральной области короче 2 мкм, что позволяет эффективно накачивать флюоридные световоды излучением хорошо освоенных тулиевых волоконных лазеров ( $\lambda \approx 2$  мкм). Такая удобная схема накачки позволила получить во флюоридных световодах генерацию суперконтинуума в спектральном диапазоне 1.9–4.5 мкм со средней мощностью более 1 Вт [3]. В принципе, спектральный диапазон источников суперконтинуума может быть расширен до  $\sim 7$  мкм, если использовать в качестве нелинейной среды сульфидные ( $\text{As}_2\text{S}_3$ ) световоды [4]. Однако практическая реализация этой идеи сталкивается со значительными трудностями, среди которых не последнюю роль играет отсутствие удобных источников накачки, излучающих в области длины волны нулевой дисперсии сульфидных световодов ( $\lambda \geq 4.5$  мкм) [5]. Таким образом, разработка лазеров накачки с большой средней мощностью и высоким качеством пучка в среднем ИК диапазоне является

актуальной для дальнейшего освоения среднего ИК диапазона.

На сегодняшний день существуют несколько схем накачки для генерации суперконтинуума в сульфидных световодах. В одной из таких схем используются параметрические источники излучения, способные генерировать в области длины волны нулевой дисперсии  $\text{As}_2\text{S}_3$ -световодах [6, 7]. Однако параметрические источники излучения имеют сложную конструкцию, требующую юстировок и зачастую не обеспечивающую одномодовость излучения. В другом варианте схемы накачки применяются волоконные лазеры ближнего ИК диапазона, которые обеспечивают высокое качество пучка, но генерируют на длинах волн менее 2 мкм. В таком случае накачка сульфидных световодов осуществляется в области нормальной дисперсии [8, 9].

При использовании этой схемы накачки в пикосекундном режиме развитие суперконтинуума может быть инициировано эффектом фазовой самомодуляции. Плодотворность такого подхода была продемонстрирована, например, в работе [8], где была реализована генерация суперконтинуума в спектральной области 1.9–4.8 мкм со средней мощностью 565 мВт. Если же упомянутая схема накачки применяется в наносекундном режиме, то генерация суперконтинуума может быть инициирована эффектом вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР). При этом длина волны генерации каскадно сдвигается в область аномальной дисперсии световода, в которой модуляционная неустойчивость инициирует разбиение наносекундного импульса во времени и дальнейшее уширение спектра. На сегодняшний день при накачке сульфидных световодов наносекундными импульсами волоконных лазеров на длинах волн  $\sim 1.55$  и  $\sim 2$  мкм наблюдалось от трех до восьми каскадов ВКР-преобразования [5, 10, 11]. Однако наибольшая длина волны, достигнутая таким способом, составляла всего 2.7 мкм [11], что обусловлено малым стоковым сдвигом в сульфидных световодах ( $340 \text{ см}^{-1}$ ).

Альтернативным подходом к созданию лазерных источников в среднем ИК диапазоне является применение газовых волоконных ВКР-лазеров [12, 13], принцип рабо-

М.С.Астапович, А.В.Гладышев, М.М.Худяков, А.Ф.Косолапов, 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 9 октября 2018 г., после доработки – 19 октября 2018 г.

ты которых основан на использовании больших стоковых сдвигов колебательных переходов легких молекулярных газов, заполняющих полую сердцевину световода.

Световоды с поллой сердцевиной (СПС) могут обеспечивать малые оптические потери в среднем ИК диапазоне даже в том случае, когда оболочка СПС сделана из кварцевого стекла. Недавно, используя кварцевый СПС револьверного типа, заполненный молекулярным водородом (стоксов сдвиг  $4155 \text{ см}^{-1}$ ), мы впервые продемонстрировали однокаскадное ВКР-преобразование  $1.56 \rightarrow 4.42 \text{ мкм}$  [14]. Средняя мощность на длине волны 4.42 мкм составила 30 мВт. Позднее, за счет оптимизации длины револьверного световода и давления водорода в поллой сердцевины, удалось реализовать ВКР-лазер с квантовой эффективностью 36% и средней выходной мощностью 250 мВт на длине волны 4.42 мкм. Однако для генерации суперконтинуума со спектральной плотностью мощности  $\sim 1 \text{ мВт/нм}$  необходимы источники накачки со средней мощностью более 1 Вт. Способность газовых волоконных ВКР-лазеров генерировать в среднем ИК диапазоне излучение с такой средней мощностью требует экспериментального подтверждения, поскольку преобразование  $1.56 \rightarrow 4.42 \text{ мкм}$  обладает большим квантовым дефектом, из-за которого 65% энергии накачки преобразуется в тепло.

В настоящей работе представлен впервые созданный одномодовый газовый волоконный ВКР-лазер со средней мощностью 1.4 Вт на длине волны 4.42 мкм. Оптимизация параметров эрбиевого волоконного лазера накачки ( $\lambda = 1.56 \text{ мкм}$ ) позволила нам повысить квантовую эффективность ВКР-лазера ( $\lambda = 4.42 \text{ мкм}$ ), надежно подавить нежелательную стоковую компоненту на длине волны 1.72 мкм и существенно увеличить среднюю выходную мощность на длине волны 4.42 мкм.

Газовый волоконный рамановский лазер был выполнен по однопроходной схеме (рис. 1). Источником накачки служил эрбиевый волоконный лазер, генерирующий на длине волны 1.56 мкм. Активной рамановской средой служил заполненный молекулярным водородом револьверный СПС, аналогичный световоду, применявшемуся в работах [14, 15].

Поперечное сечение световода показано на вставке рис. 2. Диаметр поллой сердцевины составлял 75 мкм, что соответствует диаметру поля моды  $d = 55 \text{ мкм}$ , рассчитанному для основной моды световода. Оболочка световода образована десятью несоприкасающимися капиллярами из кварцевого стекла марки F300. Толщина стенки капилляра составляла 1.15 мкм. Положение спектральных зон прозрачности световода, полученное путем численного моделирования в среде COMSOL, показано штриховой кривой на рис. 2. Расчетные значения оптических потерь для основной моды на стоковой длине волны (4.42 мкм) и на длине волны накачки (1.56 мкм) равны 0.92 и 0.0025 дБ/м соответственно. Спектр оптических потерь в области до 2 мкм измерялся с помощью источника суперконтинуума (Fianium). Для определения оптических потерь на длине волны 4.4 мкм в качестве источника излучения использовался ранее разработанный рамановский волоконный лазер [14]. Измеренные оптические потери составили 1.1 дБ/м на длине волны 4.42 мкм и 0.03 дБ/м на длине волны 1.56 мкм, что хорошо соответствует результатам теоретического расчета (рис. 2). Отрезок револьверного световода длиной 3.2 м заполнялся молекулярным водородом ( $^1\text{H}_2$ ) под давлением 50 атм. Указанные оптимальные значения длины и давления были найдены экспери-

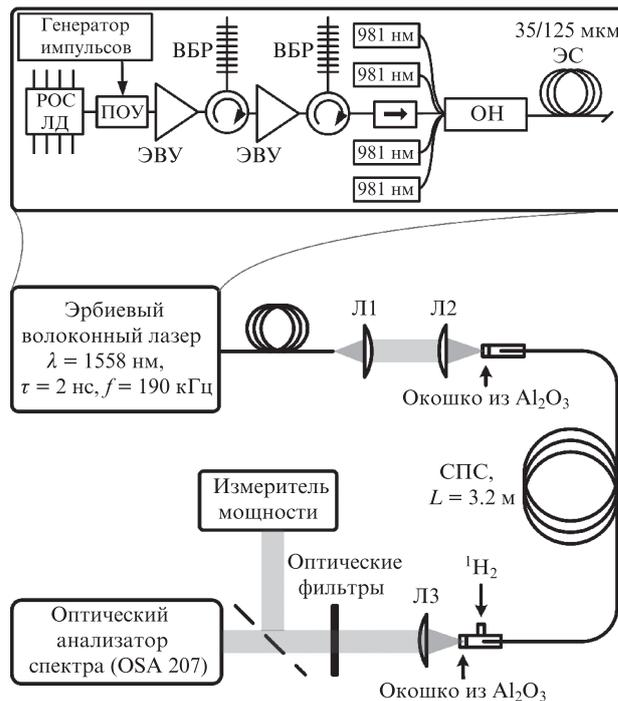


Рис. 1. Оптическая схема газового волоконного ВКР-лазера: РОС ЛД – полупроводниковый лазер с распределенной обратной связью; ПОУ – полупроводниковый оптический усилитель; ЭВУ – эрбиевый волоконный усилитель; ВБР – волоконная брэгговская решетка; ОН – объединитель накачек; ЭС – эрбиевый световод; Л1 и Л2 – линзы из плавяного кварца; СПС – световод с поллой сердцевиной; Л3 – коллимирующая линза из ZnSe.

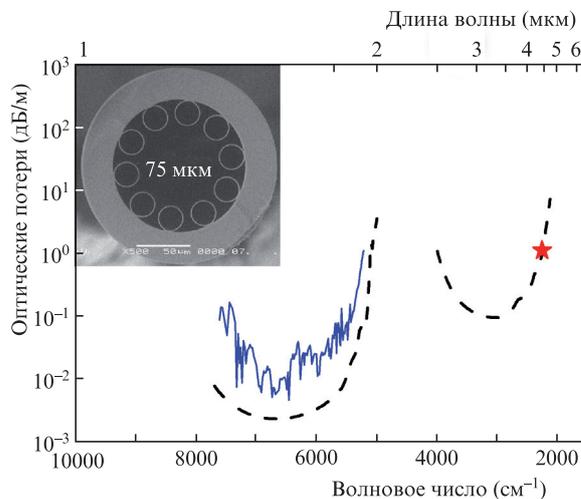


Рис. 2. Рассчитанный спектр оптических потерь револьверного световода с поллой сердцевиной (штриховая кривая) и спектр потерь, измеренный с помощью источника суперконтинуума в ближнем ИК диапазоне (сплошная кривая). Звездочка – оптические потери, измеренные с помощью узкополосного лазера на  $\lambda = 4.4 \text{ мкм}$ . На вставке – изображение поперечного сечения световода, полученное на электронном микроскопе.

ментально в наших предыдущих работах и позволили повысить среднюю выходную мощность на длине волны 4.42 мкм с 30 до 250 мВт [14, 15].

С целью дальнейшей оптимизации характеристик газового волоконного рамановского лазера мы внесли изменения в конструкцию волоконного лазера накачки на длине волны 1.56 мкм (см. рис. 1). К наиболее важным из-

менениям относятся: использование световодов, сохраняющих поляризацию излучения, что способствует повышению квантовой эффективности рамановского преобразования; замена диодов накачки с длиной волны 976 нм в выходном каскаде усиления эрбиевого лазера диодами с длиной волны 981 нм, которая лучше соответствует положению пика поглощения ионов  $\text{Er}^{3+}$  в кварцевом стекле; увеличение мощности диодов накачки с 54 до 108 Вт. Следует отметить, что эффективность эрбиевого волоконного лазера составляла всего  $\sim 10\%$ , что ограничивало среднюю выходную мощность на длине волны 1.56 мкм на уровне  $\sim 11$  Вт. Повышение эффективности эрбиевого лазера не было целью настоящей работы, направленной на оптимизацию рамановского преобразования 1.56  $\rightarrow$  4.42 мкм.

Эрбиевый волоконный лазер, который служил источником накачки рамановского лазера, был собран по схеме задающий генератор–усилитель мощности (см. рис.1). В качестве задающего генератора использовался полупроводниковый лазерный диод с распределенной обратной связью (РОС ЛД), имеющий узкую линию генерации ( $\sim 2$  МГц) на длине волны 1558 нм. Непрерывное излучение с волоконного выхода задающего генератора пропускалось через полупроводниковый оптический усилитель (ПОУ), в котором происходило формирование оптических импульсов за счет амплитудной модуляции излучения. Длительность и частота следования оптических импульсов задавались с помощью генератора электрических импульсов (рис.1). Затем оптические импульсы усиливались в двух каскадах одномодовых эрбиевых волоконных усилителей (ЭВУ), накачиваемых в сердцевину. Для подавления усиленного спонтанного излучения после каждого каскада усиления применялись узкополосные фильтры, состоящие из циркулятора и волоконной брэгговской решетки (ВБР) с узким спектром отражения. Последний каскад усиления (усилитель мощности) был собран на основе эрбиевого световода с большим полем моды, аналогичного световоду, применявшемуся в работе [16]. Накачка осуществлялась в оболочку активного световода. Для подавления обратного отражения излучения в сердцевину активного световода выходной торец эрбиевого волоконного лазера был сколот под углом  $\sim 10^\circ$ .

Необходимо отметить, что использованная схема эрбиевого волоконного лазера позволяла поддерживать линейную поляризацию выходного излучения. Первые два каскада усиления были собраны на основе световодов, сохраняющих поляризацию, а в изначально изотропном световоде третьего каскада двулучепреломление создавалось за счет укладки световода витками радиусом 15 см, лежащими в горизонтальной плоскости. В точке сварки между вторым и третьим каскадами усиления состояние поляризации излучения устанавливалось линейным и вертикальным. В результате эрбиевый волоконный лазер надежно и без дополнительных настроек обеспечивал линейную (вертикальную) поляризацию выходного излучения на длине волны 1.56 мкм.

Длительность оптических импульсов накачки составляла 2 нс при частоте их следования 190 кГц. Средняя выходная мощность эрбиевого лазера достигала 10.7 Вт, что соответствует пиковой мощности 28 кВт. Ширина линии генерации лазера накачки была меньше разрешающей способности (0.02 нм) оптического анализатора спектра AQ6317B.

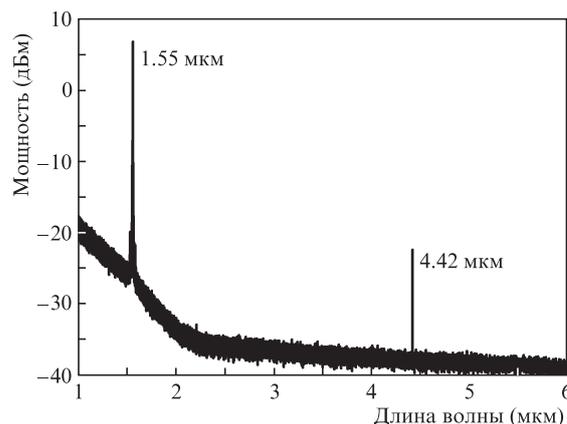


Рис.3. Характерный спектр выходного излучения газового волоконного ВКР-лазера.

Излучение эрбиевого волоконного лазера вводилось в СПС с помощью плосковыпуклых линз Л1 и Л2, при этом эффективность ввода составляла 70% с учетом оптического пропускания всех оптических элементов на входе в световод. Концы СПС были герметично вклеены в миниатюрные газовые ячейки, которые имели сапфировые окошки для ввода/вывода излучения. Излучение с выходного торца полого световода коллимировалось линзой на ZnSe, затем пропускалось через оптические фильтры и подавалось на оптический анализатор спектра OSA207 (Thorlabs) или измеритель мощности 3A-P-SH-V1 (Ophir).

Характерный спектр выходного излучения газового волоконного ВКР-лазера представлен на рис.3. Наблюдаются только две спектральные компоненты, соответствующие непоглощенному излучению накачки (1.56 мкм) и стоксовой волне (4.42 мкм), обусловленной ВКР на колебательном переходе молекул водорода. Видно, что вращательные стоксовы компоненты, ранее наблюдавшиеся на длинах волн 1.72 и 1.91 мкм [14], полностью подавлены. Ширина линии генерации на длине волны 4.42 мкм не превышала  $0.25 \text{ см}^{-1}$ , что соответствует разрешающей способности оптического анализатора спектра OSA207.

Зависимость средней выходной мощности газового волоконного ВКР-лазера от введенной средней мощности накачки представлена на рис.4. Видно, что при введенной мощности накачки 10.7 Вт максимальная средняя

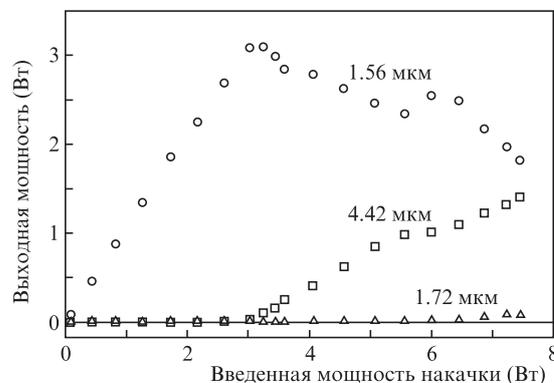


Рис.4. Зависимости средней мощности излучения на выходе волоконного ВКР-лазера от средней мощности накачки, введенной в револьверный световод, измеренные на длине волны накачки (1.56 мкм) и на стоксовой волне колебательного (4.42 мкм) и вращательного (1.72 мкм) ВКР.

мощность на длине волны 4.42 мкм составляет 1.4 Вт, что в 5.6 раз превышает опубликованные в [15] данные. И хотя солидная доля мощности накачки (2.6 Вт) переходит в тепло только из-за большого квантового дефекта преобразования  $1.56 \rightarrow 4.42$  мкм, ВКР-лазер надежно работал в течение нескольких часов, не проявляя признаков перегрева или деградации выходной мощности.

Распределение интенсивности излучения в поперечном сечении пучка на длине волны 4.42 мкм (рис.5) было

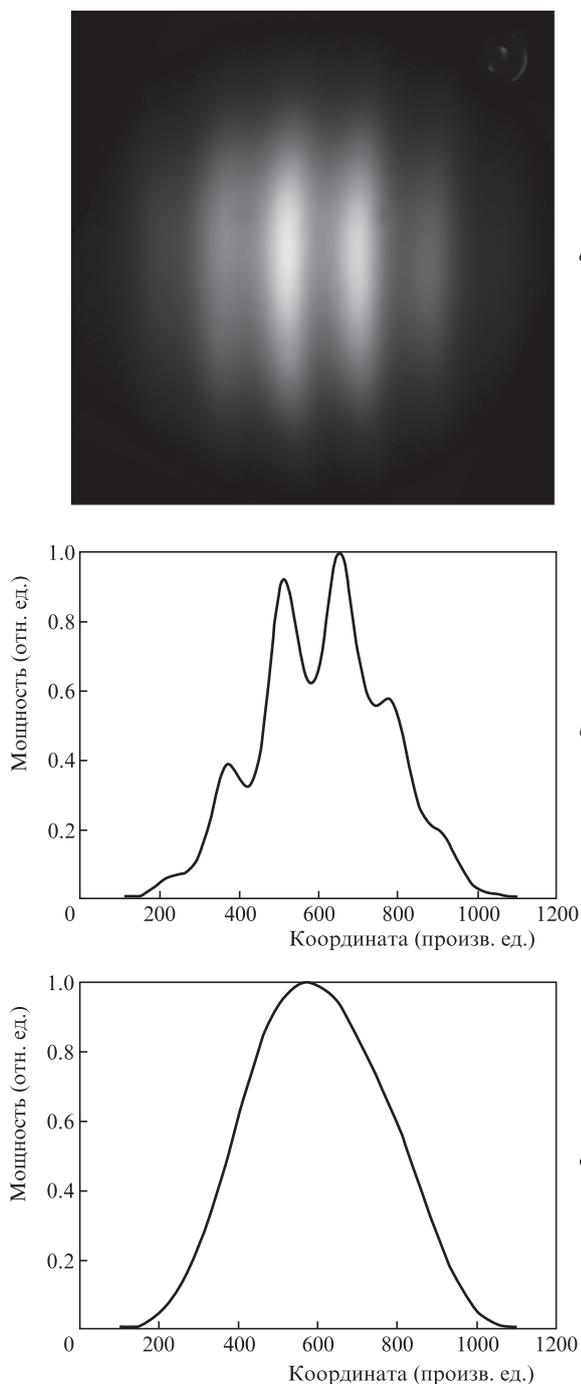


Рис.5. Распределение интенсивности в выходном пучке газового волоконного ВКР-лазера на длине волны 4.42 мкм (осцилляции интенсивности обусловлены интерференцией на непросветленном входном окошке ИК камеры) (а), а также распределения интенсивности в выходном пучке в направлении, поперечном интерференционным полосам (б), и в направлении вдоль наиболее интенсивной интерференционной полосы (в).

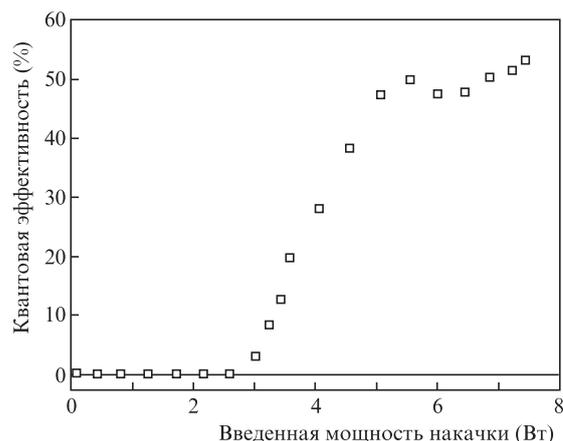


Рис.6. Зависимость квантовой эффективности ВКР-преобразования  $1.56 \rightarrow 4.42$  мкм от введенной средней мощности накачки.

измерено с помощью ИК камеры Ругосам IV (Ophir) с непросветленным входным окошком. Представленное распределение указывает на то, что ВКР-лазер генерирует на длине волны 4.42 мкм практически одномодовое излучение, соответствующее основной поперечной моде револьверного световода (на распределение интенсивности моды наложена интерференционная картина, возникающая из-за отражений на входном окне ИК камеры). Измерение угловой расходимости выходного излучения на  $\lambda = 4.42$  мкм позволило оценить значение параметра качества пучка:  $M^2 = 1.4$ .

Квантовая эффективность преобразования  $1.56 \rightarrow 4.42$  мкм составила 53% (рис.6). Превышение квантовой эффективностью опубликованного в [15] значения (36%) было достигнуто за счет использования линейно поляризованного излучения накачки (1.56 мкм) и реализации сохраняющей поляризацию схемы ВКР-лазера.

Известно, что состояние поляризации накачки может оказывать существенное влияние на эффективность ВКР-усиления [17]. Максимальное усиление возможно в том случае, когда для стоксовой волны и волны накачки соотношения и ориентации главных осей поляризаций (в общем случае эллиптических) одинаковы. Однако при использовании световодов, обладающих двулучепреломлением, эллиптичность и ориентация осей эллипса поляризации для волны накачки и стоксовой волны изменяются вдоль световода по-разному, поскольку длины волн этих спектральных компонент существенно различны. Таким образом, эффективное ВКР-усиление в двулучепреломляющих световодах при произвольной поляризации накачки может быть занижено. Чтобы избежать этого, необходимо использовать линейно поляризованное излучение накачки, плоскость поляризации которого совпадает с быстрой или медленной осью активного световода [17].

При использовании СПС двулучепреломление возникает вследствие изгиба световода. Как было показано в работе [18], СПС револьверного типа, намотанный без натяжения витками радиусом 15 см, обладает двулучепреломлением  $\sim 10^{-7}$ . Тем не менее такого двулучепреломления оказывается достаточно для существенного изменения состояния поляризации излучения в полых световодах длиной  $\sim 2$  м [18].

В настоящей работе мы используем револьверный СПС, уложенный витками радиусом 15 см. Витки уложены в горизонтальной плоскости и фиксируют главные

оси СПС в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Для достижения максимального эффективного значения ВКР-усиления излучение накачки ( $\lambda = 1.56$  мкм) на входе в полый световод имело линейную поляризацию, ориентированную вертикально и, таким образом, совпадающую с одной из главных осей полого световода.

Дополнительное преимущество линейно поляризованного излучения накачки для колебательного ВКР в газах заключается в подавлении конкурирующего процесса вращательного ВКР [19, 20]. В случае молекулярного водорода колебательное ВКР обеспечивает преобразование  $1.56 \rightarrow 4.42$  мкм (стоксов сдвиг  $4155 \text{ см}^{-1}$ ), тогда как вращательное ВКР приводит к генерации нежелательной спектральной компоненты на длине волны  $1.72$  мкм (стоксов сдвиг  $587 \text{ см}^{-1}$ ) [12, 14]. Для достижения максимальной квантовой эффективности колебательного ВКР необходимо, чтобы линейная поляризация накачки сохранялась на протяжении всей длины активного световода. В настоящей работе, благодаря линейной поляризации излучения накачки и поддерживающей поляризацию схеме ВКР-лазера, нежелательная спектральная компонента  $1.72$  мкм была надежно подавлена (рис.3 и 4).

Таким образом, мы впервые продемонстрировали газовый волоконный ВКР-лазер, генерирующий на длине волны  $4.42$  мкм одномодовое излучение со средней мощностью более  $1$  Вт. Благодаря применению схемы ВКР-лазера, обеспечивающей сохранение линейной поляризации излучения, нам удалось получить ВКР-генерацию со средней мощностью  $1.4$  Вт и квантовой эффективностью  $53\%$ , что превышает ранее опубликованные результаты в  $5.6$  и  $1.5$  раз соответственно. Лазерные источники такого типа могут быть использованы для накачки различных нелинейных кристаллов и волоконных световодов с целью получения перестраиваемых или широкополосных

источников излучения среднего ИК диапазона, которые востребованы для многочисленных применений в биомедицине, газоанализе и других областях.

Исследование поддержано Российским научным фондом (проект № 16-19-10513).

1. Swiderski J. *Progr. Quantum Electron.*, **38**, 189 (2014).
2. Gauthier J.-C., Robichaud L.-R., Fortin V., Vallee R., Bernier M. *Appl. Phys. B*, **124**, 122 (2018).
3. Kulkarni O.P., Alexander V.V., Kumar M., Freeman M.J., Islam M.N., Terry F.L., Neelakandan Jr. M., Chan A. *J. Opt. Soc. Am. B*, **28**, 2486 (2011).
4. Wang Y., Dai S., Li G., Xu D., You C., Han X., Zhang P., Wang X., Xu P. *Opt. Lett.*, **42**, 3458 (2017).
5. Kulkarni O.P. et al. *Opt. Express*, **14**, 7924 (2006).
6. Hudson D.D., Baudisch M., Werdehausen D., Eggleton B.J., Biegert J. *Opt. Lett.*, **39**, 5752 (2014).
7. Kedenburg S., Steinle T., Mörz F., Steinmann A., Giessen H. *Opt. Lett.*, **40**, 2668 (2015).
8. Gattass R.R. et al. *Opt. Fiber Technol.*, **18**, 345 (2012).
9. Yao J. et al. *Opt. Express*, **24**, 14717 (2016).
10. White R.T., Monro T.M. *Opt. Lett.*, **36**, 2351 (2011).
11. Cheng T. et al. *Opt. Express*, **26**, 12007 (2018).
12. Гладышев А.В. и др. *Квантовая электроника*, **47**, 1078 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 1078 (2017)].
13. Bufetov I.A. et al. *Fibers*, **6**, 39 (2018). DOI: 10.3390/fib6020039.
14. Гладышев А.В. и др. *Квантовая электроника*, **47**, 491 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 491 (2017)].
15. Gladyshev A.V. et al., in *Proc. Optical Fiber Communication Conf.* (San-Diego, CA, USA, March, 2018, Paper M2J.7).
16. Kotov L., Likhachev M., Bubnov M., Medvedkov O., Lipatov D., Guryanov A., Zaytsev K., Jossent M., Février S. *Opt. Lett.*, **40**, 1189 (2015).
17. Stolen R.H. *IEEE J. Quantum Electron.*, **15**, 1157 (1979).
18. Gladyshev A.V. et al. *Laser Phys.*, **27**, 025101 (2017).
19. Венкин Г.В., Ильинский Ю.А., Михеев Г.М. *Квантовая электроника*, **12**, 608 (1985) [*Sov. J. Quantum Electron.*, **15**, 395 (1985)].
20. Flusberg A., Holmes R. *Phys. Rev. Lett.*, **58**, 2039 (1987).