

Эффективная ВКР-генерация излучения с длиной волны 1.9 мкм в полой волоконной световоде с водородом

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

Впервые получена эффективная ВКР-генерация в заполненном молекулярным водородом волоконной световоде с полой сердцевиной и отражающей оболочкой, состоящей из одного слоя капилляров. В качестве источника излучения накачки использовался импульсно-периодический Nd:YAG-лазер с длительностью импульса 125 нс. Преобразование осуществлялось в однопроходной (безрезонаторной) схеме. Максимальная средняя мощность излучения на длине волны 1.9 мкм на выходе преобразователя составила 300 мВт при максимальной для подобных экспериментов дифференциальной квантовой эффективности 87%.

Ключевые слова: рамановские лазеры, полые волоконные световоды, волоконные лазеры.

1. Введение

Рамановские лазеры (или ВКР-лазеры) являются в настоящее время одними из эффективных устройств для преобразования частоты излучения. Квантовая эффективность как волоконных [1], так и твердотельных [2] ВКР-лазеров достигает десятков процентов и в ряде случаев приближается к единице. Но если сдвиги частоты излучения Ω в твердых телах составляют обычно $\sim 100^{-1}$ см, то ВКР-лазер на самом легком газе – водороде – обеспечивает сдвиг частоты $\Omega = 4155$ см $^{-1}$ за счет вынужденного рассеяния на колебательном переходе молекулы [3]. В экспериментах с кюветами, заполненными водородом, показано, что одно- или двухкаскадные ВКР-лазеры на водороде позволяют получать с высокой эффективностью длинноволновое излучение в диапазонах 1.87–1.9 мкм и 8–9 мкм [4], а также в областях 16 мкм [5] и даже 30 мкм [6]. Однако при обычной фокусировке излучения накачки в кювету с газом с помощью линз для достижения пороговых условий ВКР-генерации необходимые мощности излучения в указанных выше работах составляли порядка мегаватт и более. Использование световедущих структур позволяет значительно увеличить длину взаимодействия излучения накачки с рамановской активной средой, что приводит к значительному снижению пороговых значений интенсивности и мощности излучения. Уже первые эксперименты по созданию ВКР-лазеров на волоконных световодах из кварцевого стекла [7, 8] продемонстрировали возможность получения генерации при мощностях накачки менее 100 Вт. А использование волоконных свето-

водов на основе кварцевого стекла с оптическими потерями, близкими к предельно малым, и волоконных брэгговских решеток показателя преломления в качестве зеркала позволило создавать эффективные многокаскадные волоконные ВКР-лазеры [9].

Рамановский сдвиг частоты в волоконных световодах на основе кварцевого стекла не превышает 1330 см $^{-1}$ (рамановское усиление при таком сдвиге частоты наблюдается в фосфоросиликатных волоконных световодах [10]). Эта величина гораздо меньше, чем у ВКР-лазера на водороде, а увеличение числа каскадов преобразования для компенсации малого сдвига приводит к снижению КПД ВКР-лазера [11] даже без учета роста оптических потерь в световоде при значительном смещении по длине волны в ИК область (см., напр., [12]). Создание волоконных световодов с полой сердцевиной (СПС) со сравнительно низкими потерями [13] открыло дорогу газовым волоконным лазерам, в том числе и рамановским. В частности, при заполнении полого световода водородом были созданы импульсные волоконные ВКР-лазеры с высоким КПД на колебательных и вращательных переходах молекулы водорода [14–16]. Также был реализован непрерывный волоконный ВКР-лазер на вращательном переходе молекулы ортоводорода с частотным сдвигом $\omega = 587$ см $^{-1}$ (преобразование излучения накачки с длиной волны $\lambda_p = 1064$ нм в стоксово излучение с $\lambda_s = 1135$ нм) [17]. И совсем недавно впервые было продемонстрировано эффективное (квантовая эффективность 48%) ВКР-преобразование длин волн $\lambda_p = 1.06$ мкм \rightarrow $\lambda_s = 1.9$ мкм в полой световоде, заполненном водородом [18]. Существенно, что ВКР-лазер в [18] работал в импульсном (длительность импульса $\tau = 0.7$ нс) нестационарном (по отношению к фазовой релаксации) режиме, что препятствует достижению максимально возможного коэффициента рамановского усиления.

Для водородных волоконных ВКР-лазеров использовались световоды с различной структурой оболочки. Сначала это были фотонно-кристаллические волоконные световоды (ФКС) типа Kagome [14] (рис. 1, а), затем – ФКС с гексагональной структурой отражающей оболочки [16] (рис. 1, б). В ходе поиска структуры оболочки световодов с полой сердцевиной, обладающих наименьшими оптиче-

А.В.Гладышев, А.Н.Колядин, А.Ф.Косолапов, Ю.П.Яценко, А.Д.Пряников, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

А.С.Бирюков, И.А.Буфетов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141707 Долгопрудный, Институтский пер., 9; e-mail: iabuf@fo.gpi.ru

Поступила в редакцию 15 июня 2015 г., после доработки – 17 июля 2015 г.

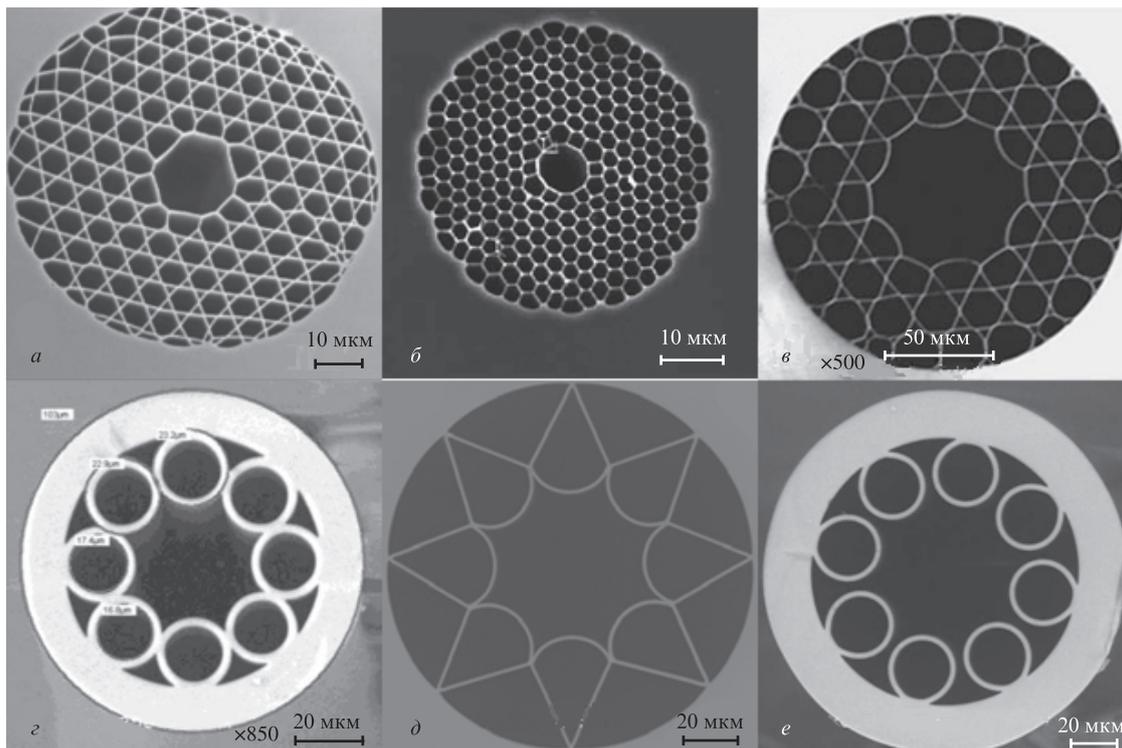


Рис.1. Изображения поперечных сечений волоконных световодов различных типов с полой сердцевиной, полученные с помощью электронного микроскопа: ФКС типа Kagome [14] (а), ФКС с гексагональной структурой оболочки [16] (б), ФКС типа Kagome с границей сердцевины–оболочки в форме гипоциклоиды [20] (в), револьверный СПС с соприкасающимися капиллярами [21] (г), СПС с оболочкой из элементов в форме парашюта [22] (д) и револьверный СПС с отдельными капиллярами (настоящая работа, впервые рассмотрен в [24]) (е).

скими потерями, были предложены световоды с границей сердцевины–оболочка в форме гипоциклоиды [19, 20] (рис.1,в), затем – световоды с простой структурой, оболочка которых состоит из одного слоя капилляров (авторы назвали их световодами с отрицательной кривизной границы сердцевины–оболочка) [21] (рис.1,г). В дальнейшем так стали называть как световоды с сердцевиной в форме гипоциклоиды, так и позднее разработанные световоды, оболочка которых состоит из элементов, похожих на стилизованное изображение парашюта [22] (рис.1,д). Но световоды типа предложенных в [21] (рис.1,г) существенно отличаются от других световодов с отрицательной кривизной границы сердцевины–оболочка тем, что, во-первых, элементы оболочки обладают цилиндрической симметрией (точнее, форма поперечного сечения элементов близка к круговой или эллиптической [23]) и, во-вторых, их можно размещать вокруг сердцевины без соприкосновения друг с другом, что позволяет улучшить характеристики световода [24, 25] (рис.1,е). Поэтому для световодов типа представленных на рис.1г, е целесообразно использовать специальное обозначение. Поскольку их поперечное сечение похоже на барабан револьвера, то в дальнейшем мы будем говорить о них как о револьверных СПС.

В нашей работе впервые создан эффективный ВКР-источник ИК излучения с $\lambda_S = 1.9$ мкм на основе револьверного СПС с сердцевиной, заполненной водородом. В отличие от работы [18], здесь используется стационарный режим ВКР-преобразования излучения за счет сравнительно длинных импульсов излучения накачки ($\tau = 125$ нс). Исследованы спектральные и временные характеристики ВКР-лазера и измерена зависимость порога ВКР от давления молекулярного водорода в СПС.

2. Экспериментальная установка

Поперечное сечение револьверного СПС, разработанного для настоящей работы, представлено на рис.1,е. Внешний диаметр световода составляет 155 мкм. Его конструкция была выполнена из чистого кварцевого стекла F-300 (Heraeus). Воздушная сердцевина револьверного СПС сформирована восемью капиллярами с толщиной стенки 2.35 мкм и внешним диаметром 28.7 мкм. Диаметр воздушной сердцевины был равен 57 мкм, а диаметр поля моды, рассчитанный для основной моды световода на длине волны накачки, составлял 40.4 мкм. Полученный в результате численного моделирования спектр оптических потерь этого световода представляет собой ряд зон пропускания, отделенных друг от друга полосами высоких потерь (рис.2, кривая 1). Важно, что длины волн накачки ($\lambda_p = 1.064$ мкм) и первой стоксовой компоненты ($\lambda_S = 1.907$ мкм) расположены в области минимумов оптических потерь соответствующих зон пропускания. Отметим также, что длины волн ряда антистоксовых компонент также находятся в области низких оптических потерь (рис.2).

Экспериментально измеренные потери в револьверном СПС в диапазоне длин волн 1–2 мкм также показаны на рис.2 (кривые 2). Спектральные положения зон пропускания, полученных расчетным и экспериментальным методами, хорошо согласуются, однако абсолютные значения измеренных оптических потерь существенно превышают расчетные. Указанное расхождение обусловлено, по-видимому, двумя факторами: отклонениями реальной структуры световода от идеальных параметров (используемых при расчетах) и неточностью измерения оптических потерь основной моды в СПС в результате неконтролируе-

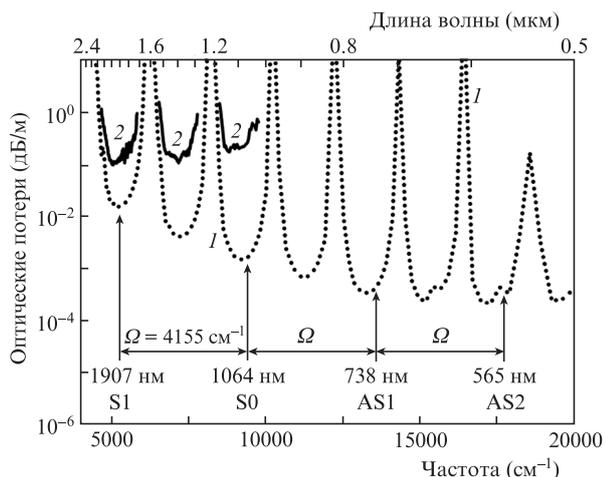


Рис.2. Расчетный (1) и экспериментальный (2) спектры оптических потерь основной моды использованного револьверного СПС. Вертикальными стрелками указано спектральное положение длин волн накачки (S0), стоксовой колебательной компоненты (S1) и антистоксовых колебательных компонент (AS1, AS2); $\Omega = 4155 \text{ cm}^{-1}$ – сдвиг, соответствующий колебательному переходу Q(1) молекулярного водорода.

мого возбуждения мод высшего порядка в процессе измерения, обладающих значительно более высокими потерями. Поскольку с увеличением частоты излучения световод становится все более многомодовым, то вклад потерь мод высшего порядка в измеренные оптические потери приводит к росту регистрируемых минимальных потерь при переходе к более высокочастотным зонам пропускания. Измеренные оптические потери на длинах волн накачки (1064 нм) и стоксовой волны (1907 нм) составили 0.25 и 0.1 дБ/м соответственно.

Схема эксперимента представлена на рис.3. Источником накачки служил твердотельный Nd:YAG-лазер, излучающий на длине волны 1064 нм в режиме модуляции добротности. Лазер генерировал импульсы длительностью 125 нс с частотой следования 1.2 кГц и средней мощностью до 4 Вт. При общей ширине спектра генерации $0.07 \pm 0.01 \text{ nm}$ излучение было одноимодовым и изначально эллиптически поляризованным. Для контроля уровня мощности и состояния поляризации излучение лазера пропусклось через первую призму Глана (ПГ1) для получения линейно поляризованного пучка. Затем линейно поляризованное излучение последовательно пропусклось через пластинку $\lambda/2$ и вторую призму Глана (ПГ2), что позволяло плавно регулировать его мощность вращением пластинки $\lambda/2$. Состояние поляризации прошедшего пучка контролировалось с помощью пластинки $\lambda/4$.

Ввод излучения в револьверный СПС осуществлялся с помощью плосковыпуклой линзы Л1 с фокусным расстоя-

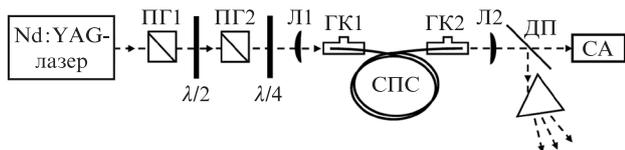


Рис.3. Схема экспериментальной установки: ПГ1 и ПГ2 – призмы Глана; $\lambda/2$ и $\lambda/4$ – полуволновая и четвертьволновая пластинки на длину волны 1064 нм; Л1 и Л2 – линзы; ГК – миниатюрные герметичные кюветы; СПС – световод с полой сердцевиной; ДП – делительная пластинка; СА – спектроанализатор.

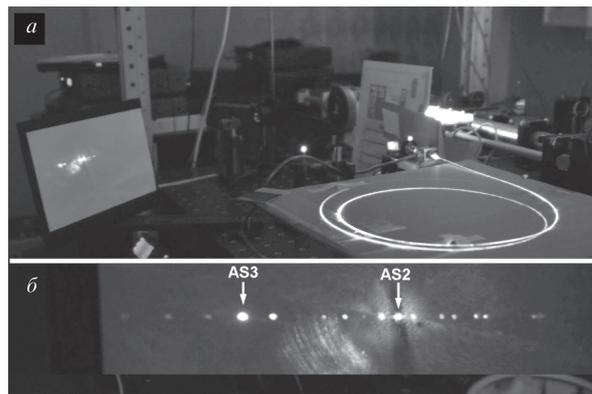


Рис.4. Общий вид свечения револьверного СПС, заполненного водородом при $p = 31 \text{ атм}$ и мощности накачки, превышающей пороговую для генерации стоксовой компоненты на длине волны 1.907 мкм (а), и спектр видимого излучения на выходе световода при тех же условиях, полученный за призмой (см. рис.3) (б). Высокая яркость линии AS2 (565 нм) препятствовала регистрации спектра в широком диапазоне длин волн, поэтому она была снижена с помощью специальной маски между призмой и экраном. Цветное изображение см. на 3-й странице обложки, а также на сайте «Квантовой электроники» <http://www.quantum-electron.ru>. Цветопередача несколько искажена вследствие особенностей спектральной чувствительности фотоаппарата.

нием 60 мм, которая обеспечивала эффективность ввода излучения $\sim 53\%$. Длина световода в наших экспериментах составляла 2.25 м. Концы световода были герметично зафиксированы в миниатюрных герметичных кюветках ГК, имеющих сапфировое окошко для ввода/вывода излучения. Система подачи газов позволяла заполнять кюветы и световод молекулярным водородом при давлениях $p = 1\text{--}31 \text{ атм}$ при комнатной температуре. Излучение с выходного конца СПС коллимировалось микрообъективом Л2 и подавалось на делительную пластинку. Один оптический канал после делительной пластинки использовался для спектральных измерений, осуществляемых спектроанализаторами различных типов с общей чувствительностью по длинам волн от 200 до 2400 нм. Излучение в другом канале пропусклось через дисперсионную призму, после чего мощность отдельных спектральных компонент регистрировалась измерителем мощности. Для измерения формы импульсов накачки и первой стоксовой компоненты измеритель мощности заменялся фотоприемником с временным разрешением 6 нс, сигнал с которого наблюдался на быстродействующем осциллографе с шириной полосы 1 ГГц. Заменяв измеритель мощности листом белой бумаги, мы могли получить с помощью обычного фотоаппарата спектр видимого излучения на выходе световода (рис.4,б).

3. Результаты и их обсуждение

При превышении мощности излучения накачки, введенного в СПС при давлении водорода 31 атм, некоторой пороговой величины P_{th} наблюдалась генерация стоксового излучения на 1907 нм. Одновременно возникало значительное количество антистоксовых компонент, лежащих в диапазоне от УФ до λ_p (см. рис.4). Генерируемое стоксово и антистоксово излучение распространялось только в направлении, совпадающем с направлением распространения накачки, причем наблюдаемое радиальное распределение интенсивности излучения во всех стоксовых и антистоксовых компонентах примерно соответ-

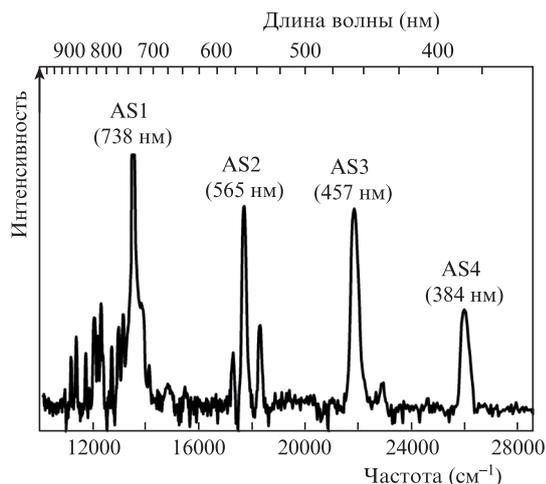


Рис.5. Спектр излучения в видимой области, регистрируемый через боковую поверхность револьверного СПС; $p = 31$ атм.

ствовало основной моде. Суммарная мощность излучения на антистоксовых длинах волн не превышала 2% от мощности первой стоксовой компоненты на 1907 нм. Спектральное положение компонент характеризуется изменением кванта энергии накачки на величину различных линейных комбинаций энергий квантов колебательного (Q(1)) и вращательного (S(1)) переходов молекулы ортоводорода [18, 26]. При высоком давлении газа (в данном случае 31 атм) коэффициент рамановского усиления максимален и не зависит от давления [27]. Порог ВКР на колебательном переходе молекулярного водорода в таких условиях достигался при средней мощности излучения накачки, введенного в световод, ~ 300 мВт.

Характерный спектр рассеянного видимого излучения, наблюдаемого через боковую поверхность револьверного СПС (см. рис.4,а), представлен на рис.5. Наиболее интенсивные линии на спектре наблюдаются на длинах волн 738, 565, 457 и 384 нм, что соответствует четырем антистоксовым компонентам (AS1–AS4) рамановского рассеяния излучения накачки (1064 нм) на колебательном переходе Q(1) молекулярного водорода. Спектр содержит также ряд менее интенсивных линий, некоторые из которых (например, на 830 и 880 нм) относятся к излучению ксеноновой лампы накачки неодимового лазера, а остальные соответствуют рассеянию на вращательном переходе ортоводорода, имеющем стоксов сдвиг $\omega = 587$ см⁻¹.

Спектры излучения с выходного торца револьверного СПС представлены на рис.6 в широком спектральном диапазоне, включающем как видимую, так и ИК область. Цифрой 1 на рис.6 обозначены характерные спектры излучения, измеренные при линейной поляризации накачки. Наряду с длиной волны накачки (1064 нм) данный спектр содержит первую стоксову (1907 нм), а также первую (738 нм) и вторую (565 нм) антистоксовы компоненты, образующиеся в результате рассеяния накачки на колебательном переходе Q(1) молекулярного водорода с частотным сдвигом $\Omega = 4155$ см⁻¹ и четырехфотонного взаимодействия накачки со стоксовой и антистоксовыми компонентами. Можно видеть, что наиболее эффективно излучение накачки преобразуется в стоксову волну. При использовании циркулярно поляризованной накачки спектр ВКР (как и в [18]) дополнительно обогащался линиями, сдвинутыми на частоту $\omega = 587$ см⁻¹ (рис.6, линии 2), что указывает на участие в рамановском процессе рас-

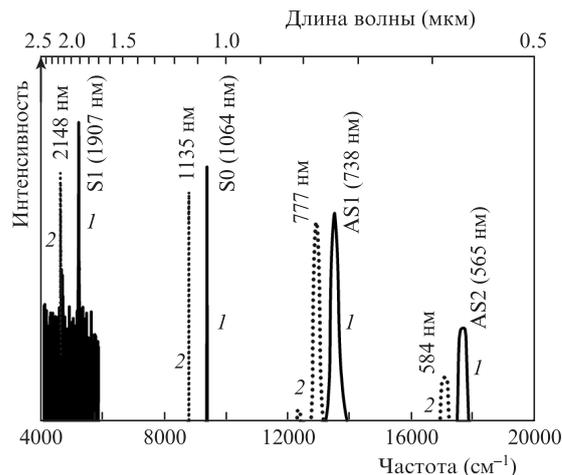


Рис.6. Спектры излучения на выходе револьверного СПС, заполненного молекулярным водородом, при двукратном превышении порога ВКР ($p = 31$ атм). Спектры регистрировались как при линейной (1) так и при циркулярной (1 и 2) поляризациях накачки.

сеяния на вращательном переходе S(1). Различия в уровнях шума и спектральных ширинах пиков обусловлены тем, что для получения полного спектра, показанного на рис.6, использовались три спектрометра, различающихся по чувствительности и разрешающей способности. Следует отметить, что существенно большее число генерируемых спектральных компонент в спектре, представленном на рис.4, по сравнению со спектром на рис.6 обусловлено тем, что первый спектр был получен в схеме эксперимента без элементов контроля уровня мощности и поляризации (призм Глана и фазовых пластинок), что позволило ввести в СПС излучение накачки с примерно в два раза более высокой мощностью.

На рис.7 показаны зависимости выходной мощности стоксовой волны (кривая 1) и прошедшей мощности накачки (кривая 2) от средней мощности накачки, введенной в револьверный СПС. Измерения проводились при линейной поляризации накачки и давлении водорода 31 атм. Порог колебательного ВКР P_{th} достигался при введенной средней мощности накачки 0.3 Вт, что соответствует пиковой пороговой мощности 2 кВт и интенсивности 0.16 ГВт/см². Эффективность преобразования мощности накачки (1064 нм) в стоксову компоненту (1907 нм) в наших экспериментах составила 33.5%. Из-за большого различия энергий квантов накачки и стоксовой компо-

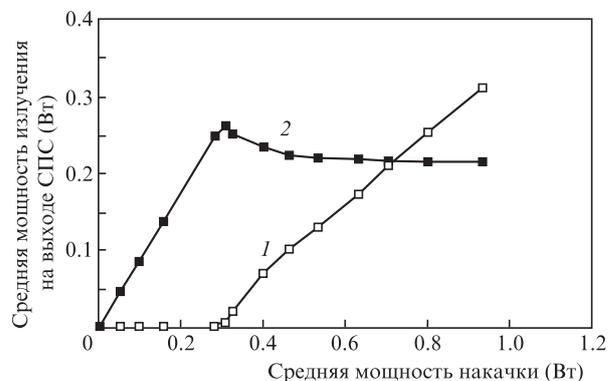


Рис.7. Зависимости выходной средней мощности стоксовой волны на $\lambda = 1907$ нм (1) и прошедшей световод мощности излучения накачки на $\lambda = 1064$ нм (2) от средней мощности накачки, введенной в СПС. Длина световода 2.25 м, давление водорода 31 атм.

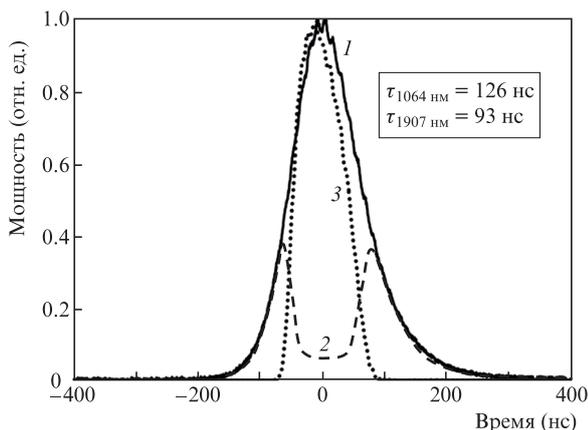


Рис.8. Формы импульсов накачки и стоксовой волны на выходе револьверного СПС, заполненного водородом: импульс накачки ниже порога ВКР (1), импульс накачки (2) и стоксов импульс (3) при 2.5-кратном превышении порога ВКР.

ненты в случае водородного рамановского лазера лучше указывать долю квантов накачки, преобразованных в кванты стоксового излучения, т.е. квантовую эффективность, которая в наших экспериментах достигала 60%. Полученная нами эффективность ВКР-преобразования на колебательном переходе молекулы водорода в СПС является в настоящее время рекордной, превышая значения, полученные в работе [18], где эффективность по мощности составляла 27%, а квантовая эффективность – 48%.

После превышения порога ВКР мощность генерации на стоксовой длине волны зависит от введенной мощности накачки линейно, не проявляя признаков насыщения вплоть до максимальной достигнутой мощности накачки (рис.7). Это свидетельствует о том, что выходная средняя мощность стоксовой компоненты, которая в настоящей работе составила 330 мВт (пиковая мощность 3 кВт), не является предельной. Следует также отметить, что дифференциальная квантовая эффективность преобразования в наших экспериментах (соответствует прямолинейному участку зависимости 1 на рис.7) достигает 87%.

Формы импульсов накачки и стоксовой компоненты, измеренные на выходе СПС, представлены на рис.8. Длительность стоксового импульса (93 нс) заметно меньше длительности импульса накачки (125 нс). Видно также, что превышение порога ВКР приводит к истощению центральной части импульса накачки.

Пороговые значения необходимой для возникновения ВКР пиковой мощности накачки, измеренные в наших экспериментах при различных давлениях водорода в СПС, обозначены на рис.9 точками. Здесь же сплошной кривой показана приближенная зависимость $P_{th}(p)$, рассчитанная на основании данных работ [27, 28]. Можно видеть удовлетворительное соответствие измеренных и рассчитанных значений порога ВКР. При высоких давлениях ($p \geq 10$ атм), когда спектральная ширина рамановского усиления определяется столкновительным уширением, порог ВКР не зависит от давления водорода и достигает минимального значения, равного пиковой мощности 2 кВт.

4. Заключение

В специально разработанном револьверном световоде с полой сердцевиной, заполненном молекулярным водородом, исследован стационарный режим ($\tau = 125$ нс)

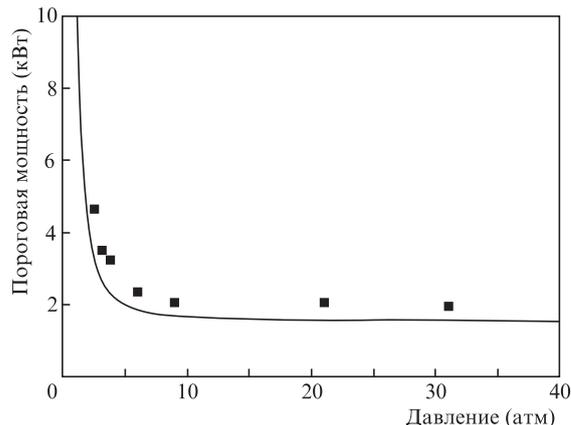


Рис.9. Зависимость пороговой мощности ВКР от давления молекулярного водорода в револьверном СПС (точки – эксперимент, сплошная кривая – расчет).

ВКР-преобразования длин волн 1.06 мкм \rightarrow 1.9 мкм. Данный световод обладает низкими оптическими потерями, составляющими 0.25 дБ/м на длине волны накачки (1.06 мкм) и 0.1 дБ/м на длине стоксовой волны (1.9 мкм). Показано, что зависимость порога ВКР от давления водорода в сердцевине револьверного световода с удовлетворительной точностью аппроксимируется зависимостью, полученной на основе известных литературных данных. При высоком давлении ($p > 10$ атм) порог ВКР наблюдался при пиковой мощности накачки 2 кВт. Квантовая эффективность преобразования излучения накачки в стоксову волну составляла 60% (дифференциальная – 87%), что выше эффективности преобразования, достигнутой в предыдущих работах. Средняя выходная мощность стоксова излучения при этом равнялась 330 мВт, что соответствует пиковой мощности 3 кВт при длительности стоксового импульса 93 нс. Указанная выходная мощность стоксовой волны не проявляет признаков насыщения и может быть увеличена при использовании более мощного излучения накачки. Параметры волоконного ВКР-лазера на длине волны 1.9 мкм, достигнутые в настоящей работе, указывают на возможность создания эффективных однокаскадных компактных газовых ВКР-лазеров на основе полых световодов с газовым наполнением, работающих в диапазоне 1.9–10 мкм, причем для вариации длины волны в указанном диапазоне достаточно выбирать длину волны накачки в области 1–2 мкм.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-02-08840).

1. Dianov E.M. *J. Lightwave Technol.*, **20**, 1457 (2002).
2. Basiev T.T., Osiko V.V., Prokhorov A.M., Dianov E.M., in *Solid-State Mid-Infrared Laser Sources, Topics Appl. Phys.* (Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2003, vol. 89, p. 351).
3. Minck R.W., Terhune R.W., Rado W.G. *Appl. Phys. Lett.*, **3**, 181 (1963).
4. Грасюк А.З., Зубарев И.Г., Котов А.В., Михайлов С.И., Смирнов В.Г. *Квантовая электроника*, **3**, 1062 (1976).
5. Byer R.L., Trutna W.R. *Opt. Lett.*, **3**, 144 (1978).
6. Tashiro H., Midorikawa K., Aoki Y., Nagasaka K., Toyoda K., Namba S. *Opt. Lett.*, **10**, 80 (1985).
7. Ippen E.P. *Appl. Phys. Lett.*, **16**, 303 (1970).
8. Stolen R.H., Ippen E.P., Tynes A.R. *Appl. Phys. Lett.*, **20**, 62 (1972).
9. Grubb S., Erdogan T., Mizrahi V., Strasser T., Cheung W.Y., Reed W.A., Lemaire P.J., Miller A.E., Kosinski S.G., Nykolak G., Becker P.C. *Proc. Top. Meet. «Opt. Amplifiers Appl.»* (Breckenridge: 1994, PD3-1, p. 187).

10. Dianov E.M., Grekov M.V., Bufetov I.A., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Plotnichenko V.G., Koltashev V.V., Belov A.V., Bubnov M.M., Semjonov S.L., Prokhorov A.M. *Electron. Lett.*, **33**, 1542 (1997).
11. Буфетов И.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **30**, 873 (2000).
12. Дианов Е.М., Буфетов И.А., Машинский В.М., Шубин А.В., Медведков О.И., Ракитин А.Е., Мелькумов М.А., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 435 (2005).
13. Stegan 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).
14. Benabid F., Knight J.C., Antonopoulos G., Russell P.St.J. *Science*, **298**, 399 (2002).
15. Couny F., Benabid F., Roberts P.J., Light P.S., Raymer M.G. *Science*, **318**, 1118 (2007).
16. Benabid F., Bouwmans G., Knight J.C., Russell P.St.J. *Phys. Rev. Lett.*, **93**, 123903 (2004).
17. Couny F., Benabid F., Light P.S. *Phys. Rev. Lett.*, **99**, 143903 (2007).
18. Wang Z., Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Laser Phys. Lett.*, **11**, 105807 (2014).
19. Wang Y.Y., Couny F., Roberts P.J., Benabid F. *Proc. Conf. Lasers and Electrooptics 2010* (San Jose, Cal., 2010, paper CPDB4).
20. Wang Y.Y., Wheeler N.V., Couny F., Roberts P.J., Benabid F. *Opt. Lett.*, **36**, 669 (2011).
21. Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Kosolapov A.F., Plotnichenko V.G., Semjonov S.L., Dianov E.M. *Opt. Express*, **19**, 1441 (2011).
22. Yu F., Wadsworth W.J., Knight J.C. *Opt. Express*, **20**, 11153 (2012).
23. Прямыков А.Д., Бирюков А.С. *УФН*, **183**, 863 (2013).
24. Kolyadin A.N., Kosolapov A.F., Pryamikov A.D., Biriukov A.S., Plotnichenko V.G., Dianov E.M. *Opt. Express*, **21**, 9514 (2013).
25. Alagashev G.K., Pryamikov A.D., Kosolapov A.F., Kolyadin A.N., Lukovkin A.Yu., Biriukov A.S. *Laser Phys.*, **25**, 055101 (2015).
26. Johnson F.M., Duardo J.A., Clark C.L. *Appl. Phys. Lett.*, **10**, 157 (1976).
27. Bischel W.K., Dyer M.J. *Phys. Rev. A*, **33**, 3113 (1986).
28. Laubereau A., Kaiser W. *Rev. Modern Phys.*, **50**, 607 (1978).