

# Волоконные ВКР-лазеры на световоде с высоким содержанием оксида германия в сердцевине

Е.М.Дианов, И.А.Буфетов, В.М.Машинский, А.В.Шубин, О.И.Медведков, А.Е.Ракитин, М.А.Мелькумов, В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов

*Исследовано усиление излучения за счёт вынужденного комбинационного рассеяния в волоконном световоде с преобладающим содержанием оксида германия  $GeO_2$  в сердцевине и с оболочкой из плавленного кварца. Продемонстрированы возможности использования таких световодов в качестве активных сред ВКР-лазеров. Впервые реализованы волоконный ВКР-лазер с выходной мощностью 10 Вт при длине световода всего 3 м и волоконные ВКР-лазеры на длины волн 1.73, 1.85, 2.06 и 2.2 мкм.*

**Ключевые слова:** волоконный ВКР-лазер, волоконный световод с  $GeO_2$ -сердцевинной.

## 1. Введение

Волоконные лазеры на основе легированного плавленного кварца позволяют генерировать ИК излучение в широком (0.9–2.1 мкм) диапазоне длин волн (рис. 1). Ряд поддиапазонов здесь перекрывается излучением лазеров на ионах редкоземельных металлов, а в диапазоне 1.12–1.65 мкм могут генерировать волоконные ВКР-лазеры [1].

Расширение рабочего диапазона волоконных лазеров в область больших длин волн позволило бы получить удобные в эксплуатации источники излучения, которые могли бы найти применение, например, для контроля окружающей среды, в медицине, в научных исследованиях и других областях. Препятствует этому увеличение оптических потерь в световодах на основе плавленного кварца при смещении в область длин волн около 2 мкм и далее.

В частности в волоконных ВКР-лазерах при условии преобладания в световоде оптических потерь пороговая мощность генерации  $P_{th}$  растёт пропорционально коэффициенту этих потерь  $\alpha_s$  ( $P_{th} = \alpha_s/g_0$ , где  $g_0$  – коэффициент рамановского усиления световода (КРУС)) [2]. Типичные оптические потери  $\alpha_s$  стандартных германо-силикатных световодов (с сердцевинной из плавленного кварца, легированного  $GeO_2$  с молярной концентрацией  $\sim 3\%$ ) на длине волны  $\lambda = 2.1$  мкм составляет около 100 дБ/км при  $g_0 < 3$  дБ·км<sup>-1</sup>·Вт<sup>-1</sup>. Таким образом, согласно оценке снизу пороговая мощность накачки для волоконного ВКР-лазера на стандартных световодах в данной области длин волн чрезвычайно велика:  $P_{th} \approx 30$  Вт.

Снизить пороговую мощность до приемлемого уровня  $\sim 1$  Вт можно, лишь увеличив значение КРУС и уменьшив оптические потери.

Известно, что фундаментальный минимум оптических потерь в стекле на основе оксида германия  $GeO_2$  на-

ходится в области 2 мкм [3, 4] и составляет  $\sim 0.22$  дБ/км. Благодаря большой разности показателей преломления сердцевинной и оболочки ( $\Delta n \sim 0.1$ ) волоконные световоды с оболочкой из плавленного кварца и сердцевинной, состоящей в основном из  $GeO_2$  (в дальнейшем  $GeO_2$ -световоды), обладают малым диаметром поля моды и, следовательно, должны иметь высокое значение КРУС. Сечение ВКР в стекле с  $GeO_2$  примерно в 10 раз превышает сечение в кварцевом стекле [5], поэтому значительная концентрация двуокиси германия в сердцевине является дополнительным фактором, увеличивающим КРУС. Вообще говоря, малость диаметра поля моды обеспечивает высокую эффективность различных нелинейных явлений. Таким образом,  $GeO_2$ -световоды представляют интерес прежде всего из-за сравнительно низких оптических потерь в области 2 мкм и своих нелинейных свойств.

Хотя изготовление одномодовых  $GeO_2$ -световодов с низкими оптическими потерями вызывает определённые технологические трудности, нам удалось с помощью MCVD-технологии изготовить  $GeO_2$ -световоды с минимальными оптическими потерями 20–100 дБ/км в диапазоне 1.8–1.9 мкм. Достигнутый уровень потерь существенно выше минимально возможного, но высокие ко-

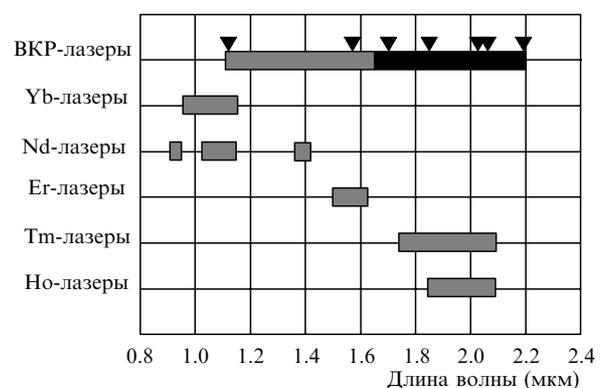


Рис. 1. Спектральные области генерации волоконных лазеров на основе плавленного кварца в диапазоне 0.9–2.2 мкм: чёрные прямоугольники – ВКР-лазеры на основе  $GeO_2$ -световодов; треугольниками обозначены длины волн ВКР-лазеров, реализованных в настоящей работе.

Е.М.Дианов, И.А.Буфетов, В.М.Машинский, А.В.Шубин, О.И.Медведков, А.Е.Ракитин, М.А.Мелькумов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; тел.: (095) 132 82 56, факс: (095) 135 81 39, e-mail: iabuf@fo.gpi.ru

В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ РАН, Россия, 603600 Нижний Новгород, ул. Тропинина, 4; тел.: (831) 2-127313, факс: (831) 266-4634, e-mail: vkhopin@mail.ru

Поступила в редакцию 13 января 2005 г.

эффиценты ВКР-усиления позволяют использовать эти световоды в качестве усиливающей среды. Кроме того, эти световоды достаточно фоточувствительны, что даёт возможность записывать в них брэгговские решетки (БР) показателя преломления, выполняющие функции лазерных зеркал [6].

Таким образом, применение  $\text{GeO}_2$ -световодов с оболочкой из плавленого кварца в качестве активных сред волоконных ВКР-лазеров позволило существенно расширить диапазон их рабочих длин волн (рис.1) и достигнуть при этом длины волны генерации 2.2 мкм.

## 2. Усилительные свойства $\text{GeO}_2$ -световода

В данной работе в качестве усиливающей среды волоконных ВКР-лазеров использовался  $\text{GeO}_2$ -световод с длиной волны отсечки  $\lambda_c = 1.42$  мкм, диаметром сердцевины 2 мкм и молярным содержанием  $\text{GeO}_2$  в сердцевине 75 %. Распределение концентрации  $\text{GeO}_2$  измерялось методом рентгеноспектрального микроанализа с помощью сканирующего электронного микроскопа JSM-5910LV (JEOL) и рентгеновского спектрометра INCA (Oxford Instruments). Сердцевина имела несколько эллиптическую форму (с отношением осей 3 : 4). Несмотря на высокое содержание германия в сердцевине, минимальные оптические потери в области 1.9 мкм составили 20 дБ/км. В области  $\lambda > 2$  мкм оптические потери в  $\text{GeO}_2$ -световоде были ниже потерь в стандартном телекоммуникационном световоде (SMF-28) и составили  $\sim 30$  дБ/км ( $\lambda = 2$  мкм). Длина волны нулевой дисперсии  $\text{GeO}_2$ -световода оказалась равной  $\sim 2.5$  мкм, что существенно для подавления четырёхфотонного смешения в области длин волн до  $\sim 2.4$  мкм. Более подробно параметры световода рассмотрены в [2, 6].

Во всех схемах ВКР-лазеров в качестве усиливающего элемента использовались отрезки  $\text{GeO}_2$ -световода длиной 3 – 60 м. Брэгговские решетки показателя преломления во всех случаях записывались непосредственно в нём, что исключало появление в схемах оптических резонаторов сосредоточенных потерь в виде точек сварки световодов. Спектральная ширина всех БР составляла  $\sim 1$  нм. Волоконные ВКР-лазеры соединялись с помощью сварки с источниками непрерывного одномодового излучения накачки, в качестве которых в различных экспериментах выступали волоконный  $\text{Yb}$ -лазер (длина волны излучения  $\lambda = 1.07$  мкм) на световоде с многоэлементной первой оболочкой [7], двухкаскадный волоконный ВКР-лазер на фосфоросиликатном световоде ( $\lambda = 1.47$  мкм) [8] и волоконный  $\text{Er/Yb}$ -лазер ( $\lambda = 1.608$  мкм) [7].

С помощью этих источников накачки были измерены КРУС на длинах волн 1.12, 1.57 и 1.72 мкм; использовалась методика, основанная на определении порога генерации ВКР-лазера [9]. В результате были получены следующие данные: на длине волны 1.12 мкм при накачке на длине волны 1.07 мкм максимальное значение КРУС  $g_0(1.12/1.07) = 300$  дБ·км<sup>-1</sup>·Вт<sup>-1</sup>,  $g_0(1.57/1.47) = 112$  дБ·км<sup>-1</sup>·Вт<sup>-1</sup>,  $g_0(1.73/1.61) = 59$  дБ·км<sup>-1</sup>·Вт<sup>-1</sup> (рис.2). Максимум КРУС в  $\text{GeO}_2$ -световодах соответствовал частотному сдвигу  $\approx 427$  см<sup>-1</sup>. Как следует из приведенных данных, КРУС резко уменьшается с увеличением длины волны.

Для оценки значений КРУС на других длинах волн был выполнен расчёт с учётом распределения поля в световоде с заданным профилем показателя преломления и распределения концентрации  $\text{GeO}_2$  в сердцевине (см. [10]).

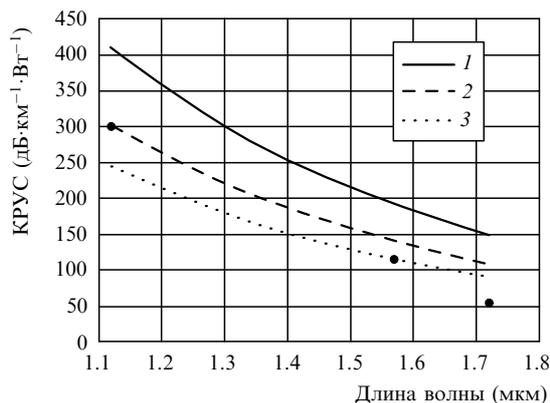


Рис.2. Спектральные зависимости коэффициента рамановского усиления световода с высоким содержанием оксида германия в сердцевине при различных молярных концентрациях  $\text{GeO}_2$ :

1, 2, 3 – расчетные кривые при максимальных концентрациях  $\text{GeO}_2$  75 %, 52 % и 40 % соответственно, точки – экспериментальные результаты при концентрации  $\text{GeO}_2$  75 %.

При этом предполагалось, что коэффициент ВКР-усиления объёмного вещества уменьшается обратно пропорционально длине волны [11]. Результаты расчёта  $g_0(\lambda)$  приведены на рис.2 для трёх максимальных концентраций  $\text{GeO}_2$  в сердцевине при одинаковом профиле показателя преломления. Молярная концентрация  $\text{GeO}_2$ , равная 75 %, соответствует измеренной в заготовке (до вытяжки световода); концентрация 52 % отвечает той разности  $\Delta n$ , при которой расчётное значение диаметра поля основной моды световода совпадает с его значением, измеренным методом дальнего поля, и лишь при концентрации 40 % достигается наилучшее согласование расчётных кривых с экспериментальными точками. Расхождение между расчётными и экспериментальными данными наблюдается во всех случаях (рис.2), причём экспериментальные значения КРУС снижаются с длиной волны значительно быстрее, чем расчётные.

Возможным источником ошибки в расчётах  $g_0(\lambda)$  может являться то обстоятельство, что данные о профиле показателя преломления в световоде основывались, главным образом, на измерении распределения концентрации  $\text{GeO}_2$  по поперечному сечению преформы, поскольку для измерения профиля показателя преломления использовались специализированные приборы типа P-102 (York Technology), не рассчитанные на измерение таких больших значений  $\Delta n$  ( $\sim 0.1$ ). Однако и варьирование профиля показателя преломления в пределах возможной ошибки измерения не обеспечивает согласования измеренных и расчётных значений КРУС. Поэтому для определения причины этих расхождений требуются дополнительные исследования.

## 3. Однокаскадный волоконный ВКР-лазер на $\text{GeO}_2$ -световоде с длиной волны генерации $\lambda = 1.12$ мкм

Оптические потери в  $\text{GeO}_2$ -световоде на длине волны  $\sim 1.1$  мкм высоки и составляют около 120 дБ/км. Однако большое значение КРУС в данной спектральной области вполне скомпенсировало этот недостаток и позволило впервые создать непрерывный ВКР-лазер на очень коротком отрезке световода. Действительно, параметр качества волоконных световодов как активной среды для однокаскадного ВКР-лазера  $P_F = [(\alpha_p/g_0)^{1/2} + (\alpha_1/g_0)^{1/2}]^2$  [12]

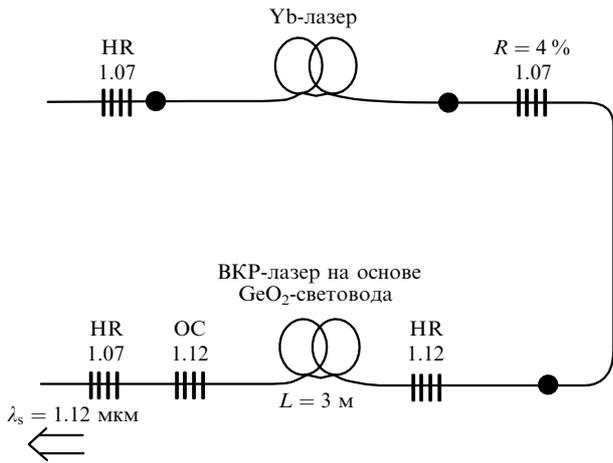


Рис.3. Схема волоконного ВКР-лазера ( $\lambda = 1.12$  мкм) с длиной GeO<sub>2</sub>-световода 3 м. Над брэгговскими решётками указаны резонансные длины волн (в микрометрах) и коэффициенты отражения (HR – коэффициент отражения, близкий к 100 %); OC – выходная решётка, точками обозначены места сварки.

( $\alpha_p$  и  $\alpha_1$  – оптические потери в световоде на длинах волн накачки и первой стоксовой компоненты соответственно) для GeO<sub>2</sub>-световода на длинах волн 1.07 и 1.12 мкм составляет ~1.6 Вт. Это значение примерно соответствует  $P_F$  волоконных световодов, применяемых в высокоэффективных волоконных ВКР-лазерах [12].

Нами был рассчитан и реализован волоконный ВКР-лазер на GeO<sub>2</sub>-световоде с накачкой излучением волоконного Yb-лазера ( $\lambda_p = 1.07$  мкм) и выходным излучением с длиной волны  $\lambda_s = 1.12$  мкм. Оптимальная длина активного световода составила всего 3 м. Схема лазера приведена на рис.3.

Зависимость мощности выходного излучения от мощности излучения накачки этого лазера представлена на рис.4. Максимальная выходная мощность достигала 10 Вт, причем она ограничивалась, главным образом, возникоением генерации второй стоксовой компоненты в резонаторе, образованном торцами GeO<sub>2</sub>- и иттербиевого световодов. Для сравнения здесь же приведена анало-

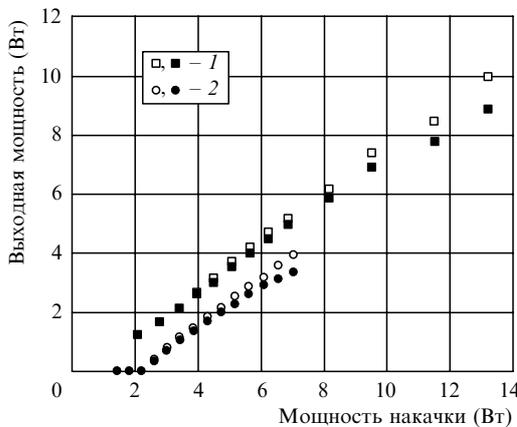


Рис.4. Зависимости от мощности накачки ( $\lambda_p = 1.07$  мкм) мощности выходного излучения однокаскадного волоконного ВКР-лазера ( $\lambda_s = 1.12$  мкм) с длиной световода 3 м (1) и 20 м без выходной брэгговской решётки на длину волны  $\lambda_s$  (OC – на рис.3) (2) для измерения  $g_0$ . Тёмные точки соответствуют мощности излучения на выходе лазера, светлые – суммарной мощности излучения стоксовой компоненты на выходе лазера и излучения, прошедшего через решётку HR(1.07) Yb-лазера.

гичная зависимость для ВКР-лазера с длиной световода 20 м, который использовался для определения КРУС.

Из-за наблюдавшегося уширения спектра генерации часть излучения ВКР-лазера выходила не через брэгговскую решётку OC (рис.3), а через высокоотражающую решётку Yb-лазера HR(1.07) на другом конце волоконной схемы. На рис.4 тёмные точки соответствуют мощности излучения ВКР-лазера на выходе OC, а светлые – суммарной мощности излучения стоксовой компоненты на выходе OC и за «глухой» решёткой HR(1.07) иттербиевого лазера.

Эффективность лазера на световоде длиной 3 м составила 70 %, что демонстрирует потенциальные возможности использования световодов с высоким содержанием GeO<sub>2</sub> в сердцевине в качестве активных волокон в ВКР-лазерах. Малые длины активных волокон, высокие значения  $\Delta n$  и, следовательно, низкие потери на изгиб световода позволяют рассчитывать на возможность создания миниатюрных волоконных ВКР-лазеров с характерными размерами несколько сантиметров.

#### 4. ВКР-лазеры на GeO<sub>2</sub>-световоде с накачкой на $\lambda = 1.47$ мкм

Спектральная зависимость оптических потерь в GeO<sub>2</sub>-световодах указывает на возможность создания эффективных волоконных ВКР-лазеров с длинами волн в области около 2 мкм. Но частотный сдвиг, соответствующий максимуму КРУС в GeO<sub>2</sub>-световодах, слишком мал, чтобы, стартовав с излучения накачки с  $\lambda_p = 1.07$  мкм, получить излучение с  $\lambda = 2$  мкм, т. к. в этом случае потребуются по меньшей мере десятикаскадный ВКР-лазер. Поэтому в следующих экспериментах мы использовали источники накачки с большей длиной волны.

В схеме, изображённой на рис.5, в качестве источника накачки для ВКР-лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде использовался двухкаскадный ВКР-лазер на фосфоросиликатном световоде, который, в свою очередь, накачивался от волоконного иттербиевого лазера с длиной волны 1.06 мкм [8]. Роль выходного зеркала с коэффициентом отражения 3.5% выполнял перпендикулярный геометрической оси торец GeO<sub>2</sub>-световода. Отсутствовала также брэгговская решётка, возвращающая в резонатор не поглощённое за один проход излучение накачки. В этом случае имела место ВКР-генерация на длине волны  $\lambda_s = 1571$  нм, мощ-

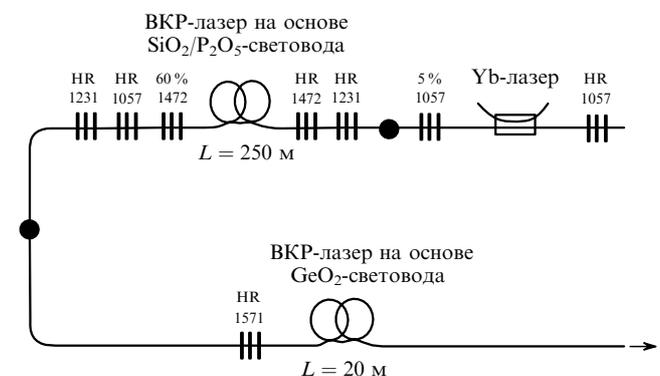


Рис.5. Схема волоконного ВКР-лазера на  $\lambda = 1571$  нм с накачкой от двухкаскадного фосфоросиликатного ВКР-лазера. Над брэгговскими решётками указаны резонансные длины волн в нанометрах и коэффициенты отражения (HR – коэффициент отражения, близкий к 100 %).

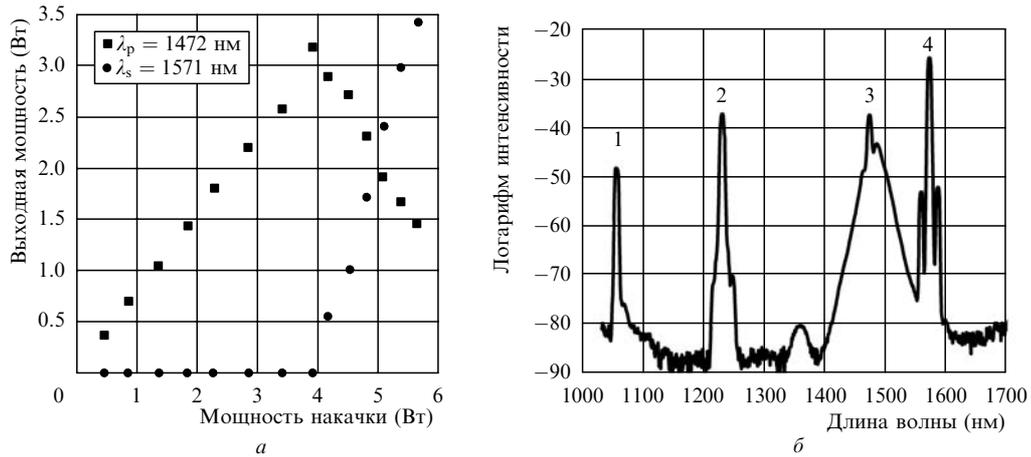


Рис.6. Зависимости мощности выходного излучения ВКР-лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде длиной 20 м ( $\lambda_s = 1571$  нм) от мощности накачки ( $\lambda_p = 1472$  нм) (а) и спектр излучения на выходе составного ВКР-лазера (б); пик 1 – непоглощённое излучение накачки от волоконного иттербиевого лазера (1057 нм), пик 2 – излучение первого каскада фосфоросиликатного ВКР-лазера (1231 нм), пик 3 – излучение второго каскада фосфоросиликатного ВКР-лазера (1472 нм), используемое для накачки однокаскадного ВКР-лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде, и пик 4 – излучение ВКР-лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде (1571 нм).

ность излучения которой достигла 3.5 Вт при эффективности 60 %. Зависимость мощности выходного излучения от мощности накачки на длине волны 1472 нм и спектр выходного излучения лазера приведены на рис.6. Необходимо отметить, что в спектре наряду с основным пиком на  $\lambda_s = 1571$  нм наблюдаются его спутники на  $\lambda_2 = 1556$  нм и  $\lambda_3 = 1584$  нм, что соответствует частотному сдвигу примерно  $56 \text{ см}^{-1}$ . Боковые пики, по-видимому, обусловлены четырёхфотонным смешением по схеме  $2h\nu_1 \rightarrow h\nu_2 + h\nu_3$ , где  $\nu_i$  – частота, соответствующая длине волны  $\lambda_i$ . Условия фазового синхронизма в данном случае выполняются благодаря различию постоянных распространения мод с разными поляризациями, распространяющихся по световоду с двулучепреломлением, обусловленным эллиптической формой сердцевины. Данное обстоятельство подтверждается тем, что спутники с  $\lambda_2$  и  $\lambda_3$  поляризованы во взаимно перпендикулярных плоскостях [13].

Увеличение числа каскадов ВКР-лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде с накачкой на длине волны 1.47 мкм позволяет достигнуть длины волны генерации 2 мкм. Для реализации такого длинноволнового лазера была выбрана четырёхкаскадная схема ВКР-лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде длиной 18 м. В данном случае резонансные длины волн брэгговских решёток были выбраны с несколько большим, чем  $427 \text{ см}^{-1}$ , частотным сдвигом с целью получения генерации в области свыше 2 мкм:  $\lambda_p = 1472.5$  нм,  $\lambda_{s1} = 1574.5$

нм,  $\lambda_{s2} = 1695$  нм,  $\lambda_{s3} = 1853$  нм,  $\lambda_{s4} = 2062$  нм. Коэффициент пропускания выходной решетки составил 50 %.

Излучение накачки поступало от двухкаскадного ВКР-лазера на фосфоросиликатном световоде [8]. Максимальная вводимая мощность накачки на длине волны 1472 нм составила 6.25 Вт. Полная схема лазера приведена на рис.7.

На рис.8,а изображен спектр излучения на выходе этого ВКР-лазера. Вводимая в него мощность накачки ( $\lambda_p = 1472$  нм) в данном случае была равна 3.9 Вт. С помощью монохроматора МДР-4 спектр получен во втором порядке дифракции для длин волн короче 2 мкм, в первом – для длин волн более 2 мкм. Пик 1 на  $\lambda = 1057$  нм соответствует непоглощённому излучению волоконного иттербиевого лазера, служащего источником накачки фосфоросиликатного ВКР-лазера. Пики 2 и 3 соответствуют излучению первой и второй стоксовых компонент фосфоросиликатного ВКР-лазера. Излучение первых трёх стоксовых компонент германатного ВКР-лазера обозначено цифрами 4, 5 и 6 соответственно. Его четвёртая компонента (пик 8,  $\lambda_{s4} = 2062$  нм) регистрируется в первом порядке рядом с  $\lambda = 1057$  нм. Слабый пик 7 (2017 нм) соответствует, по-видимому, максимуму ВКР-усиления пика 6 (третья стоксова компонента в GeO<sub>2</sub>-световоде,  $\lambda_{s3} = 1853$  нм): здесь наблюдается ВКР-генерация, несмотря на отсутствие оптического резонатора с высокой добротностью на данной длине волны.

Из рис.8,б следует, что, как и в случае однокаскадного ВКР-лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде ( $\lambda_{s1} = 1571$  нм), в области первой стоксовой компоненты лазера имеет место параметрическое усиление (четырёхфотонное смешение за счёт двулучепреломления, обусловленного эллиптической формой сердцевины). В данном случае частотный сдвиг несколько отличается от наблюдавшегося в однокаскадном ВКР-лазере и составляет примерно  $53 \text{ см}^{-1}$ .

На рис.9 приведены зависимости мощности различных компонент выходного излучения четырёхкаскадного ВКР-лазера от мощности накачки. Полная эффективность лазера составила около 3.5 %, а дифференциальная – около 8.3 % (для четвёртой компоненты). Максимальная мощность на  $\lambda_{s4} = 2062$  нм (220 мВт) достигается при введённой мощности излучения фосфороси-

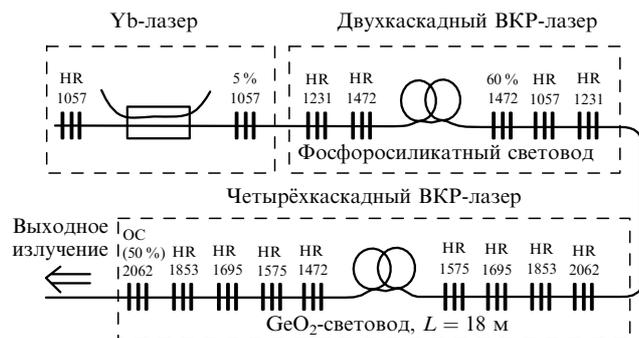


Рис.7. Схема четырёхкаскадного ВКР-лазера ( $\lambda_{s4} = 2062$  нм).

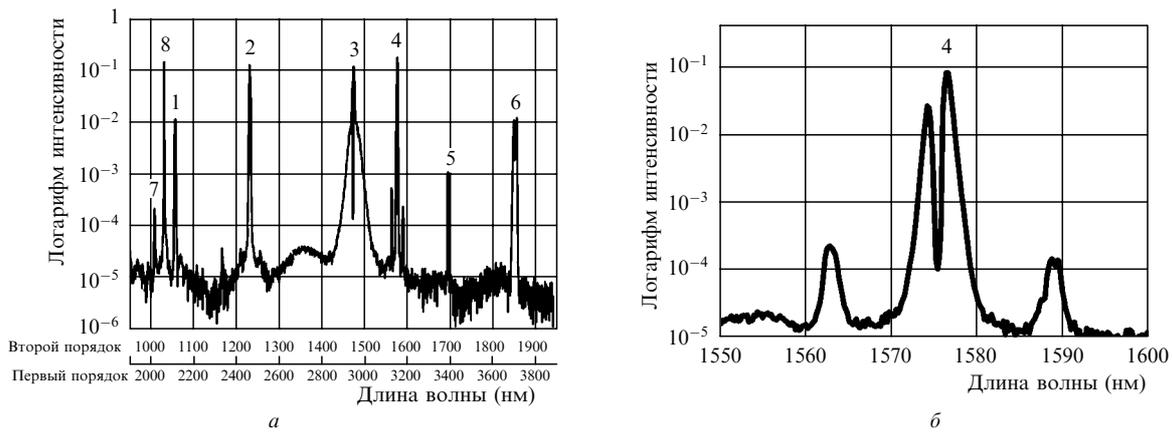


Рис. 8. Обзорный спектр излучения на выходе составного многокаскадного ВКР-лазера при мощности излучения 3.9 Вт на длине волны 1472 нм (пики 1–6 наблюдаются во втором порядке дифракции спектрометра, 7, 8 – в первом порядке) (а) и спектр первой стоксовой компоненты четырехкаскадного лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде (1576 нм); чётко видны боковые пики, сдвинутые по частоте на ±53 см<sup>-1</sup> и поляризованные во взаимно перпендикулярных плоскостях (б). Пик 1 – излучение непоглощенной мощности накачки от иттербиевого лазера (1.06 мкм), пик 2 – излучение первого каскада фосфоросиликатного лазера (1231 нм), пик 3 – излучение второго каскада фосфоросиликатного лазера (1472 нм), используемое для накачки четырехкаскадного лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде, пики 4–6 – излучение на первой (1575 нм), второй (1695 нм) и третьей (1853 нм) стоксовых компонентах ВКР-лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде, пик 7 – усиленная ВКР-компонента излучения с λ<sub>s3</sub> = 1853 нм (без резонатора) (2017 нм) и пик 8 – излучение на четвертой стоксовой компоненте ВКР-лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде (2062 нм).

ликатного конвертора 6.25 Вт (λ<sub>p</sub> = 1472 нм). Эффективность преобразования достаточно низка, поскольку значительная часть мощности накачки и первой стоксовой компоненты выходит непоглощённой. Это обусловлено, по-видимому, очень большой спектральной шириной пика излучения накачки (см. рис. 8, пик 3), а также неоптимальным выбором длин волн для записи БР: для получения генерации с длиной волны более 2 мкм за четыре каскада преобразования решётки были записаны с частотным сдвигом, существенно превышающим 427 см<sup>-1</sup>.

Фактически, если считать от иттербиевого лазера с длиной волны накачки 1057 нм, для достижения длины волны генерации 2 мкм использовался составной шестикаскадный ВКР-лазер. Данный шестикаскадный лазер выполнял функции делителя оптической частоты пополам. Однако поскольку эффективность ВКР-лазеров с увеличением числа каскадов преобразования существенно снижается (см. [12]), то для уменьшения их числа и достижения эффективной генерации на длине волны 2 мкм и более необходимо иметь излучение накачки ВКР-лазера с существенно большей, чем 1057 нм, длиной волны, которая использовалась в схеме на рис. 7.

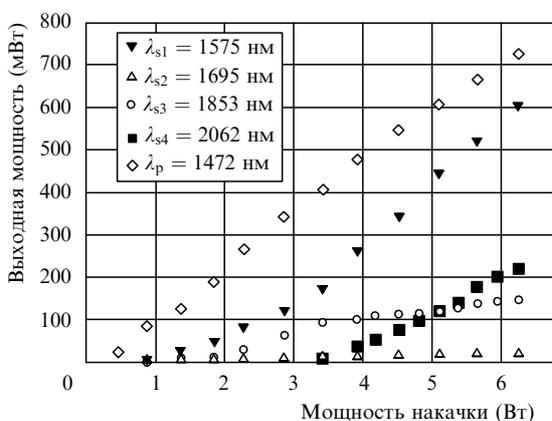


Рис. 9. Зависимости от мощности накачки мощностей выходного излучения четырёх стоксовых компонент ВКР-лазера на GeO<sub>2</sub>-световоде, а также непоглощённой в световоде мощности накачки (λ<sub>p</sub> = 1472 нм).

### 5. Волоконные ВКР-лазеры на GeO<sub>2</sub>-световоде с накачкой от волоконного Er/Yb-лазера на λ = 1.61 мкм

По причинам, рассмотренным выше, в последующих экспериментах в качестве источника излучения накачки мы использовали волоконный лазер с длиной волны генерации 1608 нм, собранный по известной схеме на Er/Yb-световоде (см., напр., [14]) с применением двухэлементной первой оболочки [7]. Использование этого источника накачки позволило создать серию ВКР-лазеров на GeO<sub>2</sub>-световодах. Были реализованы однокаскадный (λ<sub>s1</sub> = 1.73 мкм), двухкаскадный (λ<sub>s2</sub> = 1851 нм), трёхкаскадный (λ<sub>s3</sub> = 2027 нм) и четырёхкаскадный (λ<sub>s4</sub> = 2193 нм) волоконные ВКР-лазеры.

Однокаскадный лазер с длиной волны излучения 1.73 мкм был собран по схеме, подобной представленной на рис. 5, – без выходной и без используемой для возврата излучения накачки брэгговских решёток – и имел примерно такую же эффективность, как и ВКР-лазер с λ = 1571 нм. С его помощью было измерено значение g<sub>0</sub>(1.73/1.61).

Двухкаскадный ВКР-лазер использовался в качестве промежуточного в ходе отработки конструкции трёхкаскадного лазера. Его резонатором служил отрезок GeO<sub>2</sub>-световода длиной 60 м. Схема лазера была подобна схеме двухкаскадного ВКР-лазера на рис. 7 (с соответствующим образом изменёнными резонансными длинами волн БР), только роль выходного зеркала здесь выполнял торец световода с коэффициентом отражения ~3.5 %. Была получена генерация излучения на длине волны 1851 нм при максимальной эффективности 33 % (и максимальной дифференциальной эффективности 60 %), а выходная мощность достигла 1.4 Вт при мощности накачки 4.2 Вт. Зависимости мощности различных спектральных компонент выходного излучения лазера от мощности накачки представлены на рис. 10. Отметим, что в этом лазере длина резонатора была больше оптимальной.

Трёхкаскадный волоконный ВКР-лазер с накачкой на 1608 нм позволил получить длину волны генерации свыше 2 мкм. Конструкция лазера была оптимизирована с

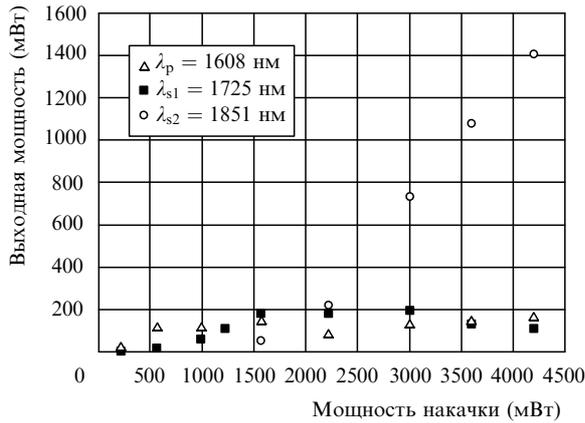


Рис. 10. Зависимости мощности выходного излучения стоксовых компонент двухкаскадного ВКР-лазера от мощности накачки ( $\lambda_p = 1608$  нм).

помощью численного моделирования процесса генерации. Длина выбранного таким образом  $\text{GeO}_2$ -световода составила 13 м. На рис.11 представлены спектр излучения на выходе лазера и зависимости мощности различных спектральных компонент излучения лазера от мощности накачки. Отдельные спектральные линии соответствуют излучению накачки (1608 нм, пик 1), а также излучениям первого (1732 нм, пик 2), второго (1864 нм, пик 3) и третьего (2027 нм, пик 4) каскадов лазера. Стоксовы

сдвиги между частотами излучения каскадов были выбраны близкими к соответствующим частотам максимумов коэффициента ВКР-усиления световода. Пороговая мощность излучения накачки для генерации третьего каскада составила 1.6 Вт, а максимальная мощность на выходе лазера на длине волны 2027 нм достигла 900 мВт при мощности накачки 4.7 Вт, что соответствует полной эффективности 19 %, причём дифференциальная эффективность составила 39 %.

При создании четырёхкаскадного ВКР-лазера на  $\text{GeO}_2$ -световоде с длиной волны генерации 2.2 мкм, необходимо учитывать резкое возрастание оптических потерь световода в спектральном диапазоне 2–2.2 мкм. Если для трёхкаскадного лазера потери на любой из используемых длин волн не превышают 40 дБ/км, то на  $\lambda = 2.2$  мкм они достигают  $\sim 150$  дБ/км, что требует существенного (до 8 метров) сокращения длины световода и ведёт к сильному снижению эффективности лазера (по сравнению с эффективностью трёхкаскадного лазера). Реализованный нами четырёхкаскадный ВКР-лазер на  $\text{GeO}_2$ -световоде (длина волны 2193 нм) имел мощность около 210 мВт при мощности накачки 4.6 Вт, а его полная и дифференциальная эффективности достигали соответственно 4.5 % и 6.2 %. Спектр излучения и зависимость мощности выходного излучения от мощности накачки показаны на рис.12. Как видно, к сожалению, существенная часть мощности накачки и первой стоксовой компоненты выходит из лазера непоглощённой.

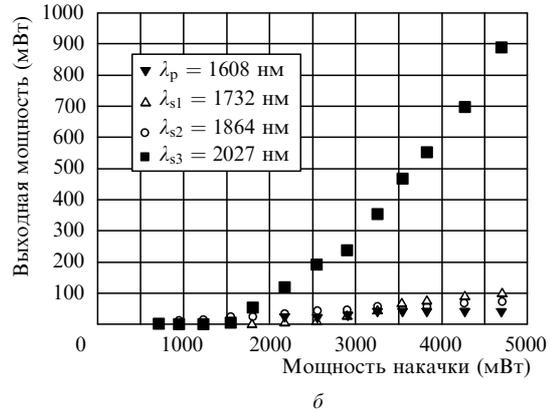
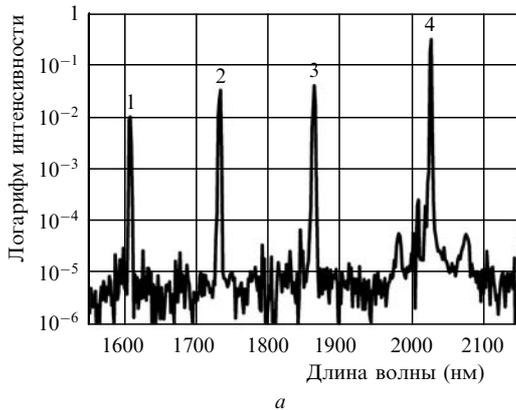


Рис. 11. Спектр выходного излучения (а) и зависимости мощности стоксовых компонент выходного излучения трёхкаскадного ВКР-лазера от мощности накачки (б). Пик 1 – непоглощённое излучение накачки ( $\lambda_p = 1608$  нм), пики 2, 3 и 4 – излучения первого ( $\lambda_{s1} = 1732$  нм), второго ( $\lambda_{s2} = 1864$  нм) и третьего ( $\lambda_{s3} = 2027$  нм) каскадов лазера.

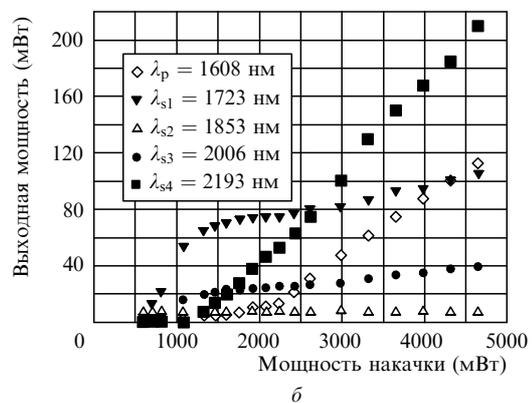
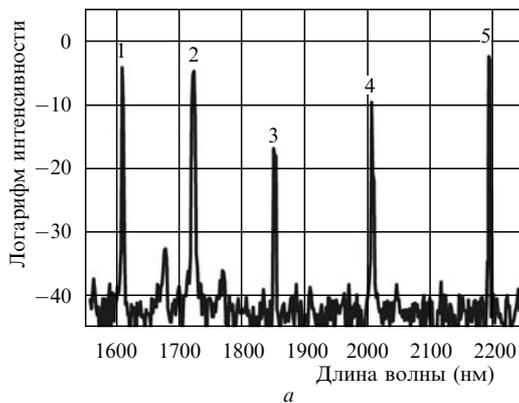


Рис. 12. Спектр выходного излучения (а) и зависимости мощности стоксовых компонент выходного излучения четырёхкаскадного ВКР-лазера от мощности накачки (б). Пик 1 – непоглощённое излучение накачки ( $\lambda_p = 1608$  нм), пики 2, 3, 4 и 5 – излучения первого ( $\lambda_{s1} = 1723$  нм), второго ( $\lambda_{s2} = 1853$  нм), третьего ( $\lambda_{s3} = 2006$  нм) и четвёртого ( $\lambda_{s4} = 2193$  нм) каскадов лазера.

Отметим, что длина волны этого ВКР-лазера превышает длину волны всех известных нам из литературы волоконных лазеров на световодах на основе плавяного кварца, в том числе тулиевого и гольмиевого.

В выходных спектрах двух последних многокаскадных ВКР-лазеров наблюдаются сателлиты линий генерации, подобные показанным на рис.8,б: около первой стоксовой компоненты ( $\lambda_{s1} = 1723$  нм) в четырёхкаскадном ВКР-лазере (рис.12,а) и около последней стоксовой компоненты ( $\lambda_{s3} = 2027$  нм) в трёхкаскадном лазере (рис.11,а). Тот факт, что параметрические процессы в разных схемах лазеров наиболее заметно проявляются в различных областях спектра, можно объяснить тем, что в каждом ВКР-лазере в наших экспериментах использовались отрезки GeO<sub>2</sub>-световода различной длины, а параметры световода (особенно дисперсионные) могли изменяться вдоль него существенным образом.

## 6. Заключение

Полученные результаты демонстрируют ярко выраженные нелинейные свойства световодов с высоким содержанием GeO<sub>2</sub> в сердцевине. Световоды этого типа позволили осуществить настоящий прорыв волоконных ВКР-лазеров в длинноволновую область ближнего ИК диапазона – была достигнута длина волны генерации 2.2 мкм и почти в 2 раза расширена спектральная полоса, доступная для волоконных ВКР-лазеров. Значительный рост коэффициента рамановского усиления световода при уменьшении длины волны позволяет создавать на GeO<sub>2</sub>-световодах эффективные лазеры с длиной волны в области около 1 мкм, несмотря на рост в ней оптических потерь. Дальнейшее увеличение концентрации GeO<sub>2</sub> в сердцевине световода при обеспечении умеренного уровня оптических потерь позволит, по-видимому, создать

волоконные ВКР-лазеры, работающие в спектральном диапазоне 2.5–3 мкм.

1. Dianov E.M. *J. LightWave Tech.*, 20 (8), 1457 (2002).
2. Дианов Е.М., Буфетов И.А., Машинский В.М., Неуструев В.Б., Медведков О.И., Шубин А.В., Мелькумов М.А., Гурьянов А.Н., Хопин В.Ф., Яшков М.В. *Квантовая электроника*, 34 (8), 695 (2004).
3. Olshansky R., Sherer G.W. *Proc. 5th ECOC* (Amsterdam, 1979, paper 12.5.1).
4. Дианов Е.М., Машинский В.М., Неуструев В.Б. *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 3, 46 (1981).
5. Galeener F.L., Mikkelsen J.C., Geils R.H., Mosby W.J. *Appl. Phys. Lett.*, 32, 34 (1978).
6. Mashinsky V.M., Neustruev V.B., Dvoyrin V.V., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Bufetov I.A., Shubin A.V., Dianov E.M., Guryanov A.N., Khopin V.F., Salgansky M.Yu. *Opt. Lett.*, 29, 2596 (2004).
7. Буфетов И.А., Бубнов М.М., Мелькумов М.А., Дудин В.В., Шубин А.В., Семенов С.Л., Кравцов К.С., Гурьянов А.Н., Яшков М.В., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, 35 (4), 328 (2005).
8. Bufetov I.A., Bubnov M.M., Larionov Y.V., Melkounov M.A., Rybaltovsky A.A., Semjonov S.L., Dianov E.M., Vartapetov S.K., Obidin A.Z., Kurzanov M.A. *Proc. CLEO'2002* (Long Beach, 2002, CThJ5).
9. Дианов Е.М., Буфетов И.А., Бубнов М.М., Греков М.В., Шубин А.В., Васильев С.А., Медведков О.И., Семенов С.Л., Егорова О.Н., Гурьянов А.Н., Хопин В.Ф., Яшков М.В., Варелас Д., Иокко А., Костантини Д., Лимбергер Н.Г., Салате Р.-П. *Квантовая электроника*, 29 (2), 97 (ноябрь 1999).
10. Dianov E.M., Bufetov I.A., Bubnov M.M., Grekov M.V., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Shubin A.V., Guryanov A.N., Khopin V.F., Yashkov M.V., DeLiso E.M., Butler D.L. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, 4083, 101 (2000).
11. Stolen R.H. *Optical Fiber Telecommunication* (New York: Acad. Press, 1979, p.125–150).
12. Буфетов И.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, 30 (10), 873 (2000).
13. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1996, с. 298).
14. Cheo P.K., King G.G. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 13, 188 (2001).