

## Математическое моделирование свойств револьверных световодов и оптимальная конструкция световода для рамановского лазера $1.56 \rightarrow 4.4$ мкм

А. Д. ПРЯМИКОВ\*, Г. К. АЛАГАШЕВ, И. А. БУФЕТОВ

Научный центр волоконной оптики РАН, Москва, Россия

\*Контактный e-mail: pryamikov@mail.ru

Представлены результаты численного моделирования оптических свойств револьверных световодов с полый сердцевинной в зависимости от диаметра сердцевинны, толщины стенок капилляров, составляющих отражающую оболочку, величины минимального зазора между капиллярами, количества капилляров в оболочке и типа стекла (кварцевого, халькогенидного), из которого изготовлен полый световод. Для сравнения проведены аналогичные расчеты для имеющихся простых моделей световодов с полый сердцевинной. На основании полученных результатов определена оптимальная конструкция револьверного волоконного световода, заполненного водородом, для реализации рамановского волоконного лазера среднего ИК-диапазона, осуществляющего преобразование длины волны излучения  $1.56 \rightarrow 4.4$  мкм.

*Ключевые слова:* полый световод, рамановская лазерная генерация в среднем ИК-диапазоне, оптимизация конструкции револьверного световода.

### Введение

Волоконные световоды с полый сердцевинной (СПС), изготовленные из кварцевого стекла, позволяют транспортировать излучение в значительно более широком диапазоне длин волн, чем световоды с твердой сердцевинной из чистого или легированного кварцевого стекла [1]. В частности, экспериментально продемонстрировано, что на световодах с полый сердцевинной, заполненной водородом, возможно создание эффективных источников излучения в среднем ИК-диапазоне, на длинах волн 2.9, 3.3, 3.5 и 4.4 мкм [2, 3]. При этом использовались так называемые револьверные волоконные световоды (РС) с полый сердцевинной (рис. 1) [4, 5].

Револьверные световоды отличаются простотой конструкции (по сравнению с фотонно-кристаллическими световодами с полый сердцевинной [6]) и сравнительно малыми оптическими потерями. Волноведущие свойства таких световодов можно относительно просто объяснить, используя для описания распространения лучей по световоду своего рода метод последовательных приближений.

- В хорошо известной модели полого световода (ПС) [7], представляющего собой цилиндрическое отверстие в объеме твердого тела (для нас наибольший интерес

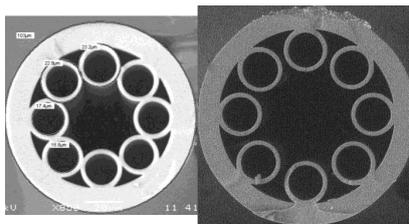


Рис. 1. Револьверные световоды с полый сердцевинной

представляют стекла, из которых изготавливаются волоконные световоды, в частности кварцевое стекло (КС) и халькогенидное стекло (ХС)), волноводные свойства обеспечиваются френелевским отражением излучения от внутренней поверхности световода при скользющем падении (рис. 2, *a*, *б*).

- Коэффициент отражения излучения от границы сердцевинной можно увеличить по сравнению с ПС за счет формирования на границе тонкого слоя стекла с отражением от двух поверхностей и толщиной, соответствующей конструктивной интерференции отраженных лучей. Такая модель трубчатого световода (ТС) рассматривалась в [8] (рис. 2, *в*, *г*). Фактически стенка капилляра в модели ТС представляет собой интерферометр Фабри—Перо, отражение от которого достигает максимума в режиме антирезонанса. Значительно позже этот же механизм был рассмотрен в [9] и получил название ARROW (AntiResonant Reflecting Optical Waveguide).
- Кроме использования двух механизмов: френелевского отражения и конструктивной интерференции света, отраженного от двух поверхностей, — отрицательной кривизны границы сердцевинной — оболочка [4], дальнейшее увеличение коэффици-

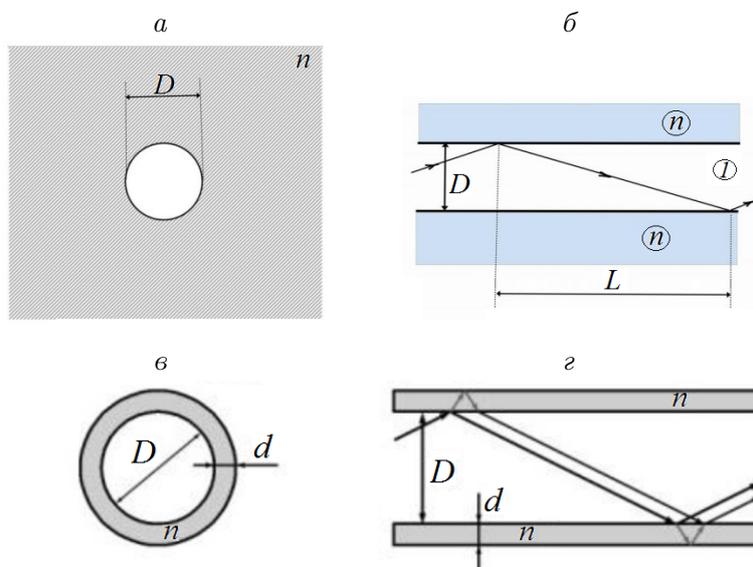


Рис. 2. Полый световод — цилиндрический канал в диэлектрике с показателем преломления  $n$  (сверху): *a* — поперечное сечение, *б* — схема распространения излучения вдоль оси световода. Цилиндрический трубчатый световод — капилляр со стенками, достаточно тонкими, чтобы проявлялись интерференционные явления при отражении излучения (снизу): *в* — поперечное сечение, *г* — схема распространения излучения вдоль оси ТС

ента отражения мы получаем за счет уменьшения угла скольжения при отражении лучей от поверхности с отрицательной кривизной. При отрицательной кривизне границы оптические потери световода снижаются более чем на порядок (в зависимости от других параметров конструкции). При наличии резонансной передачи энергии от моды сердцевинны в моды оболочки в зависимости от коэффициента связи может наблюдаться соответствующее локальное по длине волны возрастание или снижение оптических потерь. Это более тонкий эффект, который уже нельзя объяснить в лучевом приближении.

При распространении света по револьверным световодам доля мощности излучения, распространяющегося по материалу, из которого изготовлен световод (в данном случае — по кварцевому стеклу), составляет порядка  $10^{-4}$ . Это обстоятельство позволяет использовать РС с высокой эффективностью для транспортировки излучения в тех спектральных диапазонах, где кварцевое стекло характеризуется высокими оптическими потерями, например в среднем ИК-диапазоне.

Но свойства револьверных световодов зависят от значительного числа параметров. Поэтому при создании на основе РС рамановских лазеров в среднем ИК-диапазоне возникает задача поиска оптимальной конструкции световода для этой цели. Данная работа и посвящена рассмотрению этой проблемы.

Подобная задача для рамановских лазеров на обычных стеклянных световодах рассматривалась ранее в работе [10]. Было показано, что при некоторых приближениях КПД рамановского однокаскадного волоконного лазера выражается через значение некоторой функции параметров световода: оптических потерь на длине волны накачки  $\alpha(\lambda_p)$ , на длине волны стоксовой волны  $\alpha(\lambda_s)$  и коэффициента рамановского усиления волоконного световода  $g_0$  (например, в дБ/(м · Вт)) для рамановского преобразования  $\lambda_p \rightarrow \lambda_s$ :

$$P_F = \left( \sqrt{\frac{\alpha(\lambda_p)}{g_0}} + \sqrt{\frac{\alpha(\lambda_s)}{g_0}} \right). \quad (1)$$

Функция  $P_F$  выступает как некоторый параметр качества световода, используемого в роли активной рамановской среды. Поскольку при выводе выражения (1) для параметра качества  $P_F$  фактически не использовались свойства световода как световода с твердой сердцевиной, это выражение с равным основанием справедливо и для оценки качества рамановских световодов других конструкций, в частности РС, заполненных водородом. Физический смысл величины  $P_F$ , имеющей размерность мощности (Вт), заключается в следующем [10]: это величина пороговой мощности накачки для рамановского лазера на рассматриваемом волоконном световоде, помещенном в определенный высокодобротный резонатор. Поэтому чем меньше величина  $P_F$ , тем ближе световод по своим характеристикам к оптимальному для выбранного рамановского преобразования  $\lambda_p \rightarrow \lambda_s$ .

## 1. Предварительные оценки

Основная часть данной работы посвящена оценке качества револьверных световодов с полый сердцевиной на основе математического моделирования процесса распространения излучения по световодам различной геометрии и определения, таким образом, параметров РС. Поскольку корректное численное моделирование свойств револьверных световодов является достаточно сложной задачей, требующей сравнительно большого

времени вычислений, для разумного ограничения исследуемой области параметров РС нами предварительно выполнены процессы оптимизации рамановских световодов с полой сердцевиной на основе известных в литературе двух моделей СПС, доведенных до аналитических выражений для оптических потерь.

Это решение задачи о распространении излучения по полому световоду, представляющему собой цилиндрический канал в диэлектрике [7] (рис. 2, а и б), и модель цилиндрического трубчатого световода (ТС) с тонкими (анти)резонансно-отражающими стенками (выполненная в приближении одномерного световода) [8] (рис. 2, в, г). Обе модели можно считать предшественниками револьверных световодов. Полые световоды отличаются пониженным коэффициентом отражения излучения на границе сердцевина — оболочка, так как излучение отражается только от одной поверхности раздела, что приводит к высоким оптическим потерям. Трубчатые световоды характеризуются меньшими оптическими потерями, так как на границе сердцевина — оболочка имеет место (анти)резонансное увеличение коэффициента отражения (аналогично отражению от фильтра Фабри — Перо). Однако обе эти аналитические модели не учитывают эффект отрицательной кривизны границы сердцевина — оболочка в РС, который и теоретически, и экспериментально приводит к дополнительному (и значительному) снижению оптических потерь в РС по сравнению с трубчатыми и полыми световодами. Тем не менее модели полого и трубчатого световодов можно, по-видимому, использовать для определения ряда особенностей задачи до перехода к масштабному численному моделированию реальных револьверных световодов.

В качестве примера на рис. 3 (линия 1) показан рассчитанный спектр оптических потерь для РС из кварцевого стекла с диаметром полой сердцевины 77 мкм (расчет проведен для основной моды полой сердцевины, далее в тексте приводятся потери только основной моды световода). Потери в таком световоде в среднем ИК-диапазоне составляют порядка 100 дБ/м и более. Отметим, что максимум в области около длины волны 7.3 мкм связан с обращением в единицу действительной части показателя преломления

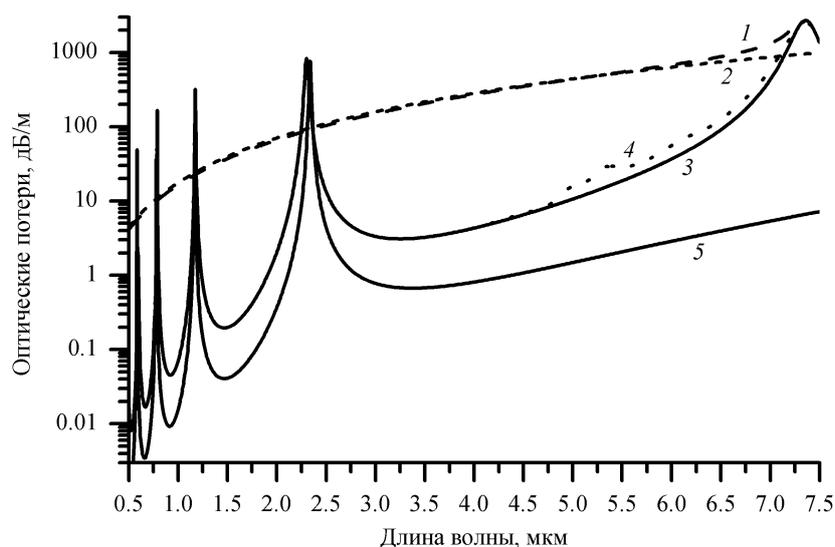


Рис. 3. Спектральные зависимости оптических потерь от длины волны в прямых модельных СПС: 1 — в РС из кварцевого стекла, 2 — в РС из халькогенидного стекла; в ТС из кварцевого стекла без учета (3) и с учетом (4) материальных потерь; 5 — в ТС из халькогенидного стекла. Для всех световодов диаметр полой сердцевины принят равным 77 мкм

кварцевого стекла. В этом случае отражение на границе стекло — воздух фактически исчезает, что ведет к резкому возрастанию потерь. Волоконный световод фактически отсутствует, и это справедливо для любой конструкции СПС из кварцевого стекла. В случае револьверного световода, но изготовленного из халькогенидного стекла (показатель преломления  $\approx 2.5$  в среднем ИК-диапазоне, см. [11], табл. 5.4), максимум оптических потерь на 7.3 мкм не наблюдается (рис. 3, линия 2).

Из-за резонансных свойств тонкой стеклянной стенки капилляра, ограничивающей полую сердцевину СПС в модели ТС, спектр оптических потерь световода (в отличие от ПС) имеет вид последовательности зон пропускания (рис. 3, линия 3 для световода из кварцевого стекла с диаметром полую сердцевину 77 мкм и толщиной стеклянной пленки 1.12 мкм без учета поглощения излучения в кварцевом стекле). Их границы определяются условием резонансного пропускания стеклянной цилиндрической пленки [9]. Минимумы оптических потерь достигаются приблизительно в центре зон, и значения оптических потерь на этих длинах волн значительно ниже, чем в ПС. Нулевая, самая длинноволновая, зона прозрачности ТС имеет ряд особенностей из-за значительного и немоного изменения комплексного показателя преломления кварцевого стекла в среднем ИК-диапазоне. Здесь так же, как и в случае ПС, наблюдается максимум поглощения на 7.3 мкм, который обусловлен не резонансными свойствами стенки световода, а тем, что действительная часть показателя преломления в этой области близка к единице. Поэтому волоконные световоды из кварцевого стекла с полую сердцевинной теряют свои волноводные свойства в окрестности  $\lambda \approx 7.3$  мкм, что нужно учитывать при интерпретации наблюдаемых в таких световодах оптических явлений [12].

Поглощение в кварцевом стекле на длинах волн около 4.5 мкм достигает уже порядка 3000 дБ/м, а в диапазоне 4.5–5 мкм наблюдается значительный дальнейший рост оптических потерь (до 50 000 дБ/м [1]), что дает дополнительный вклад в суммарные потери ТС. Если толщина стенки световода соответствует антирезонансному условию отражения на 4.4 мкм в нулевой зоне (самая тонкая стенка капилляра), то оптические потери в ТС с учетом поглощения в кварцевом стекле начинают заметно отличаться от только волноводных потерь световода начиная с длин волн около 4.7 мкм (рис. 3, линия 4). Наконец, ТС из халькогенидного стекла (рис. 3, линия 5) имеет оптические потери примерно на порядок ниже, чем такой же световод из плавленного кварца, и в нем нет области непрозрачности около 7.3 мкм.

При изменении толщины стенки капилляра в модели ТС положение зон прозрачности смещается и минимальные значения оптических потерь в световоде достигаются на различных длинах волн. Имеет смысл рассмотреть зависимость величины минимально достижимых оптических потерь в таком световоде для каждой длины волны (при соответствующей вариации толщины  $d$  стенки капилляра (см. рис. 2, в, г) [8]). На рис. 4 показана такая зависимость для кварцевого стекла без учета мнимой части показателя преломления (линия 1) и с учетом поглощения в кварцевом стекле при условии, что длина волны лежит в центре нулевой (линия 2) и второй (линия 3) зон прозрачности. Сравнение этих линий показывает, что материальные потери на коротких длинах волн могут быть несущественны, а в области более 4.7 мкм могут достигать величин порядка 1 дБ/м и более [13].

На рис. 4 приведена также аналогичная зависимость для револьверного световода из халькогенидного стекла (линия 5 получена при тех же условиях, что и линия 2 для КС). Здесь же для сравнения приведены рассчитанные спектры потерь для модели ПС из ХС (линия 4) и КС (линия 6). Следует заметить, что модель трубчатого свето-

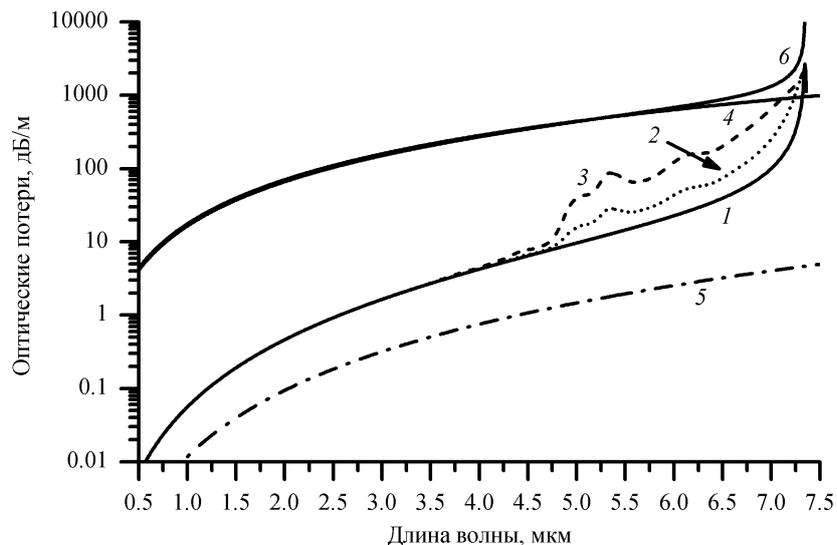


Рис. 4. Спектральные зависимости минимальных значений оптических потерь световодов от длины волны: 1 — для ТС из кварцевого стекла без учета поглощения в материале, 2 и 3 — с учетом материального поглощения (толщина стенки капилляра соответствует середине нулевой (2) и второй (3) зон прозрачности), 5 — для ТС из халькогенидного стекла; спектры потерь ПС из халькогенидного (4) и кварцевого (6) стекол. Для всех световодов диаметр поллой сердцевины принят равным 77 мкм

вода [8] в некоторой степени использует приближение плоского световода, что приводит к зависимости коэффициента оптических потерь от поляризации излучения. В круглом цилиндрическом ТС такая зависимость, разумеется, отсутствует. В этом случае использовались данные для поляризации, обладающей наименьшим затуханием. Для реального световода зависимость потерь от длины волны качественно ведет себя таким же образом, но может быть выше до одного порядка величины.

Таким образом, приведенные оценки показывают, что волоконные световоды из кварцевого стекла с поллой сердцевиной могут иметь оптические потери порядка 1 дБ/м до длин волн короче 4.7 мкм (подчеркнем, что применительно к РС приведенные на рис. 3 и 4 значения оптических потерь следует рассматривать как оценки сверху). В случае СПС из халькогенидного стекла собственные потери его в среднем ИК-диапазоне настолько малы, что практически не влияют на потери в СПС. Как видно на рис. 3 и 4, в спектрах оптических потерь СПС из халькогенидного стекла отсутствует дополнительный максимум на  $\lambda \sim 7.3$  мкм и общий уровень потерь ниже по сравнению с кварцевым световодом примерно на порядок величины из-за большего коэффициента отражения на каждой поверхности раздела воздух — стекло. Как и следовало ожидать, халькогенидные световоды позволяют в принципе получить СПС с существенно более низкими потерями в ИК-области. Но поскольку халькогенидное стекло значительно уступает кварцевому по технологическим качествам, на пути создания удовлетворительной технологии изготовления СПС из такого стекла имеется большое число проблем [11].

Известно, что для прямых (т. е. не изогнутых) полых и трубчатых световодов оптические потери зависят от диаметра поллой сердцевины как  $1/D^3$  и  $1/D^4$  соответственно [14]. Поэтому для прямых световодов этих типов параметр качества  $P_F$  пропорционален  $1/D$  для ПС и  $1/D^2$  для ТС. Следовательно, для прямых световодов оптимума по диаметру

полой сердцевины не существует — величина  $P_F$  тем меньше, чем больше  $D$ , и оптимальное максимальное значение  $D$  определяется только технологией изготовления и монтажом световода в рабочем состоянии.

Одним из основных преимуществ волоконных световодов является именно их способность компактного размещения (например, при намотке на катушку). Если предположить, что мы работаем со световодами типа ПС и ТС, намотанными на оправку определенного радиуса  $R$ , то потери в таких световодах увеличиваются за счет изгибных потерь, которые возрастают вместе с диаметром полой сердцевины  $D$ , и в зависимостях оптических потерь таких световодов (и параметра качества  $P_F$ ) от диаметра сердцевины  $D$  появляется минимум, определяющий оптимальный диаметр полой сердцевины световода (для потерь на каждой длине волны, вообще говоря, свой). На рис. 5 представлены

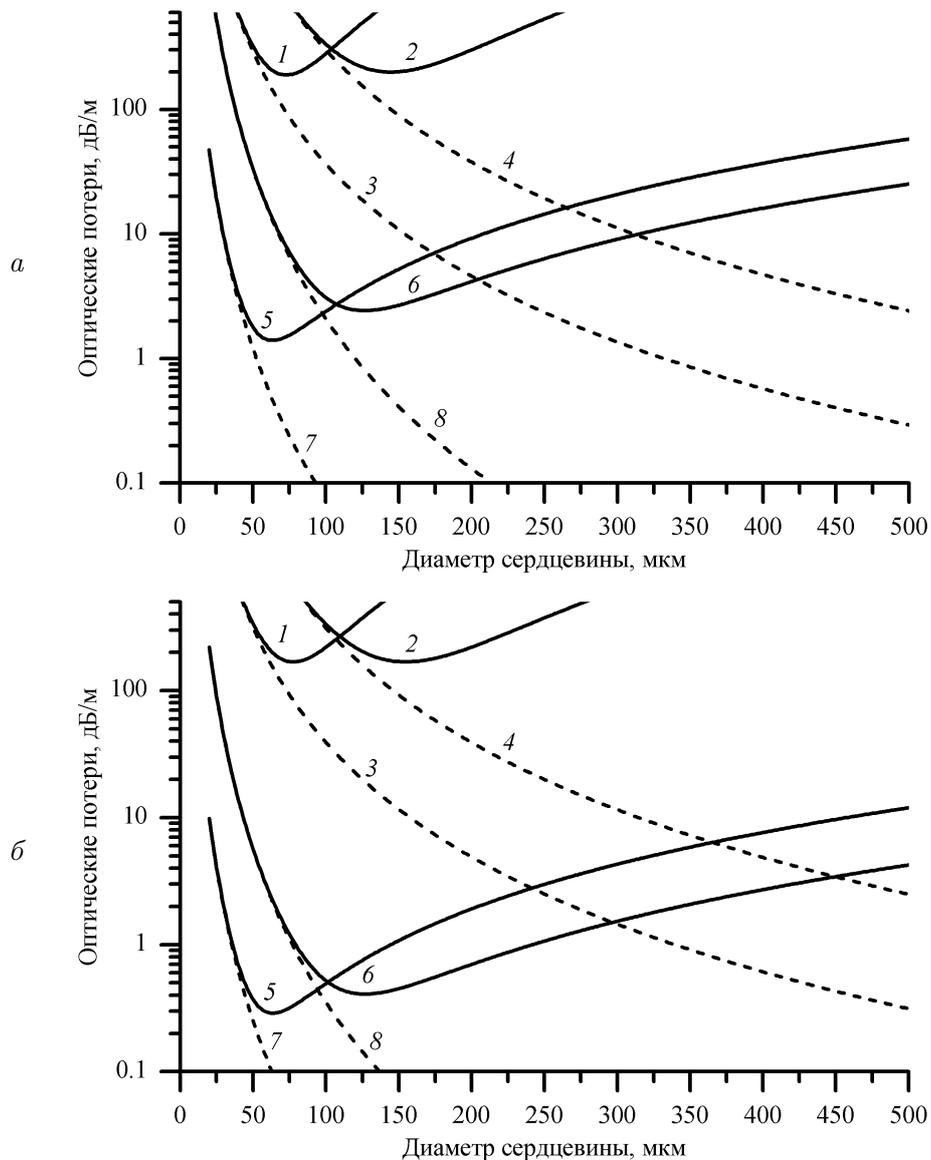


Рис. 5. Зависимость оптических потерь световодов, изготовленных из кварцевого (а) и халькогенидного (б) стекла, от диаметра сердцевины: для ПС на длине волны  $\lambda = 1.56$  мкм (линия 1) и  $\lambda = 4.4$  мкм (линия 2); для ТС на длине волны  $\lambda = 1.56$  мкм (линия 5) и  $\lambda = 4.4$  мкм (линия 6). Пунктиром (линии 3, 4, 7, 8) показаны зависимости без учета изгиба волокна

зависимости оптических потерь полого и трубчатого световодов из кварцевого и халькогенидного стекла от диаметра сердцевины для длины волны 1.56 и 4.4 мкм и радиуса намотки  $R = 15$  см.

Минимальные потери в световодах достигаются при различных диаметрах полой сердцевины для различных длин волн. Так, для полых световодов из кварцевого стекла минимуму оптических потерь соответствуют значения  $D_{\min}(1.56 \text{ мкм}) = 73 \text{ мкм}$  и  $D_{\min}(4.4 \text{ мкм}) = 145 \text{ мкм}$ , из халькогенидного стекла  $D_{\min}(1.56 \text{ мкм}) = 78 \text{ мкм}$  и  $D_{\min}(4.4 \text{ мкм}) = 155 \text{ мкм}$ ; для трубчатых световодов из кварцевого стекла  $D_{\min}(1.56 \text{ мкм}) = 63 \text{ мкм}$  и  $D_{\min}(4.4 \text{ мкм}) = 129 \text{ мкм}$ , из халькогенидного  $D_{\min}(1.56 \text{ мкм}) = 64 \text{ мкм}$  и  $D_{\min}(4.4 \text{ мкм}) = 126 \text{ мкм}$ .

Для определения оптимального диаметра сердцевины для рамановского лазера 1.56  $\rightarrow$  4.4 мкм воспользуемся расчетом зависимости величины  $P_F(D)$  по выражению (1). На рис. 6 представлены зависимости  $P_F(D)$  для кварцевых и халькогенидных СПС обоих типов световодов с радиусом кривизны намотки  $R = 15$  см. Считалось, что световод заполнен молекулярным легким водородом ( $^1\text{H}_2$ ) под давлением 30 атм, коэффициент рамановского усиления в  $^1\text{H}_2$  принят равным 1.2 см/ГВт [15]. Минимум  $P_F$  в кварцевом трубчатом световоде достигается при  $D \approx 75 \text{ мкм}$  и составляет 700 Вт. В трубчатом световоде из халькогенидного стекла минимум достигается примерно при том же диаметре и составляет 126 Вт. В полых световодах минимумы достигаются также при 75 мкм с точностью до 1 мкм, но значения  $P_F$  в минимуме для этого случая достигают  $10^5$  Вт.

Таким образом, в полном световоде минимальное значение пороговой мощности накачки в рамановском лазере на водороде для возникновения генерации на 4.4 мкм составляет практически нереальные 75 кВт. Такое высокое значение  $P_F$  обусловлено резким возрастанием оптических потерь в световоде при изгибе. В трубчатых световодах минимум достигается примерно при том же диаметре сердцевины, но он составляет около 700 Вт для световодов из кварцевого стекла. Потенциальный переход к халькоге-

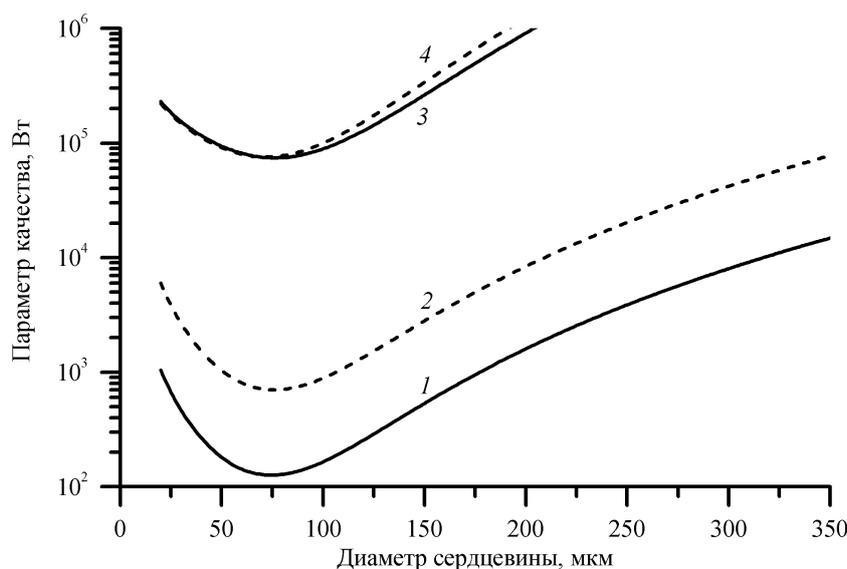


Рис. 6. Зависимость параметра качества рамановского трубчатого (линии 1 и 2) и полого (линии 3 и 4) световодов, заполненных водородом при давлении 30 атм, от диаметра полой сердцевины; для световодов из халькогенидного (линии 1 и 3) и кварцевого (линии 2 и 4) стекла

нидному стеклу позволит снизить величину  $P_F$  примерно в 6 раз. Представляет интерес тот факт, что, несмотря на различие оптических потерь в световодах обоих типов примерно на два порядка и различия в свойствах стекол, значения оптимальных диаметров сердцевины световодов достаточно близки. В револьверных световодах по сравнению с трубчатыми включается еще один механизм снижения оптических потерь — отрицательная кривизна границы сердцевина — оболочка. Результатом этого является дальнейшее снижение потерь на порядок и более, но оптимальный диаметр сердцевины световода, по-видимому, надо начинать искать в окрестности  $D = 75$  мкм.

## 2. Исследование реальных схем револьверных световодов

С целью сравнительного анализа РС для рамановского водородного лазера  $1.56 \rightarrow 4.4$  мкм (РВЛ) выполнено численное моделирование оптических свойств полых РС в зависимости от значений их геометрических параметров. Моделирование проводилось методом конечных элементов в частотной области с помощью пакета Femlab 3.1. Поскольку сечение идеального РС не меняется вдоль оси световода, распределение электрического поля ищется в виде бегущей вдоль оси волны. Для определения оптических свойств полых револьверных световодов решалась двумерная задача (для сечения РС) на собственные значения. Расчетная область снаружи была ограничена областью идеально согласованных слоев (Perfect Matched Layers) и условием идеального проводника ( $n \times E = 0$ ). Основной считалась мода с наименьшими потерями — мода LP<sub>01</sub>. Как указывалось выше и в работах [2, 3], именно на РС возможно создание эффективных рамановских волоконных газовых лазеров в среднем ИК-диапазоне.

В процессе оптимизации рассматривались следующие параметры револьверных световодов: число капилляров в оболочке  $N$ , толщина стенки капилляра оболочки  $d$ , минимальное расстояние между стенками соседних капилляров оболочки  $t$ , диаметр полый сердцевины  $D$  (максимальный диаметр окружности, вписанной в сердцевину РС) и показатель преломления стекла  $n$ . Капилляры оболочки погружены на глубину 0.1 мкм во внешнюю трубу с толщиной стенки 7 мкм, которая ограничена областью идеально согласованных слоев. Для нахождения оптимальной конструкции световода, необходимой для успешной реализации РВС, промоделировано несколько типов РС с оболочкой, состоящей из одного слоя капилляров, изготовленных из кварцевого и мягкого халькогенидного стекла с химическим составом типа As<sub>2</sub>S<sub>3</sub>.

Анализ оптических свойств револьверных световодов, изготовленных из КС, проводился для случая  $N = 10, 9, 8$  и  $7$  капилляров в оболочке. Реальная часть показателя преломления стекла на длине волны 4.4 мкм составляет  $n = 1.372$ . Материальные потери КС на данной длине волны составляют 3372 дБ/м. Параметры РС подбирались таким образом, чтобы длина волны 4.4 мкм находилась в нулевой зоне пропускания (в самой длинноволновой зоне), в то время как длина волны накачки 1.56 мкм приходилась на первую зону пропускания. При выборе зон пропускания более высокого порядка для  $\lambda = 4.4$  мкм велика вероятность (по технологическим причинам) при изготовлении световода из-за разброса толщины стенки капилляров  $d$  попасть в область больших потерь для  $\lambda = 1.56$  мкм (так как с увеличением номера зоны пропускания ее ширина заметно уменьшается). Значение толщины стенки капилляра  $d$  определяет ширину и положение зон прозрачности в РС.

Процесс оптимизации толщины стенки капилляра  $d$  заключался в том, чтобы выбранная толщина отвечала минимальному значению потерь РС на стоксовой длине

волны (в нулевой зоне пропускания). При этом зависимость оптических потерь сравнительно плавно зависит от  $d$  при фиксированных  $N$ ,  $t$ ,  $D$ ,  $n$  и  $\lambda$ , за исключением случаев существования дополнительных резонансов из-за связи мод полой сердцевины с модами оболочки. Поэтому для уменьшения этих резонансов также рассматривались случаи с различным расстоянием между капиллярами  $t$ . В то же время полагалось, что выбранная толщина стенки капилляра  $d$  оболочки хоть и должна иметь значение, помещающее длину волны накачки в первую зону пропускания, но не обязательно именно в ее минимум. Это оправдано тем, что волноводные потери РС из кварцевого стекла в области длины волны 1.56 мкм очень малы, как, впрочем, и материальные потери КС.

Проведенный анализ показал, что наиболее оптимальной структурой для реализации РВС является структура РС с  $N = 7$ : семикапиллярный РС из кварцевого стекла. Для того чтобы убедиться в этом, выполнены расчеты потерь в нулевой и первой зонах пропускания в зависимости от толщины стенки капилляра (расчет проводился только в области антирезонансного отражения стенки капилляра) при трех значениях расстояния между ними (0.1, 1 и 5 мкм). Кривые потерь для РС с десятью, девятью и восемью капиллярами в оболочке имели резонансный характер, т. е. внутри зон прозрачности имели дополнительные локальные по длине волны повышения оптических потерь, обусловленные резонансной передачей энергии между основной модой полой сердцевины и модой оболочки, захватывающей все капилляры [16]. Только при сравнительно большом расстоянии между капиллярами ( $t = 5$  мкм) резонансные особенности кривых потерь исчезали. Но при этом из-за увеличения  $t$  возросли волноводные потери в РС за счет проникновения излучения мод полой сердцевины в пространство между капиллярами. Кривые потерь РС с семью капиллярами в оболочке имеют безрезонансный характер как при малых расстояниях между капиллярами, так и при больших. Это позволяет иметь технологические преимущества в виде дополнительных допусков при изготовлении таких РС. Кроме того, при  $N = 7$  потери возрастают незначительно при увеличении расстояния между капиллярами оболочки.

Аналогичный анализ проведен для револьверных световодов из халькогенидного стекла. В этом случае длина стоксовой волны приходилась также на нулевую зону пропускания, в то время как длина волны накачки помещалась в первую или во вторую зону пропускания в зависимости от толщины стенки капилляра. Так как реальная часть показателя преломления рассматриваемого ХС равна 2.41 (при этом мнимая часть мала и соответствует величине оптических потерь порядка нескольких дБ/м на длине волны 4.4 мкм), для того чтобы получить положение длины стоксовой волны в нулевой зоне, необходимо уменьшить толщину стенки капилляра оболочки (по сравнению с РС из кварцевого стекла). Такое уменьшение толщины стенки капилляра неизбежно должно приводить к дополнительным сложностям в процессе их изготовления. Поэтому нами и рассматривался вариант с длиной волны накачки во второй зоне прозрачности.

Проведена оптимизация геометрических параметров РС из халькогенидного стекла и показано, что наиболее подходящим световодом для РВС в этом случае также является семикапиллярный световод, поскольку имеет безрезонансные кривые потерь как при малых (0.1 мкм), так и при больших (5 мкм) расстояниях между капиллярами оболочки. Величины  $t > 5$  мкм нами не рассматривались, так как дальнейшее увеличение  $t$  ведет к возрастанию волноводных потерь.

Рассмотрим далее зависимости потерь для РС из кварцевого и халькогенидного стекла с оболочкой из семи капилляров в зависимости от величины диаметра полой сердцевины. С точки зрения технологии наиболее оптимальным является РС с наи-

большим расстоянием между капиллярами (для того чтобы предотвратить их слипание в процессе вытяжки), поэтому в расчете расстояние между капиллярами оболочки было 5 мкм, толщина стенки капилляра 1.29 мкм (для РС из КС). В случае РС из халькогенидного стекла расстояние между капиллярами также было 5 мкм, в то время как толщина стенки равна 0.6 мкм.

На рис. 7 показаны зависимости потерь для РС с семью капиллярами в оболочке в зависимости от диаметра полой сердцевины. При изменении диаметра сердцевины толщина стенок капилляра поддерживалась постоянной (чтобы фиксировать положение зон пропускания световода), а диаметр капилляров изменялся таким образом, чтобы оставалась постоянной величина зазора между капиллярами  $d$ . Кроме того, полагалось, что ось световода является прямой линией (т. е. световод не имеет изгиба). Из рис. 7 видно, что потери световода из ХС на длине волны 4.4 мкм ниже, чем в случае РС из КС, и это различие нарастает с увеличением диаметра сердцевины РС. На длине волны накачки наблюдается обратная ситуация. Такая малая разница в величине потерь на длине волны 4.4 мкм при столь большом различии в материальных потерях КС и объясняется сравнимыми волноводными потерями в РС из ХС и КС. Кроме того, разница в потерях на длине волны 1.56 мкм объясняется еще и тем, что в обоих случаях параметры структуры РС подбирались исходя из того, что на длине волны 4.4 мкм (в нулевой зоне пропускания) должны были быть минимальные потери. Поэтому длина волны накачки 1.56 мкм (в следующей зоне пропускания) могла попадать не в минимум потерь соответствующей зоны пропускания.

Таким образом, для дальнейшей оптимизации была выбрана конструкция РС с семью капиллярами в оболочке, расстояние между которыми составляло 5 мкм, а толщина стенки капилляра обеспечивала попадание длин волн накачки и генерации в области низких потерь соответствующих зон прозрачности световода. При вариации диаметра сердцевины изменялся диаметр капилляров в отражающей оболочке. При возрас-

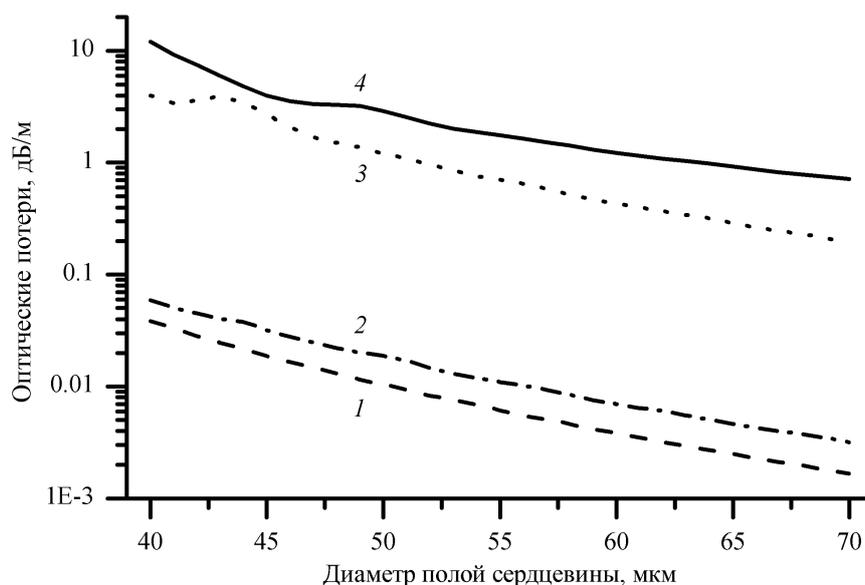


Рис. 7. Зависимость оптических потерь семикапиллярного РС из кварцевого (линии 1 и 4) и халькогенидного (линии 2 и 3) стекла от диаметра полой сердцевины на длине волны накачки 1.56 мкм (линии 1 и 2) и длине стоксовой волны 4.4 мкм (линии 3 и 4). Расстояние между стенками капилляров 5 мкм

тании  $D$ , например, от 40 до 70 мкм внешний диаметр каждого из семи капилляров увеличивался от 14 до 45 мкм. Оптимизация же по диаметру полой сердцевины проводилась следующим образом.

Как следует из предварительного рассмотрения, для прямого световода с полой сердцевиной в качестве активного элемента рамановского газового лазера не существует оптимального диаметра полой сердцевины: теоретически, чем больше диаметр, тем лучше. В действительности применение прямого световода технически сложно, а при создании РС с большими диаметрами возникают большие технологические трудности. Если же световод используется обычным образом, т. е. намотан на катушку или в бухту, то ситуация с оптимальным диаметром сердцевины существенно изменяется. В предположении, что световод намотан на катушку диаметром 30 см ( $R = 15$  см), были вычислены величины оптических потерь РС на длинах волн накачки (1.56 мкм) и стоксовой компоненты (4.4 мкм) (рис. 8). Полученные таким образом данные, а также коэффициент рамановского усиления РС (1.2 см/ГВт), заполненного молекулярным легким водородом ( $^1\text{H}_2$ ) под давлением 30 атм, использовались для вычисления параметра качества  $P_F$ . На рис. 8 представлена зависимость оптических потерь в револьверном световоде от диаметра сердцевины.

Минимальное значение оптических потерь на длине волны 4.4 мкм для обоих типов револьверных световодов (КС и ХС) достигается примерно при  $D = 100$  мкм, при этом потери световода из ХС в несколько раз ниже, чем из КС. Минимальное значение оптических потерь на длине волны накачки приходится на диаметр полой сердцевины около 50 мкм в обоих случаях. Следует отметить, что значения  $D$ , при которых достигаются минимальные потери на длине волны как 4.4 мкм, так и 1.56 мкм, находятся в хорошем согласии с результатами оценки по модели ТС. Это говорит о том, что модель трубчатого световода довольно хорошо описывает некоторые волноводные свойства РС с большим диаметром полой сердцевины. Общий уровень же потерь РС значительно

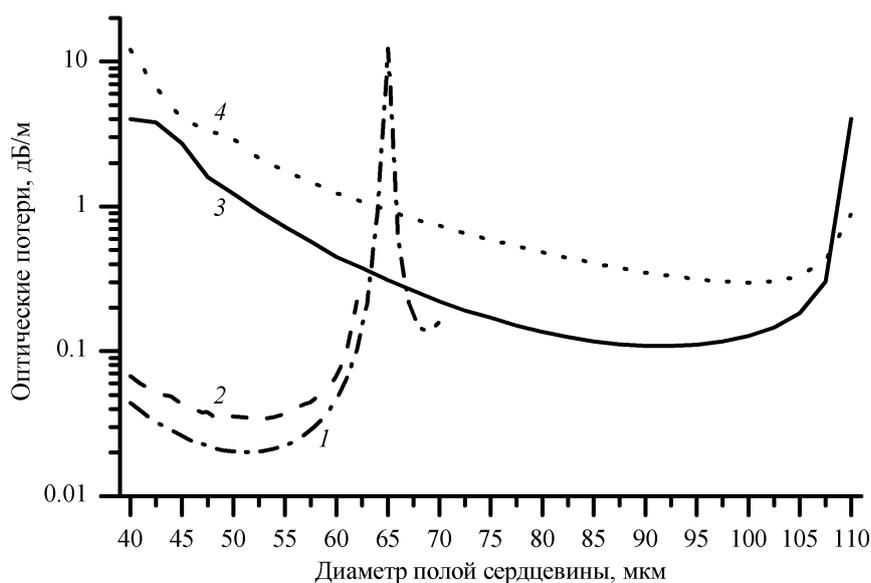


Рис. 8. Зависимости потерь семикапиллярного РС из кварцевого (линии 1 и 4) и халькогенидного (линии 2 и 3) стекла от диаметра полой сердцевины на длине волны накачки 1.56 мкм (линии 1 и 2) и длине стоксовой волны 4.4 мкм (линии 3 и 4) при изгибе световода с радиусом 15 см

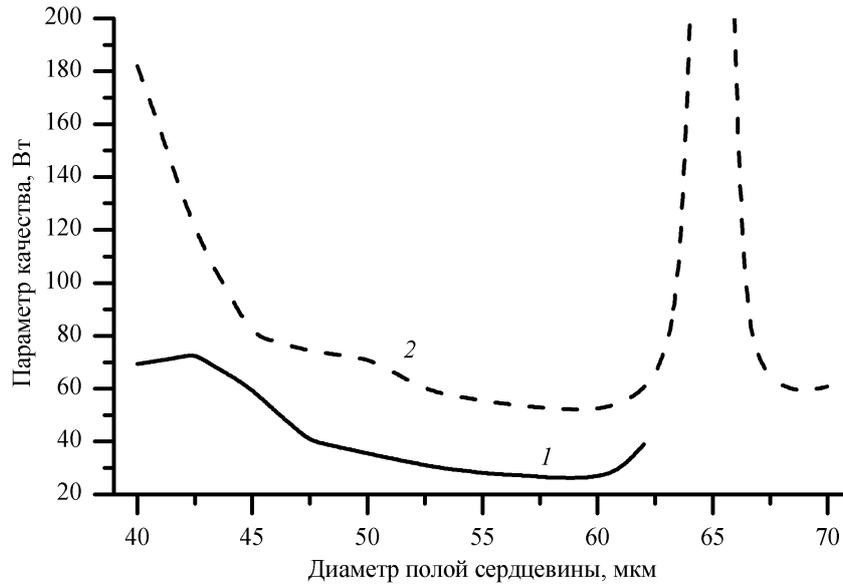


Рис. 9. Зависимость величины параметра качества семикапиллярного РС, заполненного водородом при 30 атм, из халькогенидного (линия 1) и кварцевого (линия 2) стекла, от диаметра полой сердцевины

ниже, чем в случае полого и трубчатого световодов, здесь сказывается введение отрицательной кривизны границы сердцевины — оболочки. Резонансный пик, наблюдаемый в зависимости потерь на длине волны накачки от  $D$ , связан с возбуждением моды полости капилляра при изгибе световода [16].

Теперь, подставляя полученные данные в выражение (1) для параметра качества РС, получаем зависимость  $P_F(D)$  для реального световода, представленную на рис. 9. Как видно из рисунка, величина параметра качества для РС из обоих типов стекла достигает минимума в области значений диаметра полой сердцевины 60 мкм, что примерно совпадает с аналогичным значением для трубчатого и полого световодов. В то же время сама величина параметра качества для револьверного световода из КС приблизительно на три порядка ниже, чем в случае ПС, и в 15 раз меньше, чем в случае ТС. Для РС из халькогенидного стекла разница в параметре качества по сравнению с ПС примерно такая же, а в случае ТС меньше приблизительно в два раза. Резонансный пик в зависимостях величины параметра качества связан с тем же возбуждением моды полости капилляра при изгибе, которая была описана выше.

## Выводы

Если сравнить приведенные результаты с результатами, полученными на модели ТС (которая наиболее близка к РС из двух рассмотренных), то можно утверждать, что величина  $P_F$  (т. е. порог для РВЛ) для револьверных световодов из обоих видов стекла значительно снижается. Это 50–60 Вт для световода из КС вместо 700 Вт в модели ТС и 20 Вт для световода из ХС вместо 120 Вт в модели ТС. Таким образом, полученные результаты показывают, что отрицательная кривизна границы сердцевины — оболочки приводит к значительному (до порядка величины) снижению  $P_F$ , который в нашем случае является мерой пороговой накачки соответствующего рамановского

лазера  $1.56 \rightarrow 4.4$  мкм. Эти результаты могут быть использованы в качестве исходных данных для создания рамановского волоконного водородного лазера среднего ИК-диапазона с высокой эффективностью и низким значением пороговой мощности накачки (минимальное значение пороговой мощности в рамановском лазере такого типа на РС, достигнутое в экспериментах, составило 270 Вт [15]).

Некоторое усложнение задачи в случае револьверных световодов — проявление резонансной зависимости оптических потерь от изгиба для обоих типов РС. Но при расчете параметров РС с достаточной точностью в процессе изготовления световода всегда возможно избежать выхода размеров световода в область проявления изгибных резонансных потерь.

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

## Список литературы / References

- [1] Pryamikov, A.D., Kosolapov, A.F., Alagashev, G.K., Kolyadin, A.N., Vel'miskin, V.V., Biriukov, A.S., Bufetov, I.A. Hollow-core microstructured “revolver” fibre for the UV spectral range // *Quantum Electronics*. 2016. Vol. 46, No. 12. P. 1129–1133.
- [2] Gladyshev, A.V., Kolyadin, A.N., Kosolapov, A.F., Yatsenko, Yu.P., Pryamikov, A.D., Biriukov, A.S., Bufetov, I.A., Dianov, E.M. Efficient  $1.9 \mu\text{m}$  Raman generation in a hydrogen-filled hollow-core fiber // *Quantum Electronics*. 2015. Vol. 45, No. 9. P. 807–812.
- [3] 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. Raman generation in  $2.9\text{--}3.5 \mu\text{m}$  spectral range in revolver hollow-core silica fiber filled by  $\text{H}_2/\text{D}_2$  mixture // *Proc. of the Conf. on Lasers and Electro-Optics*. San Jose, 2017. Paper STu1K.2.
- [4] Pryamikov, A.D., Biriukov, A.S., Kosolapov, A.F., Plotnichenko, V.G., Semjonov, S.L., Dianov, E.M. Demonstration of a waveguide regime for a silica hollow-core microstructured optical fiber with a negative curvature of the core boundary in the spectral region  $> 3.5 \mu\text{m}$  // *Optics Express*. 2011. Vol. 19, iss. 2. P. 1441–1448.
- [5] Kolyadin, A.N., Kosolapov, A.F., Pryamikov, A.D., Biriukov, A.S., Plotnichenko, V.G., Dianov, E.M. Light transmission in negative curvature hollow core fiber in extremely high material loss region // *Optics Express*. 2013. Vol. 21, iss. 8. P. 9514–9519.
- [6] Gregan, R.F., Mangan, B.J., Knight, J.C., Birks, T.A., Russell, P.St.J., Roberts, P.J., Allan, D.C. Single mode photonic band gap guidance of light in air // *Science*. 1999. Vol. 285, iss. 5433. P. 1537–1539.
- [7] Marcatili, E.A.J., Schmeltzer, R.A. Hollow metallic and dielectric waveguides for long distance optical transmission and lasers // *Bell Syst. Tech. J.* 1964. Vol. 43. P. 1783–1809.
- [8] Miyagi, M. Bending losses in hollow and dielectric tube leaky waveguides // *Appl. Optics*. 1981. Vol. 20, iss. 7. P. 1221–1229.
- [9] Litchinitser, N.M., Abeeluck, A.K., Headley, C., Eggelton, B.J. Antiresonant reflecting photonic crystal optical waveguides // *Optics Letters*. 2002. Vol. 27, iss. 18. P. 1592–1594.

- [10] **Буфетов И.А., Дианов Е.М.** Простая аналитическая модель непрерывного многокаскадного ВКР-лазера на волоконном световоде // Квантовая электроника. 2000. Т. 30, № 10. С. 873–877.  
**Bufetov, I.A., Dianov, E.M.** A simple analytic model of a cw multicascade fibre Raman laser // Quantum Electronics. 2000. Vol. 30, No. 10. P. 873–877.
- [11] **Adam, J.-L., Zhang, X.** Chalcogenide glasses. Preparation, properties and applications. Oxford; Cambridge; Philadelphia; New Delhi: Woodhead Publ., 2014. 714 p.
- [12] **Benoît, A., Beaudou, B., Alharbi, M., Debord, B., Gerome, F., Salin, F., Benabid, F.** Over-five octaves wide Raman combs in high-power picosecond-laser pumped H<sub>2</sub>-filled inhibited coupling Kagome fiber // Optics Express. 2015. Vol. 23, iss. 11. P. 14002–14009.
- [13] **Gattass, R.R., Rhonehouse, D., Gibson, D., McClain, C.C., Thapa, R., Nguyen, V.Q., Bayya, S.S., Weiblen, R.J., Menyuk, C.R., Shaw, L.B., Sanghera, J.S.** Infrared glass-based negative-curvature antiresonant fibers fabricated through extrusion // Optics Express. 2016. Vol. 24, iss. 22. P. 25697–25703.
- [14] **Желтиков А.М.** Цвета тонких пленок, антирезонансные явления в оптических системах и предельные потери собственных мод полых световодов // Успехи физ. наук. 2008. Т. 178, № 6. С. 619–629.  
**Zheltikov, A.M.** Colors of thin films, antiresonance phenomena in optical systems, and the limiting loss of modes in hollow optical waveguides // Physics-Uspekhi. 2008. Vol. 51. P. 591–600.
- [15] **Gladyshev, A.V., Kolyadin, A.N., Kosolapov, A.F., Yatsenko, Yu.P., Pryamikov, A.D., Biriukov, A.S., Bufetov, I.A., Dianov, E.M.,** Low-threshold 1.9  $\mu\text{m}$  Raman generation in microstructured hydrogen-filled hollow-core revolver fibre with nested capillaries // Laser Physics. 2017. Vol. 27, No. 2. Paper 025101.
- [16] **Alagashev, G.K., Pryamikov, A.D., Kosolapov, A.F., Kolyadin, A.N., Lukovkin, A.Yu., Biriukov, A.S.** Impact of geometrical parameters on the optical properties of negative curvature hollow core fibers // Laser Physics. 2015. Vol. 25. Paper 055101.

*Поступила в редакцию 31 октября 2017 г.*

### **Mathematical modeling of the revolver optical fibers and the optimal optical fiber design for a Raman laser 1.56 $\rightarrow$ 4.4 $\mu\text{m}$**

PRYAMIKOV, ANDREY D.\*, ALAGASHEV, GRIGORIY K., BUFETOV, IGOR A.

Fiber Optics Research Center RAS, Moscow, 119333, Russia

\*Corresponding author: Pryamikov, Andrey D., e-mail: pryamikov@mail.ru

In this paper the results of numerical simulations for the optical properties of hollow core revolver fibers are presented. During the simulations the following fiber parameters such as air core diameter, thickness of the cladding capillary wall, minimal distance between the cladding capillaries, number of the cladding capillaries were optimized. The aim of the optimization was to determine an optimal fiber construction that can allow to create Raman fiber laser filled with hydrogen for the mid IR spectral range. The wavelength conversion occurring in this process is 1.56  $\mu\text{m} \rightarrow$  4.4  $\mu\text{m}$ . The same simulation was carried out for simple hollow core waveguide structures such as glass

capillary to compare their optical properties with the ones of the hollow core revolver fibers. Two types of the glass were used in the simulations, namely, silica glass and chalcogenide glass.

Based on the simulations the dependence for the figure of merit (value of the pump threshold power for the Raman fiber laser ( $1.56 \mu\text{m} \rightarrow 4.4 \mu\text{m}$ )) on the air core diameter were calculated for the hollow core revolver fibers, glass capillaries and cylindrical bore in the endless piece of glass. Comparing the results obtained for the hollow core revolver fibers and for the glass capillaries or cylindrical bore in the endless piece of the glass it is possible to state that the pump power threshold for the Raman fiber laser is significantly lower in the case of revolver fibers in comparison with other considered waveguide microstructures. The obtained results can be used for design of high efficiency Raman fiber laser filled with hydrogen for the mid IR spectral range.

*Keywords:* Hollow optical fibers, mid-infrared Raman laser generation, optimization of the revolver optical fiber design.

**Acknowledgements.** This research was partly supported by RFBR (grants No. 15-02-08840-A and 15-02-99688-A) as well as basic research programs of the Presidium RAS (No. I.25P “Fundamental and applied problems of photonics and physics of new optical materials”).

*Received 31 October 2017*