

УДК 57.621.383; 61.621.383

Ю.Н. Мамыкина¹, М.В. Ременникова², В.Г. Беспрозванных¹

¹Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

²Пермская научно-производственная приборостроительная
компания, Пермь, Россия

РАЗРАБОТКА ВКР-ЛАЗЕРА С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ 1,27 МКМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКИХ ПРИЛОЖЕНИЙ

В работе представлена экспериментальная схема волоконного иттербиевого лазера с ВКР-преобразователем, измерены её оптические характеристики и предложено новое решение по улучшению её параметров. Произведён расчёт выходной мощности, КПД лазера и оптимальной длины фосфоросиликатного световода для ВКР-лазера. Получена зависимость выходной мощности от длины активного световода при различных вариациях коэффициентов отражения выходной решётки на длину волны 1200 нм и сосредоточенных потерь.

Ключевые слова: волоконный лазер, сосредоточенные потери, синглетный кислород, численная модель ВКР-лазера, ВКР-преобразование.

Yu.N. Mamykina¹, M.V. Remennikova², V.G. Besprozvannykh¹

¹Perm National Research Polytechnic University,
Perm, Russian Federation

²Perm Scientific and Production Instrument Making
Company, Perm, Russian Federation

DEVELOPMENT OF A WRC LASER WITH 1,27 MICRONS WAVELENGTH FOR MEDICAL APPLICATIONS

In this paper an experimental scheme of a fiber ytterbium laser with a WRC converter is introduced, its optical characteristics are measured and new solution for improving its parameters is proposed. The calculation of the output power, the efficiency of the laser and the optimal length of the phosphor silicate light guide for a single-stage WRC laser has been performed. The dependence of the output power on the length of the active fiber is obtained for different variations of the reflection coefficients of the output grating at a wavelength of 1200 nm and concentrated losses.

Keywords: fiber laser, concentrated losses, singlet oxygen, numerical model of a single-stage WRC laser, WRC transformation.

Введение

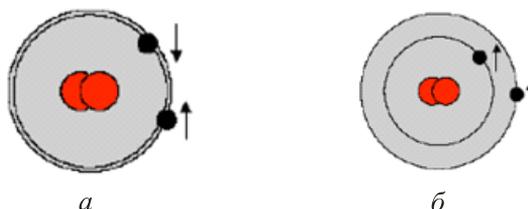
В настоящее время лазерные источники излучения достаточно широко применяются в медицинской практике благодаря своим уникальным свойствам, таким как высокая степень монохроматичности,

временной и пространственной когерентности, значительная спектральная интенсивность, малая угловая расходимость, возможность регулировки длительности воздействия (непрерывное, импульсное). Лазерная медицина включает воздействие лазерного излучения на различные части тела и имеет непосредственное отношение к решению ряда глобальных проблем: рак, СПИД и т.д. [1, 2].

Для целого ряда методов лазерной медицины недостаточно иметь источники, работающие на фиксированной длине волны излучения. Нелинейно-оптическое преобразование частоты излучения позволяет значительно расширить возможности лазерной медицинской техники: увеличить рабочий диапазон длин волн за счет их непрерывной перестройки в широкой области, эффективно усиливать излучение малой мощности, существенно сокращать длительность (до единиц фемтосекунд), уменьшать ширину линии (до единиц и долей Гц), увеличивая тем самым длину когерентности лазера (до сотен километров) [3].

Одним из быстроразвивающихся направлений применения лазеров в медицине, где требуется перестройка длины волны излучения, является фотодинамическая (ФД) терапия.

Основным фактором ФД воздействия являются активные формы молекул, которые постоянно образуются в аэробных клетках (рис. 1).



Электроны спарены.
Молекула водорода
в синглетном состоянии

Электроны не спарены.
Молекула водорода
в триплетном состоянии

Рис. 1. Метастабильные состояния молекулы водорода

Одной из таких активных форм является синглетный кислород. Использование лазеров позволяет перевести кислород в возбуждённое состояние при непосредственном облучении. Разница энергий между основным состоянием и синглетным кислородом составляет 94,2 кДж/моль (0,98 эВ на молекулу), что соответствует переходу в

ближнем ИК-диапазоне (около 1,27 мкм). Первое возбуждённое состояние ($^1\Delta_g$) показано на рис. 2. На данный момент к методу лазерного возбуждения синглетного кислорода можно отнести метод прямой оптической накачки растворенного молекулярного кислорода излучением ВКР-лазеров в полосу поглощения на длине волны около 1,27 мкм [4, 5]. Поскольку переход является очень узким, то требуется точная подстройка длины волны лазерного излучения для эффективного возбуждения синглетного кислорода.

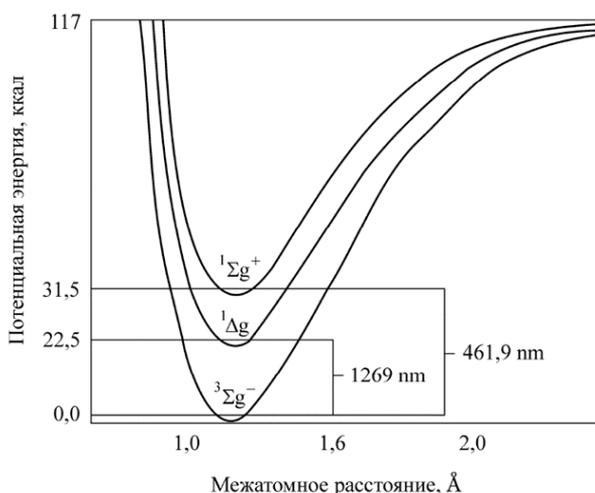


Рис. 2. Кривые потенциальной энергии для трёх низших состояний молекулярного кислорода [6]

В работе [7] реализован волоконный ВКР-лазер для медицинских применений мощностью 1 Вт, генерирующий ИК-излучение с длиной волны 1,45 мкм. В сравнении с другими ВКР-лазерами отмечаются недостатки использованной составной схемы лазера (низкая эффективность системы накачки).

Цель предлагаемой работы: на основе анализа научно-технических проблем и инноваций, связанных с применением лазерных технологий и волоконной оптики в медицине, разработать схему, провести экспериментальное исследование и математическое моделирование волоконного лазера с длиной волны 1,27 мкм с использованием нелинейно-оптического эффекта вынужденного комбинационного рассеяния.

1. Экспериментальная часть

Для реализации схемы ВКР-лазера (рис. 3) был собран и исследован иттербиевый лазер накачки.

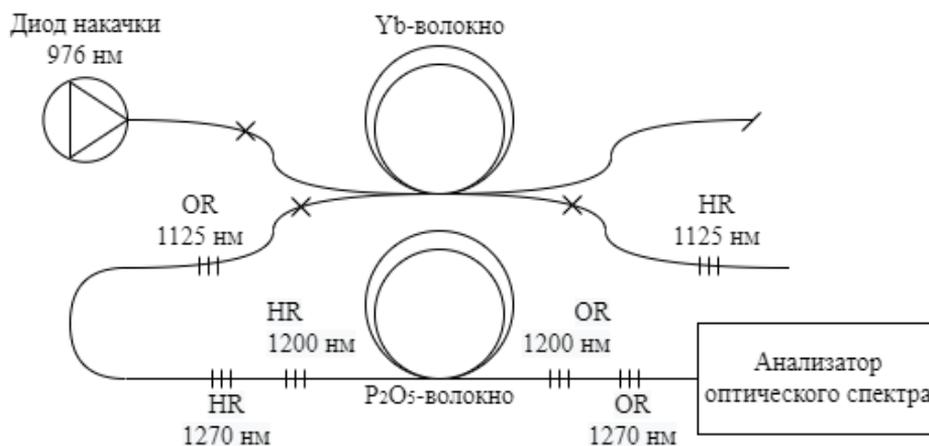


Рис. 3. Общая схема ВКР-лазера

Для накачки иттербиевого световода использован лазерный диод BWT с многомодовым волоконным выходом (105/125 мкм). Технические характеристики данного источника излучения указаны в табл. 1. Было проведено измерение выходной мощности излучения в зависимости от тока накачки. Ватт-амперная характеристика представлена на рис. 4. Длина волны лазерного диода накачки измерена с помощью анализатора оптического спектра Yokogawa 6370D. Диод накачки имеет стабильную по времени длину волны накачки и высокую выходную мощность излучения.

Таблица 1

Характеристики диода накачки

Центральная длина волны, нм	976
Выходная мощность, Вт	50,43
Спектральная ширина, нм	0,40
Пороговое значение тока, А	0,97
Рабочий ток, А	11,98
Напряжение, В	9,13
Рекомендуемая температура корпуса, °С	25

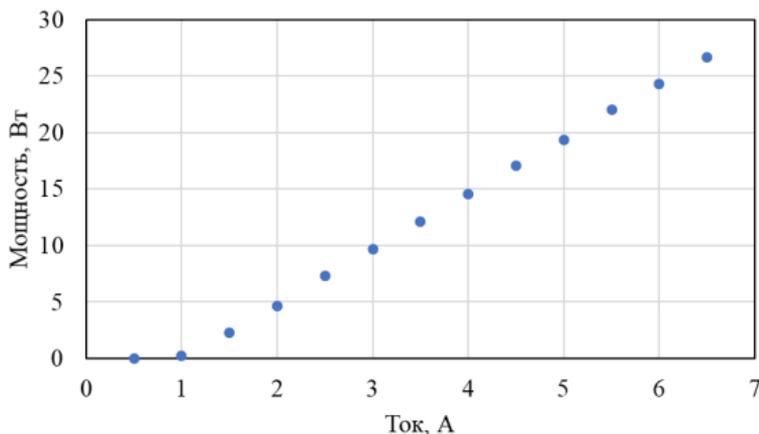


Рис. 4. Ватт-амперная характеристика диода накачки

Для создания резонатора непрерывного иттербиевого лазера необходимы волоконные брэгговские решётки (ВБР), соответствующие диапазону генерации ионов иттербия, одна из которых должна иметь коэффициент отражения, близкий к 100 %, а вторая должна быть полупрозрачной. Для определения параметров ВБР измерялся спектр пропускания с помощью анализатора оптического спектра Yokogawa 6370D и белосветного источника излучения Thorlabs SLS201L/M, на основе которого рассчитывались коэффициенты отражения по следующей формуле:

$$R = \left(1 - 10^{\left(\frac{\alpha}{10} \right)} \right) \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где α – оптические потери, вычисляемые по формуле:

$$\alpha(\text{дБ}) = P_0(\lambda) - P_i(\lambda), \quad (2)$$

где $P_0(\lambda)$ – мощность входного сигнала, зависящая от длины волны, $P_i(\lambda)$ – мощность i -го сигнала, так же зависящая от длины волны.

Результаты расчетов представлены в табл. 2, а спектры пропускания ВБР показаны на рис. 5.

В качестве активной среды лазера было взято иттербиевое волокно с двумя жилами (GTWave). Проведено измерение спектроскопических, оптических, геометрических и генерационных параметров нескольких GTWave волокон и выполнен анализ их состава с целью подбора оптимального волокна для лазера.

Таблица 2

Коэффициенты отражения ВБР

1125,42 нм (ВБР 1)	$P_{вх}$, мВт	$P_{вых}$, мВт	$P_{вх}$, дБм	$P_{вых}$, дБм	A, дБ	R, %
	0,0036	0,0027	- 81,343	- 85,043	3,699	57,336
1125,40 нм (ВБР 2)	$P_{вх}$, мкВт	$P_{вых}$, мкВт	$P_{вх}$, дБм	$P_{вых}$, дБм	A, дБ	R, %
	0,0036	0,0023	- 81,343	-87,473	6,130	75,622



Рис. 5. Спектры пропускания для двух ВБР

На рис. 6 и 7 представлены соответственно спектр поглощения и спектр люминесценции волокна, использованного при сборке схемы лазера.

Для качественного и количественного анализа концентрации веществ в световоде образцы были исследованы на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ) Hitachi S3400, оснащённом рентгеновским энергодисперсионным спектрометром. Наилучшей генерацией обладает волокно с концентрацией Yb 2,5 мол. %, его геометрические параметры: 6/125 мкм.

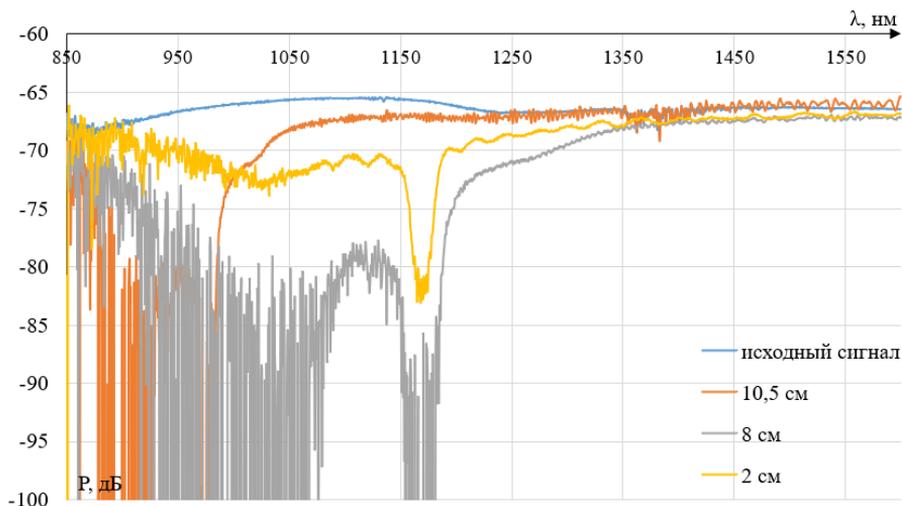


Рис. 6. Спектр поглощения выбранного активного волокна

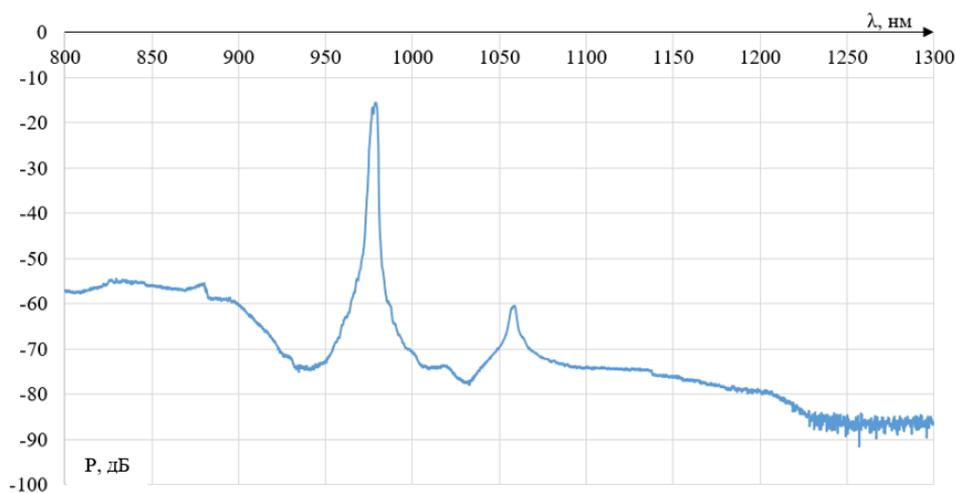


Рис. 7. Спектр люминесценции выбранного активного волокна

Для исследования эффективности генерации иттербиевого световода был собран экспериментальный макет непрерывного лазера, к которому подваривались образцы активного волокна различной длины до 30 м. Было проведено измерение выходной мощности при разных мощностях накачки. Дифференциальная эффективность вычислялась из зависимости выходной мощности от мощности накачки по тангенсу угла наклона графика (рис. 8). В лучшем случае

дифференциальная эффективность составляет около 11,2 %. Выходная мощность иттербиевого лазера 3,5 Вт.

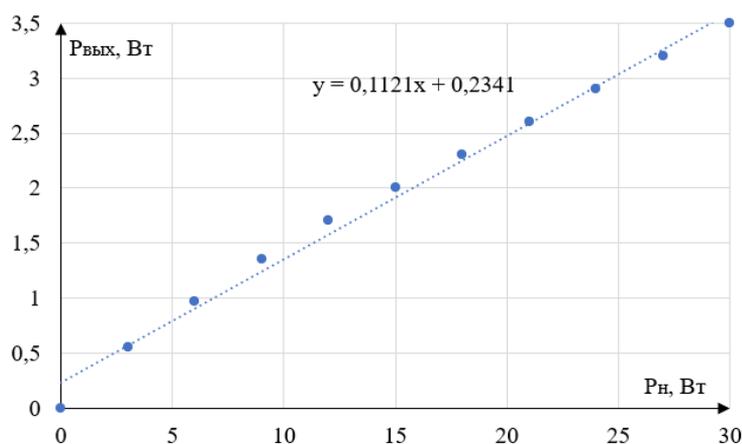


Рис. 8. Зависимость выходной мощности от мощности накачки

Далее был собран ВКР-преобразователь. Для фосфорного волокна, использованного в схеме, также было проведено исследование элементного состава сердцевины с помощью СЭМ. Содержание фосфора в сердцевине около 11–12 %, диаметр сердцевины 6 мкм, диаметр оболочки 125 мкм. Для эффективного преобразования сток-совой компоненты потребовалось включить в схему 400 метров фосфорного волокна.

На рис. 9 изображен первый вариант схемы ВКР-лазера.

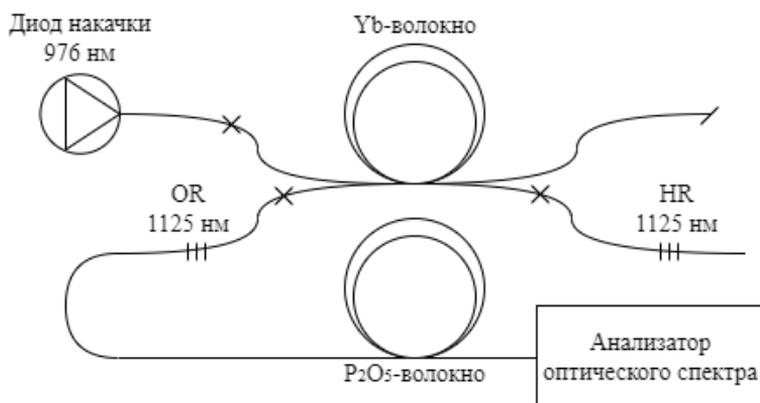


Рис. 9. Экспериментальная схема ВКР-лазера (1)

На спектре выходного излучения виден небольшой пик на длине волны 1200 нм, что является результатом ВКР-преобразования (рис. 10). Мощность на длине волны 1125 нм составила 1,5 Вт, на длине волны 1200 нм – 0,14 мВт.

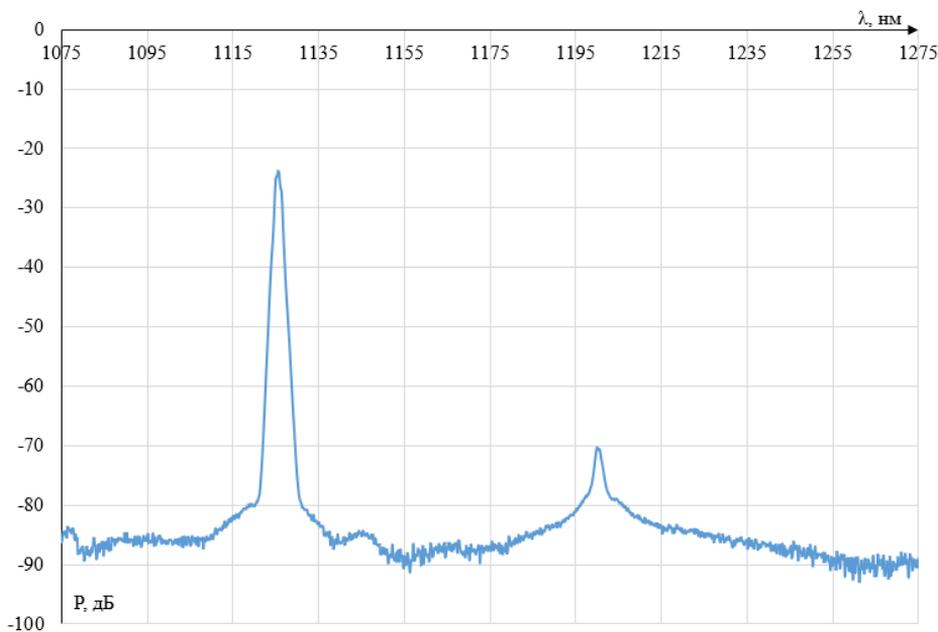


Рис. 10. Спектр излучения на выходе экспериментальной схемы без учёта ВБР на 1200 нм

Как показал эксперимент, требуется увеличение мощности лазера накачки для увеличения мощности ВКР-преобразования на длине волны 1200 нм. Для этого было принято решение заменить пару ВБР на новую пару с другими характеристиками (табл. 3) и иттербиевое GTWave волокно на Double Clad (DC). Последнее часто применяется в усилителях большой мощности. В схему был добавлен объединитель накачки (рис. 11). На схеме отмечен модовый стриппер, предназначенный для защиты ВБР на волокне DC от возможного перегорания. Выполняется стриппер также на волокне типа DC: счищается оболочка и покрывается СИЭЛом (полимером с более высоким показателем преломления).

Таблица 3

Характеристики ВБР

FBG 1125 нм (Flexcore)	λ , нм	I , dB
1	1126,3	20,7
2	1126,2	2
3	1125,7	27
4	1125,8	1,9
Сердцевина/оболочка		6/125

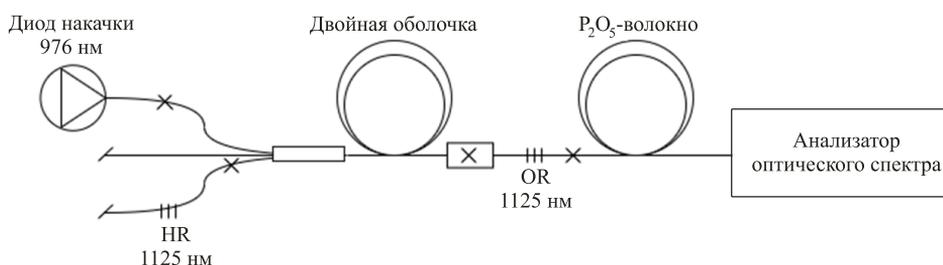


Рис. 11. Экспериментальная схема ВКР-лазера (2)

Накачка в 976 нм (см. рис. 9) хорошо поглощается данным волокном, но область генерации практически не захватывает нужную длину волны 1125 нм. Нагрев волоконного контура сдвигает область генерации незначительно. Был сделан вывод о том, что рассмотренная схема (2) не решает задачу усиления излучения на данной длине волны.

2. Математическое моделирование

С помощью среды для моделирования MATLAB была реализована численная модель для расчёта зависимости выходной мощности ВКР-лазера от длины активного световода с различными вариациями коэффициента отражения выходной ВБР и сосредоточенных потерь. Входные параметры модели задавались вручную, характеристики волокна взяты из спецификации производителя. При вычислении выходной мощности однокаскадного лазера использовалась следующая формула:

$$P_1 = \frac{P_{p0}}{2Lk_0A_1} - \frac{A_0}{2k_0g_0}, \quad (3)$$

где P_{p0} – полная мощность вводимого в световод излучения накачки, L – длина световода, g_0 – коэффициент рамановского усиления, $k_i = \lambda_{i+1} / \lambda_i$ ($0 \leq i < N$) и $A_0 = \alpha_0 + \gamma / 2L$, $A_1 = \alpha_1 + \gamma / 2L + \alpha_R$ (α_i – оптические потери в световоде, α_R – распределённые потери, γ – сосредоточенные потери на сварках и т.д.).

Определяя далее оптимальные потери α_R , соответствующие максимально возможному КПД лазера при заданных распределенных и сосредоточенных потерях в резонаторе, можно получить для него следующее выражение:

$$\eta = \frac{1}{k_0} \left\{ 1 - \left[\frac{\gamma}{P_{p0}} \left[\left(\frac{\alpha_0}{g_0} \right)^{1/2} + \left(\frac{\alpha_1}{g_0} \right)^{1/2} \right]^2 \right]^{1/2} \right\}^2. \quad (4)$$

Максимальный КПД достигается при оптимальной длине световода:

$$L_{\text{opt}} = \frac{\gamma}{2(\alpha_0\alpha_1)^{1/2}}. \quad (5)$$

Параметры α_0 , α_1 и g_0 были получены из эксперимента, значения параметров L , R , γ варьировались. Выходными параметрами считались: P_1 , η , L_{opt} . В результате работы программы были получены графики зависимости выходной мощности на длине волны λ_1 от длины световода для различных значений R , γ , а также значения оптимальной длины световода $L_{\text{opt}} = 108,6$ м и соответствующее КПД $\eta = 33,6$ % для заданных параметров:

$$P_{p0} = 3,5 \text{ Вт}, \quad \gamma = 0,4 \text{ дБ}, \quad \alpha_0 = 2,34 \cdot 10^{-3} \frac{\text{дБ}}{\text{м}},$$

$$\alpha_1 = 1,45 \cdot 10^{-3} \frac{\text{дБ}}{\text{м}}, \quad g_0 = 5,3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{дБ}}{\text{м} \cdot \text{Вт}}.$$

На рис. 12 приведены графики зависимости выходной мощности ВКР-лазера от длины световода для фиксированного коэффициента сосредоточенных потерь $\gamma = 0,4$ дБ и различных значений коэффициента отражения выходного зеркала R .

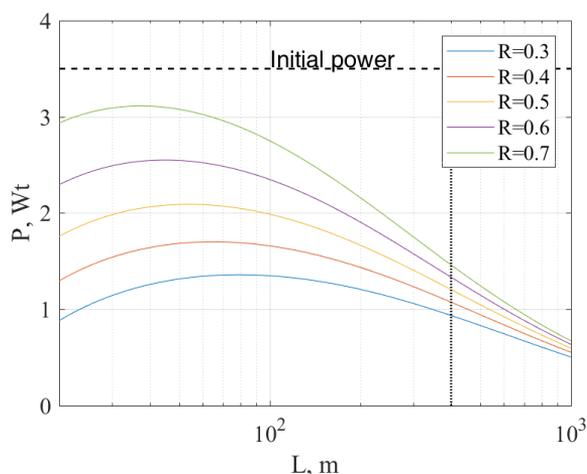


Рис. 12. Зависимости выходной мощности ВКР-лазера от длины световода для фиксированного коэффициента сосредоточенных потерь $\gamma = 0,4$ дБ

На рис. 13 приведены графики зависимости выходной мощности ВКР-лазера от длины световода для фиксированного коэффициента отражения выходного зеркала $R = 0,5$ и различных значений коэффициента сосредоточенных потерь.

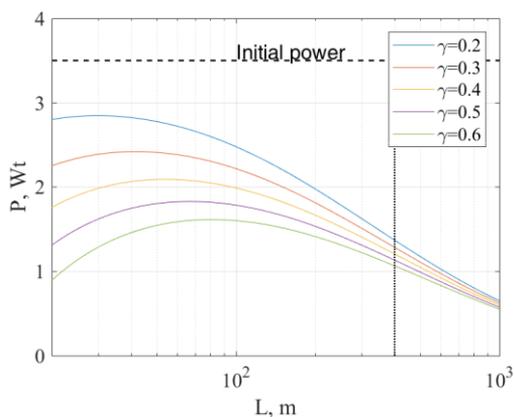


Рис. 13. Зависимости выходной мощности ВКР-лазера от длины световода для фиксированного коэффициента отражения выходного зеркала $R = 0,5$

Полученные результаты показывают, что выходная мощность достигает максимума при значении коэффициента отражения выходной ВБР, равном 70 %. Также из полученного графика видно, что при увеличении сосредоточенных потерь максимальная мощность уменьшается. Расчётная выходная мощность лазера, длина контура которого 108,6 м, а коэффициенты отражения каскада ВБР соответственно 50 % и 100 %, составила 2,2 Вт. Погрешность обусловлена использованием более длинного контура (400 м) и отсутствием в эксперименте каскада ВБР на длину волны 1200 нм.

Данные математического моделирования согласуются с полученными экспериментальными результатами.

Заключение

Основными этапами выполненной работы являются: сборка схемы волоконного иттербиевого лазера с использованием аппарата для сварки оптических волокон Fujikura 100P, измерение параметров волоконных брэгговских решеток при помощи анализатора оптического спектра AQ6370D, измерение параметров волоконного иттербиевого лазера, измерение параметров диодного лазера накачки при помощи измерителя мощности Ophir Nova II, сборка схемы с фосфоросиликатным волокном и исследование полученного ВКР-преобразования, создание численной математической модели для расчёта зависимости выходной мощности ВКР-лазера от длины активного световода с различными вариациями коэффициента отражения выходной брэгговской решётки и сосредоточенных потерь в программной среде MATLAB. Проведён элементный анализ активных волокон, используемых при сборке схемы, на сканирующем электронном микроскопе.

Получены оптимальные значения длины световода ВКР-преобразователя ($L_{opt} = 108,6$ м), коэффициента отражения выходной брэгговской решётки на длину волны 1200 нм ($R = 70$ %), рассчитан КПД ВКР-лазера $\eta = 33,6$ % для заданных параметров:

$$P_{p0} = 3,5 \text{ Вт}, \quad \gamma = 0,4 \text{ дБ}, \quad \alpha_0 = 2,34 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/м},$$

$$\alpha_1 = 1,45 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/м}, \quad g_0 = 5,3 \cdot 10^{-3} \text{ дБ/м} \cdot \text{Вт}.$$

Достигнуто удовлетворительное согласование данных математического моделирования с результатами экспериментов.

Таким образом, проведенные с участием ПНИПУ экспериментально-расчетные исследования могут быть использованы для расширения номенклатуры изделий волоконно-оптической лазерной техники медицинского назначения, разрабатываемых на производственной площадке ПАО «Пермская научно-производственная приборостроительная компания».

Список литературы

1. Тучин В.В. Лазеры и волоконная оптика в биомедицинских исследованиях. – М.: Физматлит, 2010. – 479 с.
2. Беликов А.В., Скрипник А.В. Лазерные биомедицинские технологии: учеб. пособие. Ч. 1. – СПб.: Изд-во СПбГУ ИТМО, 2008. – 116 с.
3. G. Loewen, R. Pandey, D. Bellnier. Endobronchial photodynamic therapy for lung cancer // *Lasers in Surgery and Medicine*. – 2006. – P. 364–370.
4. Solvent dependence of the steady-state rate of O₂ generation upon excitation of dissolved oxygen by 1267 nm laser radiation in air-saturated solutions: Estimates of the absorbance and molar absorption coefficients of oxygen at the excitation wave length / A.A. Krasnovsky, Y.V. Roumbal, A.V. Ivanov, R.V. Ambartzumian // *Chem. Phys. Letters*. – 2006. – Vol. 430, no. 4–6. – P. 260–264.
5. Листвин А.В., Листвин В.Н. Рефлектометрия оптических волокон. – М.: ЛЕСАРпт, 2005. – 208 с.
6. Cadenas E., Davies K. Mitochondrial free radical generation, oxidative stress and aging // *Free Radical Biol Med*. – 2000. – No. 29. – P. 222–230.
7. Fiber Raman Laser at 1450 nm for Medical Applications / A.S. Kurkov, V.M. Paramonov, O.I. Medvedkov, I.D. Zalevskii, S.E. Goncharov // *Laser Physics*. – 2008. – Vol. 18, no. 11. – P. 1234–1237.

References

1. Tuchin V.V. *Lazery i volokonnaia optika v biomeditsinskikh issledovaniiax* [Lasers and Fiber Optics in Biomedical Researches]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 479 p.
2. Belikov A.V., Skripnik A.V. *Lazernye biomeditsinskie tekhnologii. Chast' 1* [Laser biomedical technologies. Part. 1]. Saint Petersburg: Sankt

Peterburgskii gosudarstvennyi universitet informatsionnykh tekhnologii, mekhaniki i optiki, 2008, 116 p.

3. Loewen G., Pandey R., Bellnier D. Endobronchial photodynamic therapy for lung cancer. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2006, pp. 364-370.

4. Krasnovsky A.A., Roubal Y.V., Ivanov A.V., Ambartzumian R.V. Solvent dependence of the steady-state rate of O₂ generation upon excitation of dissolved oxygen by 1267 nm laser radiation in air-saturated solutions: Estimates of the absorbance and molar absorption coefficients of oxygen at the excitation wave length. *Chem. Phys. Letters.*, 2006, vol. 430, no. 4-6, pp. 260-264.

5. Listvin A.V., Listvin V.N. Reflektometriia opticheskikh volokon [Optical Fibers Reflectometry]. Moscow: LESARart, 2005, 208 p.

6. Cadenas E., Davies K. Mitochondrial free radical generation, oxidative stress and aging. *Free Radical Biol Med.*, 2000, no. 29, pp. 222-230.

7. Kurkov A.S., Paramonov V.M., Medvedkov O.I., Zalevskii I.D., Goncharov S.E. Fiber Raman Laser at 1450 nm for Medical Applications. *Laser Physics*, 2008, vol. 18, no. 11, pp. 1234-1237.