

УДК 681.7.068

Тулиевый волоконный лазер с длиной волны 1908 нм

© 2017 г. **А. А. Колегов, канд. техн. наук; А. В. Черникова; А. О. Лешков; Е. А. Белов***Российский Федеральный Ядерный Центр — Всероссийский научно-исследовательский институт
технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск**E-mail: albatrosing@yandex.ru**Поступила в редакцию 10.03.2017*

Представлены результаты разработки тулиевого волоконного лазера с выходной мощностью 38 Вт и длиной волны 1908 нм. Разработанное и изготовленное активное волокно имеет высокую концентрацию ионов тулия, значительно повышающую эффективность лазера за счёт эффекта кроссрелаксации. Определён пик поглощения изготовленного активного волокна, который составил 788 нм. Результаты разработки лазера могут быть использованы для изготовления тулиевых лазеров, используемых в медицине, в том числе мощностью свыше 100 Вт. Разработанная конструкция лазера позволяет изготавливать компактные волоконные лазеры мощностью до 50 Вт.

Ключевые слова: волоконный лазер, тулиевый лазер, медицинский лазер.

Коды OCIS: 140.3510; 060.3510.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оптоволоконные лазеры находят все большее применение в различных областях науки и техники. Наиболее востребованные области применения тулиевых волоконных лазеров — это медицина (лазерные хирургические аппараты) [1–4] и накачка гольмиевых активных элементов [5], которые имеют обширное применение в медицине [6] и в лидарных системах [6]. В первую очередь для этих применений необходимы лазеры с мощностью излучения порядка 40 Вт. Для накачки гольмиевых активных элементов необходимо обеспечить требуемые спектральные характеристики излучения генерации: длину волны 1908 нм и ширину спектра излучения генерации не более 0,5 нм. Для сложных урологических операций требуются тулиевые лазеры мощностью более 100 Вт. Кроме того, тулиевые волоконные лазеры находят применение в спектроскопии [6, 7], локации [6, 8] и научных исследованиях [6, 9]. Волоконные лазеры компактны, обладают высоким КПД «от розетки» и высоким качеством излучения, что является основным преимуществом перед другими типами лазеров.

В настоящей работе будут представлены результаты разработки компактного тулиевого волоконного лазера мощностью 38 Вт.

СХЕМА ЛАЗЕРА

Анализ литературы [10–15], посвященной тулиевым волоконным лазерам с диодной накачкой, показал, что для достижения требуемых параметров излучения наиболее подходящей является схема «задающий генератор + усилитель мощности». Задающий генератор обеспечивает требуемые спектральные характеристики излучения [12, 14], а усилитель — необходимую мощность излучения. Оптическая схема волоконного тулиевого лазера представлена на рис. 1.

Задающий генератор содержит активное волокно с диаметром сердцевинки 10 мкм и числовой апертурой $NA = 0,15$. Диаметр оболочки составляет 125 мкм с числовой апертурой $NA = 0,46$. Поглощение по оболочке на длине волны 793 нм составляет 3 дБ/м. Накачка задающего генератора осуществляется с двух сторон с помощью волоконных объединителей накачки (каплер) типа $(6 + 1) \times 1$. Активное волокно согласовано с сигнальным волокном каплера. В качестве источников накачки используется 12 лазерных диодов с волоконным выходом и максимальной мощностью 4 Вт и длиной волны 793 нм при 25 °С. Таким образом, максимальная суммарная мощность накачки может составлять 48 Вт. При эффективности преобразования «свет в свет» 50% выходная мощность лазерного излучения может

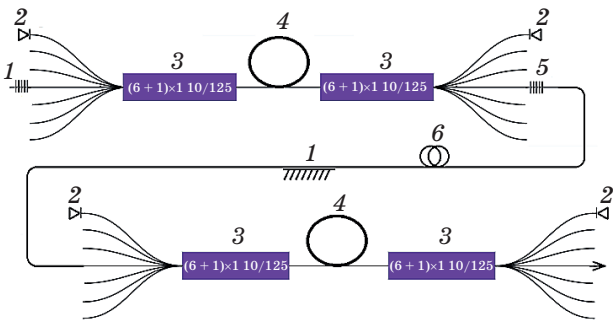


Рис. 1. Оптическая схема тулиевого лазера. 1 — глухая волоконная брэгговская решётка; 2 — лазерный диод; 3 — оптоволоконный объединитель накачки; 4 — волокно, легированное тулием; 5 — выходная брэгговская решётка; 6 — фильтр фундаментальной моды; 7 — фильтр мод оболочки волокна.

составить 24 Вт. Резонатор образован двумя брэгговскими решётками с центральной длиной волны 1908 нм и шириной спектра 0,5 нм, что оптимально подходит для накачки гольмиевых активных элементов. Расположение брэгговских решёток за каплерами защищает их от излучения накачки и перегрева, который в свою очередь приводит к сдвигу спектра отражения решётки и её деградации.

Как видно из рис. 1, активное волокно усилителя также накачивается с двух сторон двенадцатью диодами. Таким образом, суммарная мощность накачки может составлять 96 Вт без учёта потерь на сварках и в каплерах, а выходная мощность лазерного излучения — 48 Вт при эффективности преобразования 50%.

Использование одномодового волокна в усилителе позволяет получить качество пучка, близкое к дифракционному.

Экспериментальная отработка схемы показала особенность, которая имеет место в любых волоконных усилителях: при достижении критической длины волокна усилитель переходит в режим самофилтрации, когда усилитель возбуждается на длине волны, усиление которой максимально [16]. Критическая длина волокна, используемого в разработанной схеме, составила 4 м. Для того, чтобы полностью исключить эффект самофилтрации необходимо использовать только генератор. В этом случае требуются лазерные модули накачки мощностью 8 Вт или объединители накачки типа 2×1 для обеспечения необходимой мощности излучения накачки. В случае использования только генератора вносятся дополнительные потери излучения на объединителях накачки типа 2×1, составляющие 5%, но исключаются потери полезного сигнала на объединителях накачки типа (6 + 1) × 1 в усилителе, которые составляют около 3%. Таким образом, эффективность может снизиться на 2%.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКОЙ СХЕМЫ ЛАЗЕРА

В настоящем разделе представлены результаты моделирования тулиевого волоконного лазера, основанные на численном решении скоростных уравнений с учётом известных из литературы сечений поглощения и эмиссии и коэффициентов кроссрелаксации. На рис. 2 представлена энергетическая схема ионов тулия [17].

Излучение накачки возбуждает ионы, находящиеся в состоянии ${}^3\text{H}_6$, и инициирует их переход на энергетические уровни ${}^3\text{F}_4$, ${}^3\text{H}_5$ и ${}^3\text{H}_4$ со скоростью накачки W_{01} , W_{02} и W_{03} , соответственно. Поскольку в настоящей работе используется накачка в области 790 нм, то в теоретическом анализе индуцированные переходы с уровня ${}^3\text{H}_6$ на уровни ${}^3\text{F}_4$ и ${}^3\text{H}_5$ учитываться не будут. Возбужденные ионы будут спонтанно переходить на уровни ${}^3\text{F}_4$ и ${}^3\text{H}_6$ со скоростями A_{31} и A_{30} , соответственно. Уровень ${}^3\text{H}_5$ при анализе можно не учитывать, т.к. с него ионы быстро переходят на уровень ${}^3\text{F}_4$ [18]. Лазерный переход расположен между уровнями ${}^3\text{F}_4$ и ${}^3\text{H}_6$. Поэтому можно считать, что тулиевый лазер работает по трёхуровневой схеме, и необходима мощная накачка, чтобы создать инверсию населённостей. Учитывая значительный квантовый дефект (примерно 58%), КПД преобразования «свет в свет» не может превышать 42% (без учёта других потерь). Известно, что с повышением концентрации ионов тулия эффективность лазера повышается и связана такая зависимость с эффектом кроссрелаксации [17–19]. Кроссрелаксация заключается в том, что один поглощённый фотон может переместить на лазерный уровень сразу два иона. На рис. 2 этот процесс обозначен как CR. Таким образом, скоростные уравнения можно представить в следующем виде [19]:

$$dN_0/dt = A_{10}N_1 + A_{30}N_3 - W_{03} - CR_1 + I_s(\sigma_{es}N_1 - \sigma_{as}N_0)/h\nu_s, \quad (1)$$

$$dN_1/dt = A_{31}N_3 - A_{10}N_1 + 2CR_1 - I_s(\sigma_{es}N_1 - \sigma_{as}N_0)/h\nu_s, \quad (2)$$

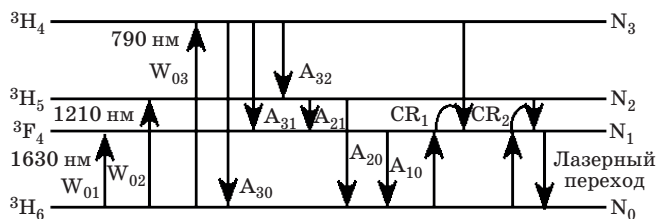


Рис. 2. Энергетическая схема уровней ионов тулия. N — населённость уровней; W — вероятность перехода на верхний уровень; A — вероятность спонтанного перехода; CR — кроссрелаксация.

$$dN_3/dt = -A_{31}N_3 - A_{30}N_3 + W_{03} - CR_1, \quad (3)$$

$$N_t = N_3 + N_1 + N_0, \quad (4)$$

$$W_{03} = I_p(\sigma_{ap}N_0 - \sigma_{ep}N_3)/h\nu_p, \quad (5)$$

$$CR_1 = k_{1130}N_3N_0 - k_{3011}, \quad (6)$$

где N_t — концентрация ионов тулия; A_{ij} — скорость релаксации иона с уровня i на уровень j ; W_{03} — скорость накачки; σ_{ap} , σ_{ep} , σ_{as} , σ_{es} — сечения поглощения и эмиссии для излучения накачки и сигнала; I_p , I_s — интенсивность излучения накачки и сигнала; k_{mni} — коэффициенты кроссрелаксации ионов с уровнем i , j на уровни m , n ; h — постоянная планка; ν_p , ν_e — частота излучения накачки и сигнала.

По аналогии с [20] можно записать уравнения для оценки распределения интенсивности излучения накачки и сигнала в активном волокне без учёта серых потерь:

$$dI_s/dz = I_s(\sigma_{es}N_1 - \sigma_{as}N_0), \quad (7)$$

$$dI_{\pm p}/dz = \pm I_p(\sigma_{ep}N_3 - \sigma_{ap}N_0). \quad (8)$$

Решение уравнений (1)–(8) может быть найдено с помощью численных методов. Для решения системы дифференциальных уравнений использован метод Рунге–Кутты [20], а также метод стрельбы [20, 21].

Все значения физических величин, необходимых для расчёта, приведены в таблице [17, 22–25].

На рис. 3 представлена эволюция излучения накачки и сигнала в тулиевом волокне длиной 4 м.

Из рис. 3 видно, что кроссрелаксация в тулиевом волокне значительно повышает эффектив-

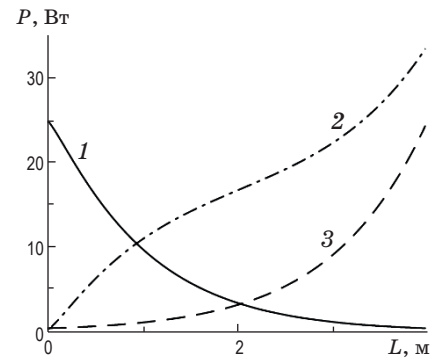


Рис. 3. Эволюция излучения накачки и сигнала в тулиевом волокне. 1 — эволюция излучения накачки в прямом направлении (P_+); 2 — эволюция излучения сигнала; 3 — эволюция излучения накачки в обратном направлении (P_-).

ность лазера, снижая квантовый дефект. На рис. 3 представлены результаты анализа без учёта серых потерь в волокне, а также потерь в оптоволоконных компонентах.

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ЛАЗЕРА

Основными элементами, характеристики которых зависят от температуры, являются лазерные диоды накачки. Для их термостабилизации используется схема, основанная на аккумуляции тепла и его отводу с помощью элемента Пельтье и радиатора. Для определения геометрических размеров радиатора и теплового аккумулятора, определения необходимых характеристик элемента Пельтье был проведён тепловой расчёт, результаты которого позволили разработать конструкцию лазера.

Лазер состоит из двух корпусов, скреплённых между собой через теплоизолирующую пластину. В верхнем корпусе расположены контроллер и 24 лазерных диода. Лазерные диоды установлены на шести медных подложках (по 4 диода на подложке). Между подложками и корпусом установлены термоэлектрические модули Пельтье, служащие для термостабилизации лазерных диодов. В верхнем корпусе выполнены ребра, образующие радиатор. Вентиляторы, расположенные на торце корпуса, осуществляют забор воздуха через радиатор, обеспечивая отвод тепла с корпуса. В нижнем корпусе расположены блок электроники и оптоволоконный блок, состоящий из катушки с волокном, волоконных объединителей накачки и блока волоконных брэгговских решёток. Для термостабилизации блока волоконных брэгговских решёток используется термоэлектрический модуль Пельтье. Фиксация оптоволоконна осуществляется с помощью клея. Также на нижнем корпусе установлены оптоволоконный разъём и вилки электрических соединителей систем питания и управления.

Значения физических величин

Параметр	Значение
λ_p	793 нм
λ_s	1908 нм
d_{core}	10 мкм
d_{clad}	125 мкм
N_t	$5 \times 10^{26} \text{ м}^{-3}$
σ_{es}	$1,5 \times 10^{-25} \text{ м}^2$
σ_{as}	$0,1 \times 10^{-25} \text{ м}^2$
σ_{ep}	$0,5 \times 10^{-25} \text{ м}^2$
σ_{ap}	$6 \times 10^{-25} \text{ м}^2$
A_{10}	$2 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$
A_{31}	$1,6 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$
A_{30}	$1,5 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$
k_{1130}	$20 \times 10^{-23} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$
k_{3011}	$2 \times 10^{-23} \text{ м}^3 \text{ с}^{-1}$

РЕЗУЛЬТАТЫ СБОРКИ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ОТРАБОТКИ ЛАЗЕРА

Отличительной особенностью работы тулиевого лазера при накачке излучением с длиной волны 790 нм является то, что верхний лазерный уровень может заселяться в процессе кроссрелаксации (когда один поглощенный фотон возбуждает сразу два иона тулия). Для увеличения эффективности этого процесса, увеличения квантовой эффективности лазера и как следствия снижения тепловых потерь в волокне необходима высокая концентрация ионов тулия. В тоже время высокая концентрация ионов тулия может приводить к их кластеризации и снижению эффективности лазера.

Для изготовления высокоэффективного лазера были проведены исследования, направленные на определение оптимальной геометрии и химического состава активного волокна. Исследовались характеристики волокон, вытянутых из трёх заготовок производства РФЯЦ-ВНИИТФ. В результате было изготовлено активное волокно, по параметрам близкое к мировому аналогу (Nufern SM-TDF-10P/130-HE). Эффективность преобразования «свет в свет» изготовленного тулиевого волокна оказалась равной 61%, тогда как эффективность мирового аналога составила 62%.

Накачка активного волокна выполнялась лазерными диодами мощностью 4 Вт и длиной волны 793 нм с помощью объединителей накачки типа $(6+1) \times 1$, вносящих потери около 5% в излучение накачки и от 0,5% до 3% в сигнальное излучение. Результаты исследований зависимости поглощения излучения накачки в волокне от спектра излучения накачки представлены на рис. 4. Из рис. 4 был определен максимум поглощения излучения в области 790 нм тулиевого волокна, соответствующий длине волны 788 нм.

После измерения люминесцентных характеристик волокна был собран задающий генератор, схема которого представлена на рис. 1. Мощность задающего генератора составила 18 Вт. Ширина спектра излучения генерации составила 0,5 нм на полувысоте с максимумом, соответствующим длине волны 1907,8 нм, что идеально подходит для накачки Ho:YAG активных элементов.

Далее задающий генератор соединялся с усилителем по схеме, представленной на рис. 1.

Выходная мощность излучения составила 38 Вт при введённой мощности накачки 82 Вт, что соответствует эффективности «свет в свет» 46,3%.

ЛИТЕРАТУРА

1. Abushkin I.A., Privalov V.A., Lappa A.V., Noskov N.V., Neizvestnykh E.A., Kotlyarov A.N., Shekunova Y.G. Laser technologies in treatment of degenerative-dystrophic bone diseases in children // Proc. of SPIE. 2014. V. 8926. P. 89263Q1–89263Q11.
2. Abushkin I.A., Privalov V.A., Lappa A.V., Minaev V.P. Fiber 1,56–1,9 μm lasers in treatment of vascular malformations in children and adults // Proc. of SPIE. 2013. V. 8565. P. 85650V1–85650V7.

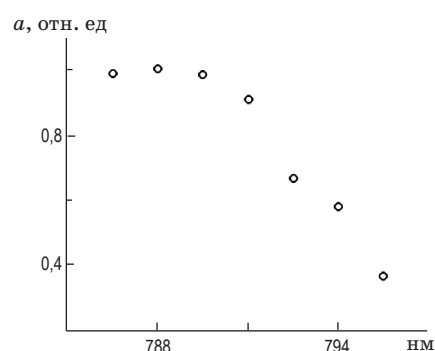


Рис. 4. Спектр поглощения тулиевого волокна в области 790 нм.

Общий КПД — примерно 16%. Параметр качества излучения M^2 составил 1,05.

Для сравнения можно привести основные параметры серийно выпускаемого тулиевого лазера ТЛМ-30 НПО «ИРЭ-Полус»:

- Мощность лазера — 30 Вт;
- $M^2 \leq 1,05$;
- Потребляемая мощность 350 Вт;
- Вес — 10 кг.

Как видно из сравнения, разработанный образец по мощности и общему КПД оказался несколько лучше за счёт использования прямой диодной накачки и эффекта кроссрелаксации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе проведён анализ существующих схем тулиевых лазеров. На основе проведённого анализа представлена схема волоконного лазера с выходной мощностью 38 Вт, которая включает в себя задающий генератор и усилитель. Выполнено моделирование схемы, приведено описание конструкции лазера. Разработанное и изготовленное активное волокно имеет высокую концентрацию ионов тулия, значительно повышающую эффективность лазера за счёт эффекта кроссрелаксации. Определён пик поглощения изготовленного активного волокна, который составил 788 нм.

Результаты разработки лазера могут быть использованы для изготовления тулиевых лазеров, используемых в медицине, в том числе мощностью свыше 100 Вт. Разработанная конструкция лазера позволяет изготавливать компактные волоконные лазеры мощностью до 50 Вт.

3. *Thomas R., Herrmann W., Bach T., Imkamp F., Georgiou A., Burchardt M., Oelke M., Gross A.J.* Thulium laser enucleation of the prostate (ThuLEP): transurethral anatomical prostatectomy with laser support. Introduction of a novel technique for the treatment of benign prostatic obstruction // *World J. Urol.* 2010. V. 28. P. 45–51.
4. *Серебряков В.А., Бойко Э.В., Калинин А.Г., Корнев А.Ф., Наривончик А.С., Павлова А.Л.* Лазер среднего инфракрасного диапазона спектра для прецизионной хирургии // *Оптический журнал.* 2015. Т. 12. № 12. С. 3–13.
5. *Серебряков В.А., Храмов В.Ю., Наривончик А.С., Калинин А.А., Корнев А.Ф., Павлова А.Л., Скворцов Д.В.* Импульсно-периодические Ho:YLF лазеры, проблемы оптимизации // *Оптический журнал.* 2016. Т. 83. № 12. С. 17–24.
6. *Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P.* 2 μm laser sources and their possible applications // *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics* / Ed. by Bishnu P. Croatia: InTech. 2010. P. 471–500.
7. *Евсикова Л.Г., Горемыкин Ю.А.* Определение коэффициента пропускания атмосферы на наклонной трассе для лазерных длин волн // *Оптический журнал.* 2016. Т. 83. № 12. С. 48–52.
8. *Henderson S.W., Suni P.J.M., Hale C.P., Hannon S.M., Magee J.R., Bruns D.L., Yuen E.H.* Coherent laser radar at 2 μm using solid-state lasers // *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing.* 1993. V. 31. P. 4–15.
9. *Русов В.А., Серебряков В.А., Дороганов С.В., Калинин А.А., Наривончик А.С., Скворцов Д.В.* Электрооптические модуляторы на кристаллах КТР для мощных лазеров среднего ИК диапазона спектра // *Оптический журнал.* 2016. Т. 83. № 12. С. 10–16.
10. *Frith G., Lancaster D.G., Jackson S.D.* 85 W Tm³⁺-doped silica fiber laser // *Electronics letters.* 2005. V. 41. № 12. P. 22–23.
11. *Hemming A., Bennetts S., Davidson A., Carmody N., Lancaster D.G.* A 226 W high power Tm fiber laser // *Opt. Express.* 2012. V. 20. № 16. P. 17539–17544.
12. *Frith G., Carter A., Samson B., Farroni J., Farley K., Tankala K.* Highly efficient 70 W all-fiber Tm-doped laser system operating at 1908 nm // *OEC/ACOFT Conference, Sydney.* 2008. P. 1–2.
13. *Jianfeng W., Zhidong Y., Shibin J.* Highly efficient high-power thulium-doped germanate glass fiber laser // *Opt. Lett.* 2007. V. 32. № 6. P. 638–640.
14. *McComb T., Sims A., Willis C., Kadwani P., Sudesh V., Shah L., Richardson M.* High-power widely tunable thulium fiber lasers // *App. Optics.* 2010. V. 49. № 32. P. 6236–6242.
15. *Barannikov Y.A., Shcherbina F.V., Gapontsev V.P., Meleshkevich M., Platonov N.S.* Linear-polarization, CW generation of 60 W power in a single-mode, Tm fibre laser // *Conference on Lasers and Electro-Optics.* 2005. V. 2. P. 811–812.
16. *Фриман Р.* Волоконно-оптические системы связи. М.: Техносфера, 2007. 514 с.
17. *Jackson S., King T.* Theoretical modeling of Tm-doped Silica fiber lasers // *Journal of lightwave technology.* 1999. V. 17. № 5. P. 948–956.
18. *Frith G., Carter A., Samson B., Farroni J., Farley K., Tankala K., Town G.* Mitigation of photodegradation in 790 nm-pumped Tm-doped fibers // *Proc. of SPIE.* 2010. V. 7580. P. 75800A1–75800A9.
19. *Taher M., Gebavi H., Taccheo S., Milanese D., Balda R.* Novel approach towards cross-relaxation energy transfer calculation applied on highly thuliumdoped tellurite glasses // *Opt. Express.* 2011. V. 19. № 27. P. 26269–26274.
20. *Мелькумов М.А.* Мощные непрерывные иттербиевые лазеры на световодах с многоэлементной первой оболочкой // *Диссертация канд. физ.-мат. наук. М.: Ин-т общ. физики им. А.М. Прохорова РАН, 2006. 140 с.*
21. *Калиткин Н.Н.* Численные методы. М.: Наука, 1978. 512 с.
22. *Agger S.D., Povlsen J.H.* Emission and absorption cross section of thulium doped silica fibers // *Opt. Express.* 2006. V. 14. № 1. P. 50–57.
23. *Walsh B.M., Barnes N.P.* Comparison of Tm:ZBLAN and Tm:silica fiber lasers; spectroscopy and tunable pulsed laser operation around 1.9 μm // *Appl. Phys. B.* 2004. V. 78. P. 325–333.
24. *Turri G., Sudesh V., Richardson M., Bass M., Toncelli A., Tonelli M.* Temperature dependent spectroscopic properties of Tm³⁺ in germanate, silica, and phosphate glasses: a comparative study // *J. Appl. Phys.* 2008. V. 103. P. 93–104.
25. *Peterka P., Kasik I., Dhar A., Dussardier B., Blanc W.* Theoretical modeling of fiber laser at 810 nm based on thulium-doped silica fibers with enhanced ³H₄ level lifetime // *Opt. Express.* 2001. V. 19. P. 2773–2781.