

УДК 615.849.19

С.А. Филатова^{1, 2}, В.Б. Цветков¹, А.С. Курков^{1, 2, 3, 4}

¹ Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия

² Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия

³ Лаборатория фотоники Пермского научного центра УрО РАН,
Пермь, Россия

⁴ Пермский национальный исследовательский политехнический
университет, Пермь, Россия

ИМПУЛЬСНЫЙ ГОЛЬМИЕВЫЙ ВОЛОКОННЫЙ ЛАЗЕР С ДЛИНОЙ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ 2,1 МКМ ДЛЯ МЕДИЦИНСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

Реализован импульсный волоконный гольмиевый лазер, излучающий на длине волны 2,1 мкм. Максимальная средняя мощность составила 8 Вт, пиковая – 45 Вт, длительность импульса – 250 нс. Исследовано воздействие излучения гольмиевого волоконного лазера на образцы биологических тканей.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный лазер, воздействие лазерного излучения на биологические ткани, волоконный лазер, модуляция добротности, лазеры в медицине.

S.A. Filatova^{1, 2}, V.B. Tsvetkov¹, A.S. Kurkov^{1, 2, 3, 4}

¹ A.M. Prokhorov Institute of General Physics of Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russian Federation

² Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russian Federation

³ Photonics Laboratory of Perm Scientific Center of Ural Branch of Russian
Academy of Sciences, Perm, Russian Federation

⁴ Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

HO FIBER LASER EMITTING AT A WAVELENGTH OF 2,1 MICRONS FOR MEDICAL APPLICATION

Pulsed Ho fiber laser emitting at a wavelength of 2,1 microns was realized. The maximum average power was 8 W, peak powers – 45 W, pulse duration – 250 ns. Effect of Ho fiber laser radiation on samples of biological tissues was studied.

Keywords: Ho fiber laser, effect of Ho fiber laser radiation on samples of biological tissues, fiber laser, Q-switching, laser medical application.

1. Введение

На сегодняшний день наблюдается растущий интерес к исследованию лазеров, длина волны излучения которых лежит в области более 2 мкм. Это обусловлено весьма широкой областью их применения как в научных исследованиях, так и в прикладных сферах. Например, в мониторинге газового состава воздуха, контроле окружающей среды, спектроскопии, тепловедении, медицине, для военно-технического применения и др [1, 2].

Особый интерес представляет использование двухмикронных лазеров в медицине из-за сильного поглощения излучения в этой спектральной области биологическими тканями. Это, в свою очередь, обусловлено высоким коэффициентом поглощения молекулами воды. Так, поглощение воды в этой области составляет около 100 см^{-1} , в то же время в области излучения широкораспространенных иттербиевых волоконных лазеров (1,06–1,1 мкм) оно не превышает 1 см^{-1} . Это определяет достаточно широкое использование гольмиевых твердотельных лазеров [3]. Однако можно отметить ряд их недостатков. Они работают только в импульсном режиме с генерацией высокоэнергетичных длинных импульсов с частотой повторения до 20 Гц. Очевидно, что при существующем разнообразии патологий в ряде случаев требуются другие режимы работы, которые могут обеспечить волоконные гольмиевые лазеры. Кроме того, в этом случае следует ожидать снижения стоимости лазера и его обслуживания. Также необходимо отметить, что одним из главных направлений развития современной хирургии являются эндоскопические методики. Волоконные лазеры легко сопрягаются с волокном, осуществляющим транспортировку излучения к пораженному органу. Поэтому активно ведутся исследования в области применения волоконных лазеров для медицинских целей [4].

В настоящее время с использованием волокон, легированных ионами гольмия, продемонстрирована лазерная генерация в диапазоне 2–2,21 мкм [5, 6]. Максимальная продемонстрированная выходная мощность составила 140 Вт [7], а квантовая эффективность – 0,81 [8].

В данной статье представлены результаты разработки импульсного гольмиевого волоконного лазера с длиной волны излучения 2,1 мкм и проведения предварительных экспериментов по воздействию лазерного излучения на различные биологические ткани.

2. Схема лазера

На рис. 1 показана схема гольмиевого волоконного лазера. Для накачки лазера использовался иттербиевый волоконный лазер с длиной волны генерации 1,125 мкм и максимальной мощностью 28,2 Вт. В свою очередь, накачка иттербиевого лазера осуществлялась двумя полупроводниковыми лазерными диодами с длиной волны излучения 975 нм и выходной мощностью до 26 Вт каждый.

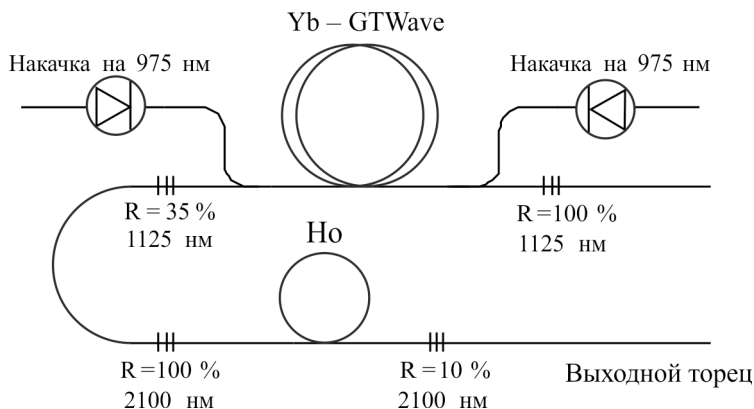


Рис. 1. Схема гольмиевого волоконного лазера

В качестве активной среды лазера использовалось оптическое волокно, легированное тонами гольмия, изготовленное в Пермской научно-производственной приборостроительной компании. Концентрация активной примеси составила $5 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$, разность показателей преломления сердцевины и оболочки 0,005, длина волны отсечки первой высшей моды – около 2 мкм. Резонатор гольмиевого лазера был образован двумя волоконными брэгговскими решетками (ВБР), входной и выходной, с резонансной длиной волны 2,1 мкм и коэффициентами отражения 1 и 0,1 соответственно. Импульсный режим генерации обеспечивался за счет эффекта самомодуляции добротности, вызванной кластеризацией активных ионов вследствие их высокой концентрации [9].

3. Параметры лазера

На рис. 2 приведена зависимость выходной средней мощности гольмиевого волоконного лазера от мощности накачки иттербиевого лазера. Максимальная выходная мощность составила 7,6 Вт, На рис. 3 представлен выходной спектр излучения гольмиевого волоконного лазера.

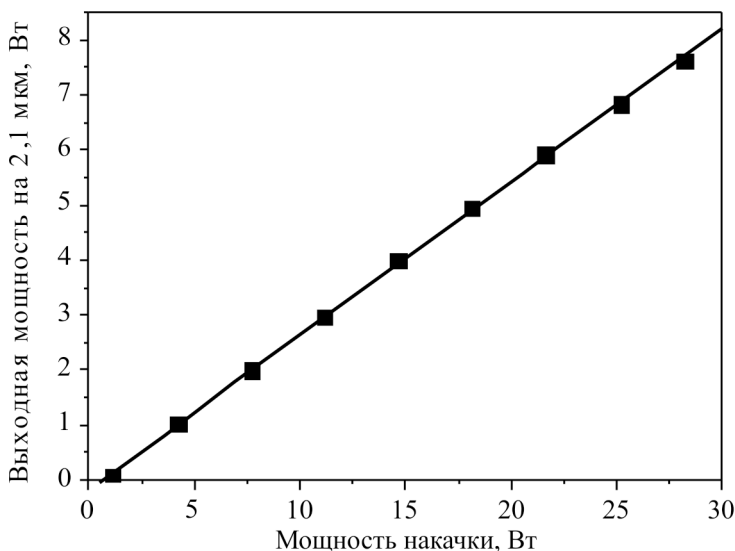


Рис. 2. Зависимость средней выходной мощности гольмиевого лазера от мощности накачки

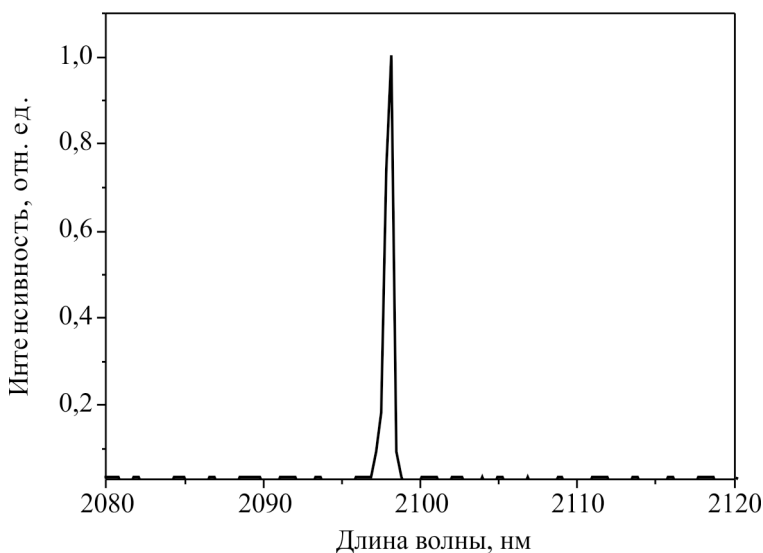


Рис. 3. Спектр излучения гольмиевого лазера

Исследование динамических характеристик лазера показало, что генерация происходит в импульсном режиме. Типичная осциллограмма представлена на рис. 4.

Длительность импульсов вблизи порога генерации составляла около 1 мкс, а при увеличении мощности уменьшалась до 250 нс прак-

тически независимо от мощности накачки. Частота следования импульсов существенно зависела от мощности накачки, что иллюстрируется на рис. 5.

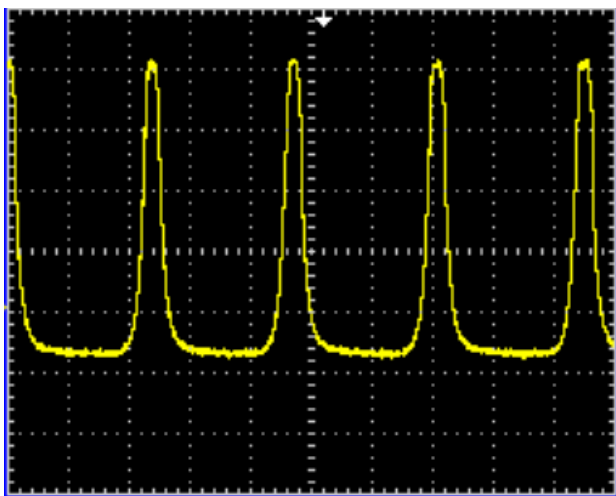


Рис. 4. Типичная оциллограмма последовательности импульсов. Вся развертка соответствует 10 мкс

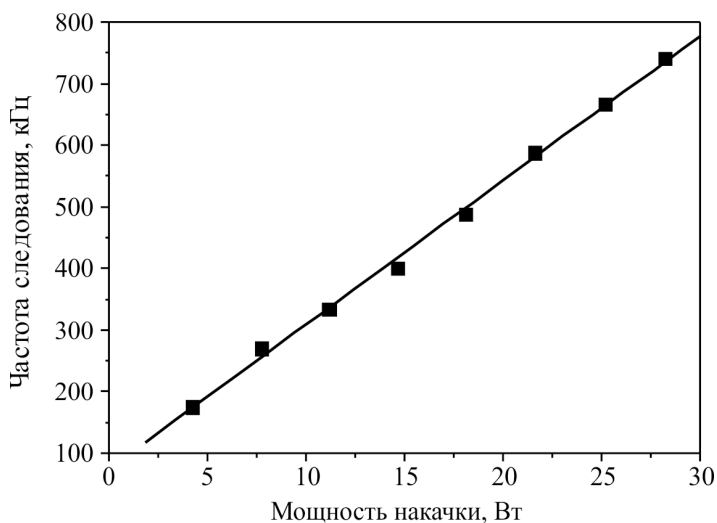


Рис. 5. Зависимость частоты следования импульсов от мощности накачки

На рис. 6 показана зависимость выходной пиковой мощности от мощности накачки, ее максимальное значение составило 47 Вт. Энергия импульса составила около 10 мкДж.

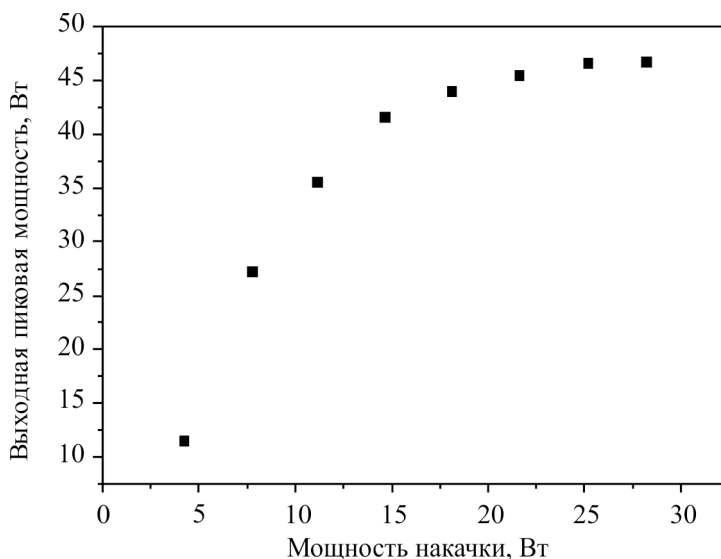


Рис. 6. Зависимость пиковой мощности гольмиевого лазера от мощности накачки

4. Результаты воздействия на биологические объекты

Лазерному облучению подвергались образцы ткани организма коровы: мышечная ткань, костная, печень. Облучение проводилось с расстояния порядка 1 см, при этом выбиралось время воздействия, при котором не возникает карбонизация ткани. В качестве манипулятора использовался цанговый карандаш, так что процедура облучения напоминала процесс рисования.

На рис. 7 представлено изображение участка мышечной ткани, обработанного излучением гольмиевого лазера при ручном сканировании со скоростью около 1 см/с. Хорошо видны участки ткани, на которых произошло свертывание белка. Обращает на себя внимание локализация обработанных участков, толщина полученных полосок свернутого белка составляет 0,5–1 мм. При этом термическое повреждение соседних участков не отмечено. Аналогичный результат наблюдался на тканях печени (рис. 8). Поскольку процесс сворачивания белка сопровождается закупориванием кровеносных сосудов, можно ожидать, что лазерное облучение будет оказывать кровеостанавливающий эффект. Кроме того, была предпринята попытка сварки образцов печени. Так, на рис. 9, а представлен образец ткани печени, разрезанный на две части. Для сварки эти части приводились в контакт, а место контакта облучалось в ручном режиме. Время облучения составило несколько

секунд при длине разреза порядка 1 см. Результаты сварки представлены на рис. 9, б. Следует отметить, что ранее для этой цели предпринимались попытки использования полупроводникового лазера [10].



Рис. 7. Результаты воздействия на мышечную ткань

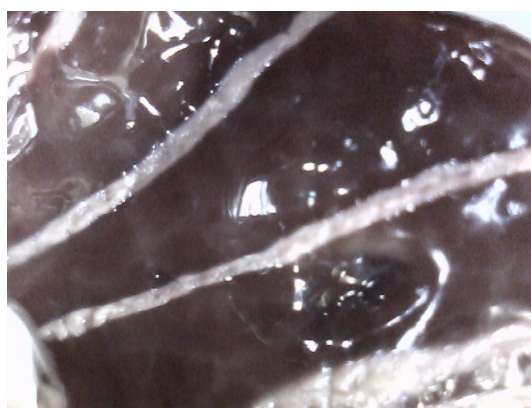
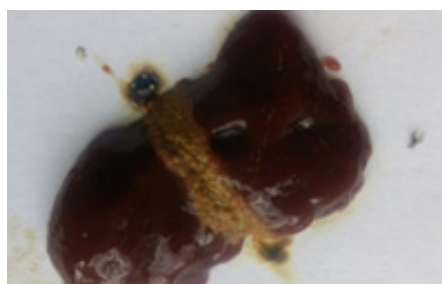


Рис. 8. Результаты воздействия на ткань печени



а



б

Рис. 9. Результаты сварки ткани печени

При воздействии на пористую костную ткань наблюдался эффект, который можно определить как «таяние» костной ткани или ее плавление без обугливания.

5. Выводы

В результате проведенных работ реализован компактный гольмиевый волоконный лазер, излучающий в импульсном режиме. Максимальная средняя мощность на длине волны 2,1 мкм составила 7,6 Вт, пиковая – 47 Вт. Проведены предварительные эксперименты по воздействию излучения лазера на биологические объекты, которые показали перспективность его применения в ряде областей. Однако для практического использования лазера необходимы клинические исследования.

Список литературы

1. Development of a thulium (TM:YAP) laser system for brain tissue ablation / T. Bilici, S. Mutlu, H. Kalaycioglu, A. Kurt, A. Sennaroglu, M. Gulsoy // *Lasers in Medical Science*. – 2011. – Vol. 26, iss. 5. – P. 699–706.

2. Минаев В.П., Жилин К.М. Современные лазерные аппараты для хирургии и силовой терапии на основе полупроводниковых и волоконных лазеров. Рекомендации по выбору и применению. – М.: Издатель И.В. Балабанов, 2009. – 48 с.

3. Грачев С.В. Гольмиевый лазер в медицине. – М.: Триада-Х, 2003. – 240 с.

4. Holmium fiber laser based on the heavily doped active fiber / A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov, O.I. Medvedkov, V.V. Dvoyrin, Yu.N. Pyrkov, V.B. Tsvetkov, A.V. Marakulin, L.A. Minashina // *Laser Phys. Letters*. – 2009. – Vol. 6. – P. 661–664.

5. Tunc B., Gulsoy M. Tm:Fiber laser ablation with real-time temperature monitoring for minimizing collateral thermal damage: *ex vivo* dosimetry for ovine brain // *Lasers in Surgery and Medicine*. – 2013. – Vol. 45. – P. 48–56.

6. Гольмиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 2,21 мкм / С.О. Антипов, В.А. Камынин, О.И. Медведков, А.В. Маракулин, Л.А. Минашина, А.С. Курков, А.В. Бараников // *Квантовая электроника*. – 2013. – № 43. – С. 603–604.

7. High power operation of cladding pumped holmium-doped silica fibre lasers / A. Hemming, S. Bennetts, N. Simakov, A. Davidson, J. Haub, A. Carter // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21. – P. 4560–4567.

8. Гольмиевый волоконный лазер с рекордной квантовой эффективностью / А.С. Курков, Е.М. Шолохов, В.Б. Цветков, А.В. Маракулин, Л.А. Минашина, О.И. Медведков, А.Ф. Косолапов // Квантовая электроника. – 2011. – № 41. – С. 492–494.

9. Dynamic behavior of laser based on the heavily holmium doped fiber / A.S. Kurkov, E.M. Sholokhov, A.V. Marakulin, L.A. Minashina // Laser Physics Letters. – 2010. – Vol. 7. – P. 587–590.

10. Бордуновский В.Н., Бондаревский И.Я. Использование высокоинтенсивного лазерного излучения при органосберегающем хирургическом лечении очаговых образований печени // Лазерная медицина. – 2004. – Т. 8, № 3. – С. 8–9.

References

1. Bilici T., Mutlu S., Kalaycioglu H., Kurt A., Sennaroglu A., Gulsoy M. Development of a thulium (TM:YAP) laser system for brain tissue ablation. *Lasers in Medical Science*, 2011, vol. 26, iss. 5, pp. 699-706.

2. Minaev V.P., Zhilin K.M. Sovremennye lazernye apparaty dlia khirurgii i silovoi terapii na osnove poluprovodnikovykh i volokonnykh lazerov. Rekomendatsii po vyboru i primeneniui [Modern laser apparatus for surgery and weight therapy based on solid-state and fiber lasers. Recommendations on choice and use of]. Moscow: Izdatel' I.V. Balabanov, 2009, 48 p.

3. Grachev S.V. Gol'mieviy lazer v meditsine [Holmium laser in medicine]. Moscow: Triada-X, 2003, 240 p.

4. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I., Dvoyrin V.V., Pyrkov Yu.N., Tsvetkov V.B., Marakulin A.V., Minashina L.A. Holmium fiber laser based on the heavily doped active fiber. *Laser Phys. Letters*, 2009, vol. 6, pp. 661-664.

5. Tunc B., Gulsoy M. Tm:Fiber laser ablation with real-time temperature monitoring for minimizing collateral thermal damage: *ex vivo* dosimetry for ovine brain. *Lasers in Surgery and Medicine*, 2013, vol. 45, pp. 48-56.

6. Antipov S.O., Kamynin V.A., Medvedkov O.I., Marakulin A.V., Minashina L.A., Kurkov A.S., Baranikov A.V. Gol'mieviy volokonnyi lazer s dlinnoi volny izlucheniia 2,21 mkm [Holmium fiber laser with a wavelength of 2.21 μm]. *Kvantovaya elektronika*, 2013, no. 43, pp. 603-604.

7. Hemming A., Bennetts S., Simakov N., Davidson A., Haub J., Carter A. High power operation of cladding pumped holmium-doped silica fibre lasers. *Optics Express*, 2013, vol. 21, pp. 4560-4567.

8. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Tsvetkov V.B., Marakulin A.V., Minashina L.A., Medvedkov O.I., Kosolapov A.F. Gol'mieviyi volokonnyi lazer s rekordnoi kvantovoi effektivnost'iu [Holmium fiber laser with record quantum efficiency]. *Kvantovaiia elektronika*, 2011, no. 41, pp. 492-494.

9. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Marakulin A.V., Minashina L.A. Dynamic behavior of laser based on the heavily holmium doped fiber. *Laser Physics Letters*, 2010, vol. 7, pp. 587-590.

10. Bordunovskii V.N., Bondarevskii I.Ia. Ispol'zovanie vysokointensivnogo lazernogo izlucheniia pri organosberegaiushchem khirurgicheskom lechenii ochagovykh obrazovaniy pecheni [The use of high-intensity laser radiation in organ-preserving surgical treatment of focal liver formations]. *Lazernaia meditsina*, 2004, vol. 8, no. 3, pp. 8-9.

Получено 16.10.2014