

Импульсно-периодический волоконный гольмиевый лазер с внутрирезонаторным модулятором Маха–Цендера

И.В.Жлуктова, В.А.Камынин, В.Г.Воронин, О.Е.Наний, В.Б.Цветков

Реализована полностью волоконная схема активной модуляции добротности гольмиевого волоконного лазера. Получена импульсно-периодическая генерация на длине волны 2098 нм с длительностью импульсов от 0.8 до 1.56 мкс, частотами следования 11.2 и 22.4 кГц, максимальной пиковой мощностью 3.9 Вт и энергией импульса ~3.5 мкДж.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный лазер, модуляция добротности, модулятор Маха–Цендера.

1. Введение

Волоконные лазеры с модуляцией добротности, спектр излучения которых лежит в двухмикронном спектральном диапазоне, перспективны для применения в таких областях, как медицина, лазерная локация, обработка материалов, нелинейная оптика и т. д. [1, 2]. Наибольшая длина волны генерации, 2.2 мкм, в лазерах на основе кварцевых световодов достигается в случае гольмиевых волоконных лазеров [3]. Одним из наиболее распространенных методов получения импульсного излучения с высокой энергией импульсов является метод модуляции добротности резонатора лазера, который позволяет увеличивать пиковую мощность импульсов лазера приблизительно в τ_{sp}/τ_c раз (τ_{sp} – время жизни верхнего рабочего уровня, τ_c – время жизни фотона в резонаторе).

Для реализации режима модуляции добротности в гольмиевых лазерах в работе [4] использовались насыщающиеся поглотители на гольмиевом волокне с высокой концентрацией активных ионов, однако полученные последовательности импульсов не были регулярными. Применение пассивных лазерных затворов (ПЛЗ) на основе полупроводниковых структур (SESAM) или одностенных углеродных нанотрубок (ОУНТ) позволяет получить стабильный режим генерации, однако в режиме модуляции добротности лазера они ограничивают энергию импульса из-за лучевого повреждения. Импульсная генерация в гольмиевых волоконных лазерах наблюдалась и в случае самомодуляции [5–7], что объяснялось кластеризацией

активных ионов в таких высококонцентрированных волокнах [8].

Наиболее удобным способом модуляции добротности волоконных лазеров является применение интегральных акустооптических и электрооптических затворов с волоконным входом и выходом [9]. Такие устройства являются гибридными волоконными лазерами с модуляторами, в которых для ввода/вывода излучения используются коллиматоры [10]. Эти компоненты широко доступны для иттербиевых и эрбиевых лазеров с длинами волн в областях 1 и 1.5 мкм соответственно. Иная ситуация с компонентами для гольмиевых лазеров, работающих на длине волны 2 мкм и более, модуляторы для которых существенно менее доступны.

В настоящей работе исследована простая, полностью волоконная конструкция лазера с модуляцией добротности [11], пригодная для работы в широком спектральном диапазоне прозрачности кварцевого волокна от 1 до 2.2 мкм.

2. Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки представлена на рис.1. Активной средой лазера служил отрезок оптического волокна, легированного ионами гольмия, длиной 4.5 м. Диаметр сердцевины световода равнялся 16 мкм, разность показателей преломления сердцевины и оболочки составляла 0.004. Концентрация ионов Ho^{3+} была равна $2 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ при поглощении на длине волны 1125 нм 4.7 дБ/м. Излучение непрерывного иттербиевого волоконного лазера с длиной волны генерации 1125 нм и максимальной мощностью 10 Вт использовалось для оптической накачки активной среды. Излучение накачки вводилось через волоконную брэгговскую решетку (ВБР) с большим коэффициентом отражения (99%) на длине волны 2098 нм.

Выходным зеркалом резонатора гольмиевого лазера являлся коннектор с перпендикулярным полированным торцом (коэффициент френелевского отражения 4%). В резонатор лазера, кроме активного волокна, был помещен полностью волоконный модулятор, созданный по схеме интерферометра Маха–Цендера. Модулятор состоял из двух волоконных разветвителей 50/50 на $\lambda = 2100 \text{ нм}$ и двух шестиметровых плеч – активного и пассив-

И.В.Жлуктова. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: iv.zhlyuktova@gmail.com

В.А.Камынин. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Ульяновский государственный университет, Россия, 432700 Ульяновск, ул. Л.Толстого, 42

В.Г.Воронин, О.Е.Наний. Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

В.Б.Цветков. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Россия, 115409 Москва, Каширское ш., 31

Поступила в редакцию 22 ноября 2017 г., после доработки – 26 марта 2018 г.

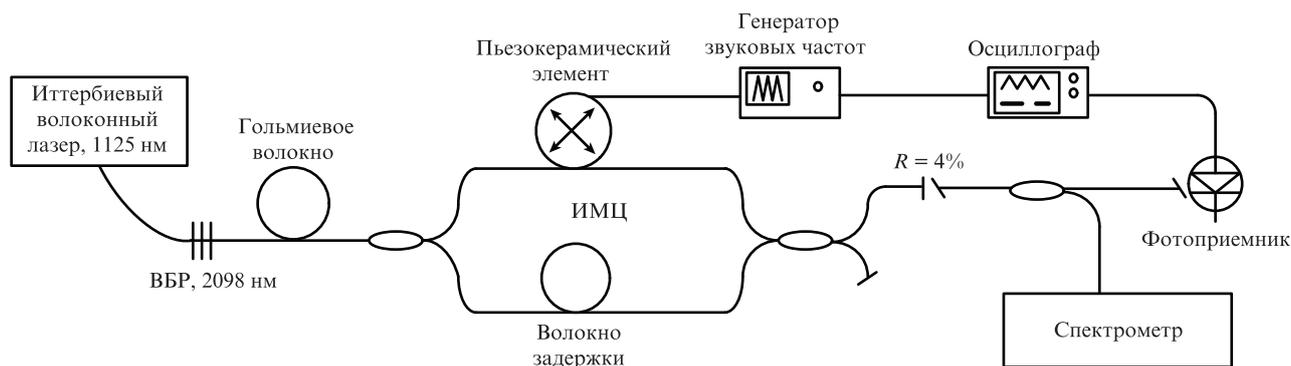


Рис.1. Схема гольмиевого волоконного лазера с внутррезонаторным модулятором Маха–Цендера (ИМЦ).

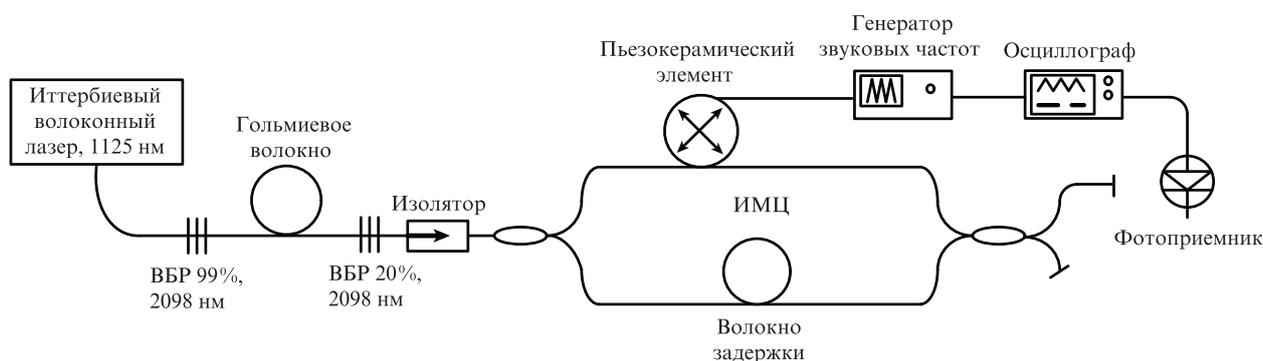


Рис.2. Схема экспериментальной установки по измерению функции пропускания модулятора Маха–Цендера.

ного. В активном плече находился фазовый модулятор, образованный намотанным на пьезокерамический цилиндр волокном. Диаметры намотки волокна в обоих плечах были одинаковыми и составляли 8.5 см. Все элементы изготавливались из оптического волокна SMF 28.

На фазовый модулятор от генератора импульсов подавалось напряжение треугольной формы. Амплитуда управляющего электрического сигнала изменялась от 4 до 10 В. При подаче на пьезокерамику переменного напряжения геометрические размеры цилиндра периодически изменяются за счет обратного пьезоэффекта. Это вызывает изменение оптического пути в активном плече и, соответственно, фазовую модуляцию светового излучения, наличие которой в одном из плеч интерферометра Маха–Цендера приводит к амплитудной модуляции интенсивности излучения на выходе интерферометра. Таким образом, волоконный модулятор Маха–Цендера, помещенный в резонатор гольмиевого лазера, модулирует добротность резонатора.

Схема измерения функции пропускания волоконного модулятора Маха–Цендера показана на рис.2. В качестве сигнального источника был использован непрерывный гольмиевый волоконный лазер с центральной длиной волны 2098 нм. Для предотвращения дополнительной обратной связи между лазером и модулятором после выходного зеркала устанавливался волоконный изолятор.

Временные характеристики волоконного лазера, работающего в режиме активной модуляции добротности, исследовались с помощью фотоприемника с шириной полосы 250 МГц и согласованного с ним осциллографа. Спектр выходного излучения анализировался спектрометром Avesta ASP-IR-2.6.

3. Результаты экспериментов и их обсуждение

Функция пропускания модулятора Маха–Цендера была исследована в диапазоне амплитуд напряжений 4–10 В. На рис.3 представлены как функции пропускания, так и соответствующие сигналы, подаваемые на пьезоке-

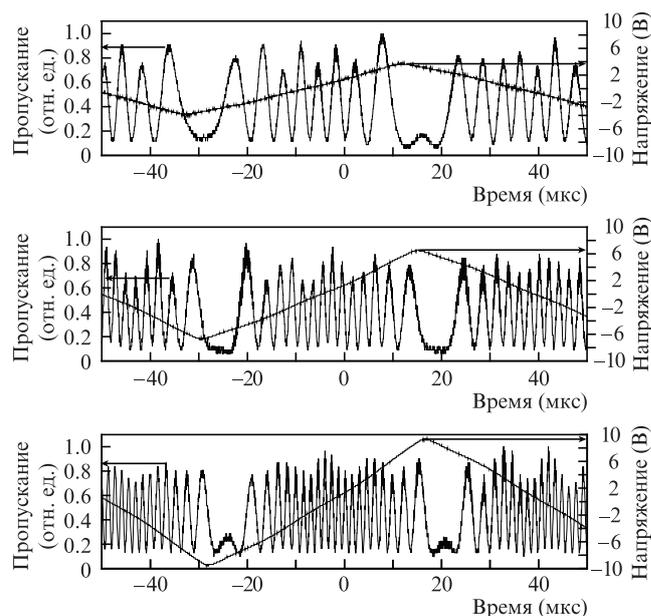


Рис.3. Функции пропускания модулятора Маха–Цендера и соответствующие сигналы напряжения, подаваемые на пьезокерамический цилиндр.

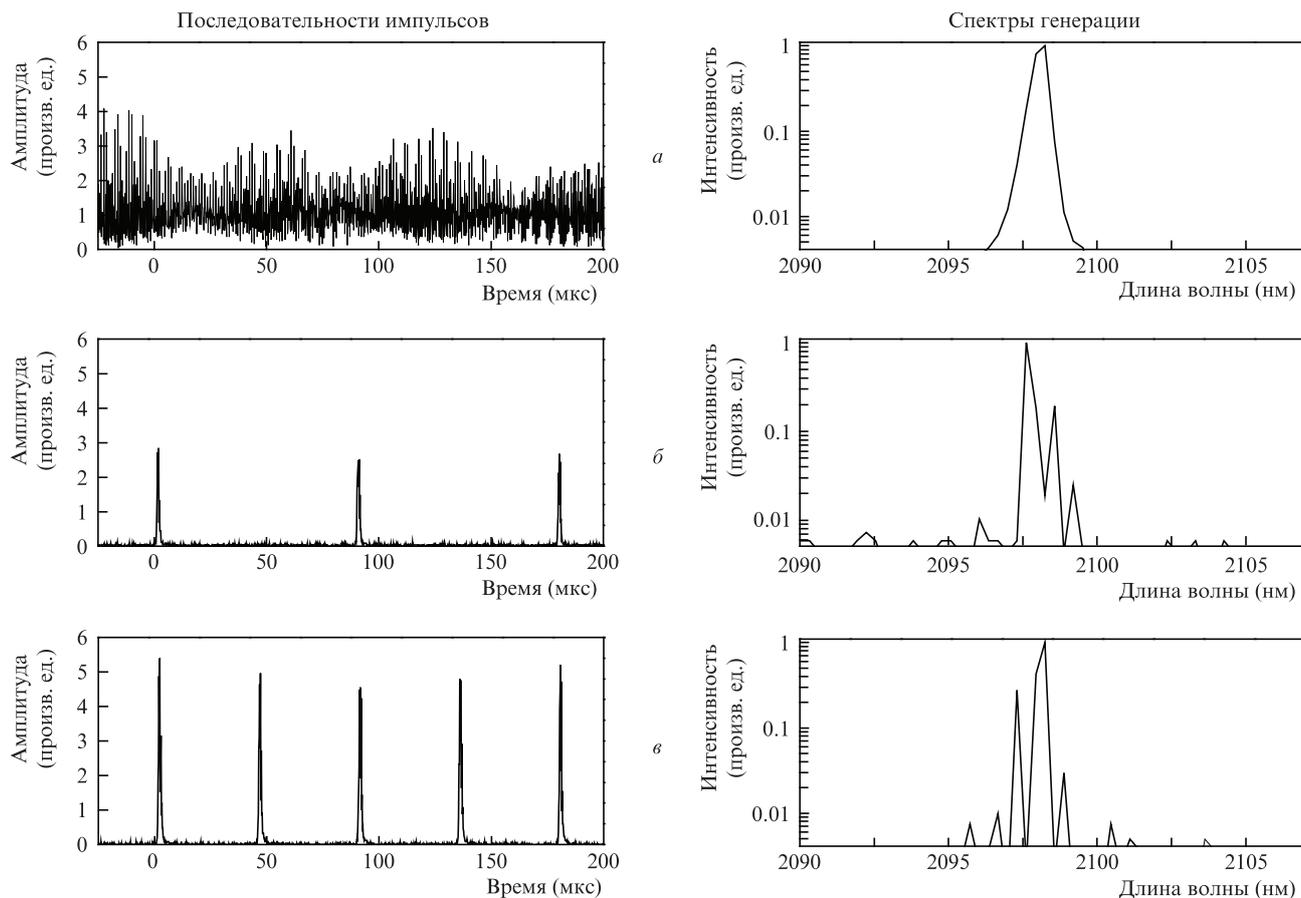


Рис.4. Последовательности импульсов генерации гольмиевого импульсно-периодического лазера (слева) и спектры лазерного излучения (справа) без модулирующего напряжения и при мощности накачки 1.8 Вт (*a*), при амплитуде напряжения на модуляторе 10 В и мощности накачки 1.8 Вт (*б*) и при амплитуде напряжения на модуляторе 10 В и мощности накачки 2.9 Вт (*в*).

рамический цилиндр. Как видно из рисунка, пропускание модулятора колеблется в диапазоне 10% – 90%, что может быть обусловлено отсутствием контроллеров поляризации. Поскольку функции пропускания достигают максимума и минимума несколько раз за период действия управляющего напряжения, можно считать, что при максимальном напряжении разность хода в плечах интерферометра превышает несколько длин волн.

В отсутствие управляющего напряжения на фазовом модуляторе мощность выходного излучения была хаотически промодулирована (рис.4,*a*) во всем диапазоне исследованных мощностей накачки (1 – 3.5 Вт). Пороговая мощность накачки составляла 1 Вт. Стабильный импульсно-периодический режим генерации достигался при подаче периодического напряжения на фазовый модулятор и мощностях накачки от 1.8 до 2.9 Вт.

На рис.4,*б*, *в* (слева) приведены осциллограммы сигналов с фотоприемника на выходе волоконного лазера. Частота следования импульсов при мощности накачки 1.8 Вт (рис.4,*б*) совпадает с частотой модулирующего напряжения. Средняя мощность на выходе составила 30 мВт при длительности импульса 0.8 мкс. Спектр излучения при подаче модулирующего напряжения на фазовый модулятор приобретал сложную изрезанную форму с центральной длиной волны, соответствующей пику отражения ВБР. Увеличение мощности накачки от 1.8 до 2.9 Вт вызывало рост пиковой мощности волоконного лазера с 2.6 до 3.9 Вт и увеличение частоты следования импульсов в два раза (рис.4,*в*), средняя мощность при этом составля-

ла 78 мВт, а длительность импульсов – 0.9 мкс. Спектр излучения и в этом случае сохранял сложную структуру. Параметры модулирующего напряжения не менялись: амплитуда напряжения была равна 10 В, а частота модуляции – 11.2 кГц.

Исследовалась также зависимость формы импульса излучения от амплитуды модулирующего напряжения в диапазоне 4 – 10 В. Мощность иттербиевого лазера накачки не менялась и составляла 1.8 Вт, а частота модуляции – 11.2 кГц. На рис.5 представлены формы импульсов для четырех значений напряжения, подаваемого на пь-

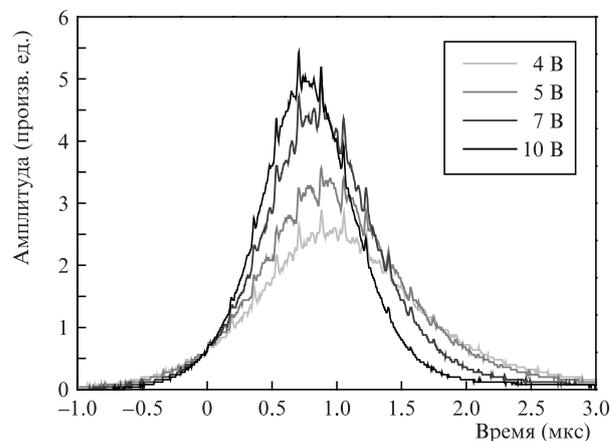


Рис.5. Изменение параметров выходных импульсов при различных амплитудах модулирующего напряжения.

зокерамику. Как видно из рисунка, с ростом увеличения амплитуды управляющего напряжения длительность импульса сокращалась от 1.56 до 0.8 мкс. Пиковая мощность при этом увеличивалась с 1.2 до 3.09 Вт. Полученные результаты можно объяснить тем, что в экспериментах время переключения добротности сравнимо по порядку величины с длительностью импульсов. Это приводит к зависимости амплитуды и длительности импульсов от скорости переключения добротности. При возрастании амплитуды модулирующего напряжения, подаваемого на пьезокерамику, время переключения добротности модулятора Маха–Цендера уменьшается, что и вызывает увеличение амплитуды и уменьшение длительности генерируемых лазерных импульсов.

4. Заключение

В настоящей работе изложен способ модуляции добротности гольмиевого волоконного лазера с помощью внутрирезонаторного волоконного модулятора, образованного интерферометром Маха–Цендера, оптическая длина одного из плеч которого управляется переменным напряжением, подаваемым на пьезокерамику.

Зарегистрированы импульсы с длительностью 0.9 мкс и пиковой мощностью 3.9 Вт. Отсюда следует, что на длине волны генерации волоконного лазера 2098 нм энергия импульса модуляции добротности достигает 3.5 мкДж. Минимальная полученная длительность импульса составила 0.8 мкс. Таким образом, в работе продемонстрированы параметры лазерного излучения, сравнимые с параметрами лазеров, режим модуляции добротности которых получен другими, более сложными способами. Представленный нами метод модуляции добротности обладает большими возможностями для управления частотой следования (особенно в диапазоне низких частот) импульсов лазерного излучения, чем дает случай самомодуляции, когда лазер работает в относительно узком (100 – 500 кГц) диапазоне частот. При этом мы сохраняем возможность управления длительностью импульса. Кроме того, представленная схема предпочтительнее схемы со стандартными электрооптическими модуляторами по до-

ступности и простоте управления при решении определенных задач, т. к. для управления пьезокерамикой достаточно простого аналогового генератора треугольных импульсов. Тем не менее данная схема требует оптимизации, в том числе возможности управления поляризацией плеч модулятора, что может привести к увеличению пиковой мощности лазера.

В будущем гольмиевые лазеры, использующие предложенный метод модуляции добротности, можно будет внедрить в лазерные системы, применяемые для позиционирования, сканирования поверхностей и измерения расстояний.

Работа была поддержана РАН в рамках программы «Основные и прикладные задачи фотоники и физики новых оптических материалов» (проект № I.25П) и Министерством образования и науки РФ (проект № 14.Z50.31.0015).

1. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P. *2 μ m Laser Sources and their Possible Application* (Croatia: InTech, 2010, pp 471 – 500).
2. Филатова С.А., Цветков В.Б., Курков А.С. *Прикладная фотоника*, **1**, 130 (2014).
3. Антипов С.О., Камынин В.А., Медведков О.И., Маракулин А.В., Минашина Л.А., Курков А.С., Бараников А.В. *Квантовая электроника*, **43** (7), 603 (2013) [*Quantum Electron.*, **43** (7), 603 (2013)].
4. Sholokhov E.M., Marakulin A.V., Kurkov A.S., Tsvetkov V.B. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 382 (2011).
5. Sanchez F., Le Boudec P., Francois P.L., Stephan G. *Phys. Rev. A*, **48**, 2220 (1993).
6. Le Boudec P., Francois P.L., Delevaque E., Bayon J.-F., Sanchez F., Stephan G.M. *Opt. Quantum Electron.*, **25**, 501 (1993).
7. Камынин В.А., Курков А.С., Минеева Е.А., Маракулин А.В., Минашина Л.А. *Квантовая электроника*, **42** (7), 588 (2012) [*Quantum Electron.*, **42** (7), 588 (2012)].
8. Плоцкий А.Ю., Курков А.С., Яшков М.Ю., Бубнов М.М., Лихачев М.Е. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 559 (2005) [*Quantum Electron.*, **35**, 559 (2005)].
9. Joeng Y., Kim Y., Liem A., et al. *Opt. Express*, **13**, 25, 10302 (2005).
10. Воронин В.Г. и др. *Вестник моск. ун-та. Сер. Физика. Астрономия*, **5**, 35 (2005).
11. Воронин В.Г., Камынин В.А. *Прикладная фотоника*, **2** (2), 135 (2015).