

# Модуляции добротности тулиевого волоконного лазера с использованием гольмиевого волоконного затвора

Я.Э.Садовникова, В.А.Камынин, А.С.Курков, О.И.Медведков, А.В.Маракулин, Л.А.Минашина

*Предложена и реализована новая схема тулиевого волоконного лазера с пассивной модуляцией добротности. Особенностью схемы является использование в качестве затвора отрезка волокна, легированного ионами гольмия с высокой концентрацией. Получена генерация на длине волны 1.96 мкм с энергией импульсов 3 мкДж. Длительность импульсов составила 600 нс, максимальная частота следования – 80 кГц.*

**Ключевые слова:** волоконный лазер, модуляция добротности.

## 1. Введение

Импульсные волоконные лазеры представляют значительный интерес, поскольку позволяют получать большие пиковые мощности и энергии при относительно невысокой мощности накачки и могут найти применение при обработке материалов, в медицине, лазерной локации и др. При этом для различных применений часто используются лазеры с разными длинами волн, длительностями импульсов и частотами их повторения. В настоящее время предложен ряд методов получения импульсного режима, основанных как на синхронизации мод лазера, так и на модуляции добротности. Одним из способов модуляции добротности волоконного лазера является пассивная модуляция с использованием волоконного насыщающегося поглотителя [1]. К достоинствам данного способа можно отнести простоту реализации в полностью волоконном исполнении, что значительно упрощает как изготовление лазера, так и его применение.

Импульсный режим в волоконных лазерах (как и в других лазерах) может быть осуществлен при внесении в резонатор элемента, обладающего нелинейным поглощением в области генерации. Релаксация возбужденных ионов поглотителя на основной уровень может происходить различными путями. В работе [2] был реализован неодимовый волоконный лазер с затвором на основе волокна, легированного ионами  $\text{Cr}^{4+}$ , а в работе [3] – иттербиевый лазер с поглотителем на оптическом волокне, легированном ионами  $\text{Sm}^{3+}$ . В обоих случаях релаксация

ионов поглотителя происходила в результате безызлучательного перехода. В работе [4] исследовался иттербиевый лазер с затвором на основе волокна, легированного висмутом, при этом релаксация ионов висмута происходила за счет возбуждения собственной лазерной генерации в поглотителе. Эрбиевый волоконный лазер с волоконным поглотителем, легированным ионами тулия с высокой концентрацией, был продемонстрирован в [5]. В этой работе релаксация значительной части ионов поглотителя осуществлялась в результате ион-ионного взаимодействия.

В работе [6] была предпринята попытка получения импульсной генерации тулиевого волоконного лазера с использованием затвора на основе волокна, легированного ионами гольмия. Схема лазера была основана на дискретных элементах и не содержала спектрально селективных элементов. Гольмиевый волоконный затвор устанавливался на выходе тулиевого волоконного лазера. Генерация происходила на наборе длин волн, присущих как тулиевому, так и гольмиевому лазерам, поэтому определить использованную конфигурацию как тулиевый лазер достаточно сложно.

В настоящей работе реализована новая конфигурация волоконного лазера с пассивной модуляцией добротности, а именно тулиевого волоконного лазера с затвором на основе легированного ионами гольмия волокна, который располагался внутри резонатора, образованного селективными брэгговскими волоконными отражателями. При этом концентрация поглощающих ионов выбиралась достаточно большой – такой, чтобы обеспечить их релаксацию за счет ион-ионного взаимодействия. Следует отметить, что в работе [7] волокно, легированное ионами гольмия, использовалось в качестве затвора для иттербиевого импульсного лазера. Кроме того, такие волокна использовались для получения эффективной генерации в двухмикронном диапазоне [8] вплоть до длины волны 2.21 мкм [9].

## 2. Схема эксперимента

На рис. 1 представлена схема тулиевого лазера с модуляцией добротности. В качестве активной среды использовалось волокно, легированное ионами тулия с концен-

**Я.Э.Садовникова.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский государственный университет приборостроения и информатики, Россия, 107966 Москва, ул. Стромьнка, 20

**В.А.Камынин, А.С.Курков.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: kurkov@kapella.gpi.ru

**О.И.Медведков.** Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38

**А.В.Маракулин, Л.А.Минашина.** ФГУП «Российский федеральный ядерный центр – ВНИИТФ им. Е.И.Забабихина», Россия, Челябинская обл., 456770 Снежинск, ул. Васильева, 13

Поступила в редакцию 10 сентября 2013 г., после доработки – 24 октября 2013 г.

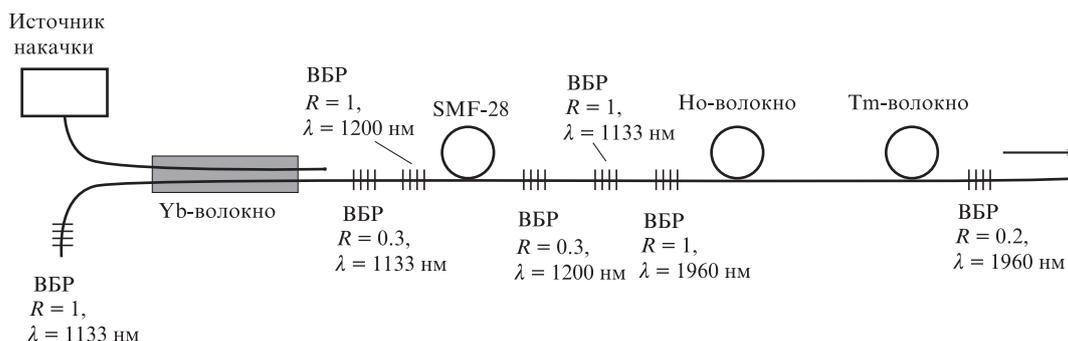


Рис.1. Схема тулиевого лазера с модуляцией добротности.

трацией около  $5 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , длина волокна в резонаторе равнялась 2 м, что обеспечивало поглощение излучения накачки около 30 дБ. Диаметр сердцевины активного волокна составил примерно 10 мкм. Ионы тулия в кварцевом стекле имеют оптический переход  ${}^3F_4 \rightarrow {}^3H_6$ , обеспечивающий генерацию в области 1.85–2.05 мкм. В нашем случае длина волны генерации (1.96 мкм) определялась волоконными брэгговскими решетками (ВБР) с различным отражением  $R$ , формирующими резонатор. Накачка тулиевого лазера обеспечивала переход  ${}^3H_6 \rightarrow {}^3H_5$  на длине волны 1.2 мкм. Аналогичный подход использовался в работе [10]. В качестве источника накачки использовался одноступенчатый ВКР-лазер на основе стандартного одномодового волокна SMF-28. В свою очередь, ВКР-лазер накачивался иттербиевым волоконным лазером, излучающим на длине волны 1.13 мкм.

В качестве затвора между входной решеткой и тулиевым волокном помещался отрезок волокна, легированного ионами гольмия, с концентрацией  $3 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , диаметр сердцевины волокна составил около 10 мкм. Длина отрезка составила 5 см, что обеспечивало поглощение на длине волны генерации около 10 дБ. Для использованной длины волокна поглощение на длине волны 1.96 мкм, обусловленное переходом  ${}^5I_8 \rightarrow {}^5I_7$ , составило около 10 дБ. Доля ионов гольмия в кластерах, безызлучательно релаксирующих за счет ион-ионного взаимодействия, была около 30% [11].

### 3. Результаты и обсуждение

При длине поглотителя 5 см порог генерации составил 700 мВт. Генерация происходила на длине волны 1.96

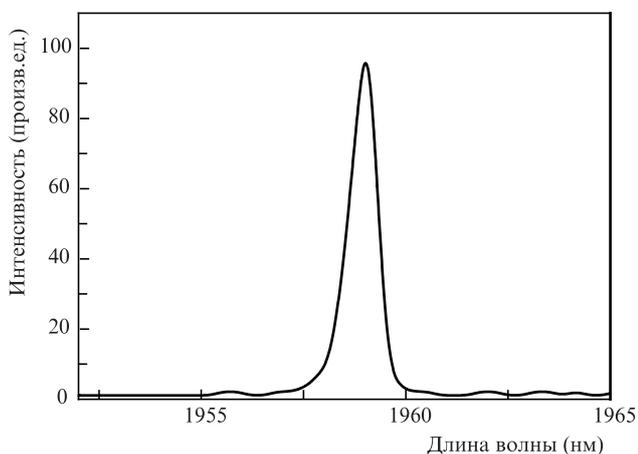


Рис.2. Спектр излучения тулиевого лазера.

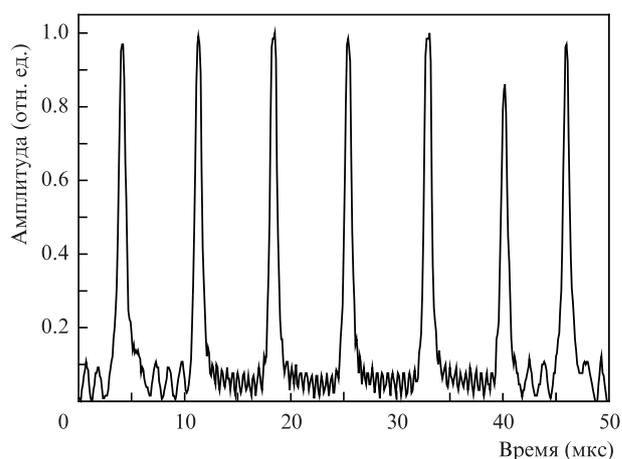


Рис.3. Последовательность генерируемых тулиевым лазером импульсов.

мкм, заданной брэгговскими решетками. Для измерения спектра генерации (рис.2) использовался спектрометр ASP-IR (Авеста-Проект). Ширина линии излучения лазера была около 0.5 нм, что близко к разрешению спектрометра.

Динамические характеристики исследовались с помощью InGaAs-фотоприемника, имеющего рабочий спектральный диапазон 1.2–2.6 мкм и частотный отклик до 15 МГц. На рис.3 показана характерная последовательность импульсов на выходе лазера. Частота генерации линейно возрастала с увеличением мощности накачки, достигая 80 кГц при максимальной мощности накачки 2.1 Вт. Длительность лазерного импульса составила 600 нс.

На рис.4 показана зависимость средней выходной мощности от мощности накачки. Дифференциальная эффективность равна 17%, а максимальная средняя мощность – 235 мВт. По оценке энергия импульса составляет 3 мкДж, а пиковая мощность – 5 Вт. Отношение периода следования импульсов к их длительности равняется примерно 20, что показывает перспективность применения усилителя для повышения энергии импульса и пиковой мощности. Отметим, что энергетические характеристики могут быть улучшены путем использования накачки в области длин волн 0.8 или 1.55 мкм, так как при накачке на 1.2 мкм эффективность падает из-за влияния поглощения из возбужденного состояния.

В заключение сравним энергетические характеристики представленного лазера с характеристиками, полученными с использованием других поглотителей, например на основе пленок графена. Для таких волоконных лазеров типичная длительность импульса составляет несколь-

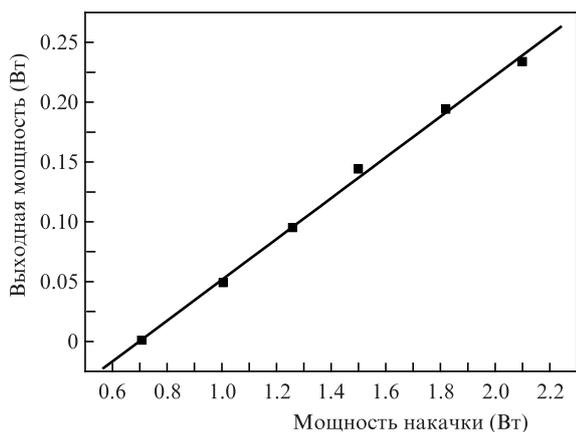


Рис.4. Зависимость средней выходной мощности тулиевого лазера от мощности накачки.

ко микросекунд, а выходная энергия – десятки наноджоулей [12]. Поэтому предложенная нами схема по крайней мере не уступает популярным способам получения режима модуляции добротности.

Таким образом, предложена и реализована новая схема тулиевого волоконного лазера с пассивной модуляцией добротности, особенностью которой является использование в качестве затвора отрезка волокна, легированного ионами гольмия с высокой концентрацией. При

этом релаксация значительной части ионов поглотителя осуществляется за счет ион-ионного взаимодействия.

Данная работа была поддержана РФФИ (грант № 13-07-97051 р\_поволжье\_а).

1. Kurkov A.S. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 335 (2011).
2. Tordella L., Djellout H., Dussardier B., Saissy A., Monnom G. *Electron. Lett.*, **39**, 1307 (2003).
3. Fotiadi A.A., Kurkov A.S., Razdobreev I.M. *Proc. Conf. Lasers Electro-Optics Europe* (Baltimor, OSA, 2005, p. 515).
4. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **32**, 451 (2007).
5. Kurkov A.S., Sadovnikova Ya.E., Marakulin A.V., Sholokhov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 795 (2010).
6. Jackson S.D. *Appl. Opt.*, **46**, 3311 (2007).
7. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 135 (2009).
8. Курков А.С., Шолохов Е.М., Цветков В.Б., Маракулин А.В., Минашина Л.А., Медведков О.И., Косолапов А.Ф. *Квантовая электроника*, **41**, 492 (2011).
9. Антипов О.С., Камынин В.А., Медведков О.И., Маракулин А.В., Минашина Л.А., Курков А.С., Бараников А.В. *Квантовая электроника*, **43**, 603 (2013).
10. Кравцов К.С., Буфетов И.А., Медведков О.И., Дианов Е.М., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 586 (2005).
11. Курков А.С., Шолохов Е.М., Маракулин А.В., Минашина Л.А. *Квантовая электроника*, **40**, 386 (2010).
12. Ismail M.A., Ahmad F., Harun S.W., Arof H., Ahmad H. *Laser Phys. Lett.*, **10**, 025102 (2013).