

# Влияние параметров резонатора гольмиевого волоконного лазера на характеристики самомодуляции добротности

В.А.Камынин, А.С.Курков, Е.А.Минеева, А.В.Маракулин, Л.А.Минашина

*Исследованы параметры импульсной генерации гольмиевых лазеров на основе высококонцентрированных активных волокон в зависимости от длины волокна. Показано, что при оптимальной длине активного волокна лазер излучает импульсы с пиковой мощностью 38 Вт и энергией 6.7 мкДж. При этом частота повторения импульсов составила 410 кГц, а длительность – 160 нс. Эти параметры сравнимы с характеристиками излучения лазеров в режиме модуляции добротности, полученной другими, более сложными способами.*

**Ключевые слова:** гольмиевый волоконный лазер, модуляция добротности, эффективность генерации.

## 1. Введение

Волоконные лазеры с модуляцией добротности, излучающие в двухмикронном спектральном диапазоне, могут найти применение в медицине, лазерной локации, обработке материалов и других областях [1]. Наиболее длинноволновая генерация (в диапазоне 2–2.15 мкм) у лазеров на основе кварцевых световодов достигается в случае гольмиевых волоконных лазеров [2, 3]. Для получения импульсной генерации в таких лазерах применялась модуляция добротности с использованием затвора на высококонцентрированном гольмиевом волокне [4], однако полученная последовательность импульсов не была регулярной. Одним из способов достижения стабильного режима модуляции добротности является применение насыщающихся поглотителей на основе полупроводниковых структур (SESAM). В случае гольмиевых волоконных лазеров использование SESAM позволило получить режим синхронизации мод [5]. Однако применение полупроводниковых насыщающихся поглотителей (как и углеродных нанотрубок [6]) в режиме модуляции добротности лазера ограничивает энергию импульса из-за лучевого повреждения указанных элементов.

Импульсная генерация волоконных лазеров может наблюдаться и без использования каких-либо управляющих элементов и насыщающихся поглотителей. Так, в работах [7, 8] обнаружено явление самомодуляции в лазерах на основе волокон, легированных ионами эрбия с высо-

кой концентрацией. Возникновение самомодуляции объясняется кластеризацией активных ионов в высококонцентрированных волокнах [9], приводящей к тому, что значительная их часть безызлучательно релаксирует на основной уровень, и они играют роль насыщающегося поглотителя, приводя к появлению импульсного режима генерации. В работе [10] самомодуляция была обнаружена в гольмиевом волоконном лазере, а в [11] исследовано влияние концентрации ионов гольмия на динамику генерации.

Цель настоящей работы – исследование зависимости характеристик импульсной генерации от параметров резонатора (главным образом от длины активного волокна). При этом наибольший интерес представляет получение максимальной пиковой мощности и энергии импульса.

## 2. Эксперимент

В работе проводилось измерение параметров импульсной генерации гольмиевого лазера (частоты повторения импульсов, длительности и средней выходной мощности) для каждой длины резонатора. Схема лазера была аналогична схеме, описанной в работе [11]. Резонатор гольмиевого лазера образован с одной стороны высокоотражающей брэгговской решеткой с резонансной длиной волны 2.07 мкм, а с другой – выходным торцом волокна. Для накачки использовался иттербиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 1.125 мкм и максимальной выходной мощностью 10 Вт, а в качестве активной среды лазера – два типа волокна, различающиеся концентрацией активных ионов. Для образца 1 она составила  $9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ , а для образца (2–3)  $\times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . Каждый из образцов обеспечивал стабильную импульсную генерацию, характерная последовательность импульсов представлена на рис. 1.

В работе [9] было показано, что пиковая мощность в режиме самомодуляции нелинейным образом возрастает с увеличением мощности накачки, поэтому все измерения проводились при максимальной мощности накачки (10 Вт). Длина активного волокна в резонаторе последовательно уменьшалась вплоть до срыва генерации.

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

**Е.А.Минеева.** Московский государственный университет им. М.В.Ломоносова, физический факультет, Россия, 119991 Москва, Воробьевы горы

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

Поступила в редакцию 7 марта 2012 г., после доработки – 13 апреля 2012 г.

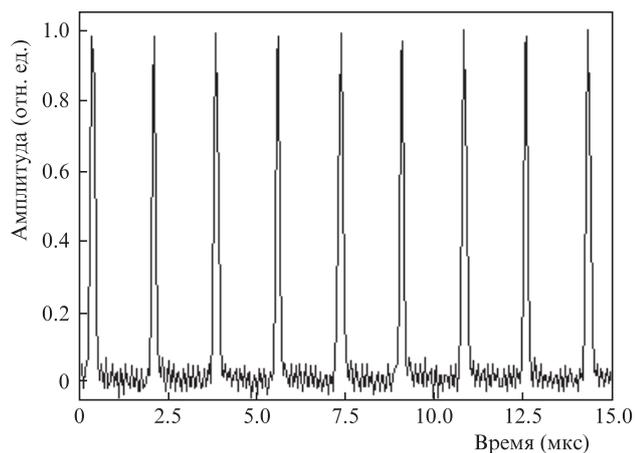


Рис.1. Типичная последовательность импульсов в режиме самомодуляции добротности.

### 3. Результаты и их обсуждение

На рис. 2,а представлены зависимости частоты повторения и длительности импульса от длины волокна для лазера с образцами 1 и 2 в качестве активной среды. Видно, что данные зависимости обладают четко выраженными экстремумами. Для лазера на основе образца 1 максимальная частота повторения импульсов составила 410 кГц, а минимальная длительность импульса – 160 нс. В случае применения образца 2 соответствующие значения составили 470 кГц и 120 нс. Форма импульсов была близка к гауссовой. Увеличение частоты повторения и уменьшение длительности импульсов для образца 2 мо-

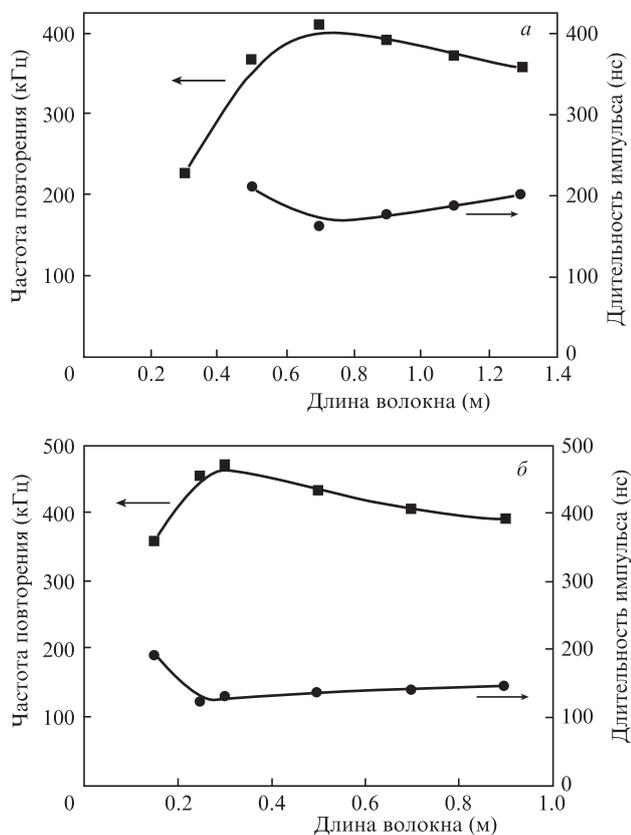


Рис.2. Зависимости частоты повторения и длительности импульса от длины волокна для лазера на основе образцов 1 (а) и 2 (б).

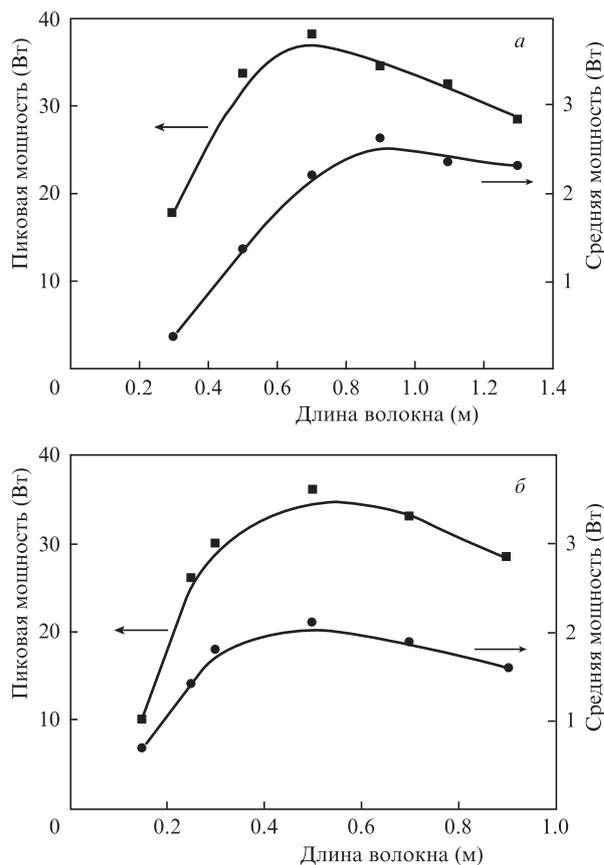


Рис.3. Зависимости средней и пиковой мощности от длины активного волокна для лазера на основе образцов 1 (а) и 2 (б).

гут быть объяснены существенно меньшей длиной резонатора.

На рис.3 представлены зависимости средней и пиковой мощности от длины активного волокна для двух образцов. Из рисунка следует, что максимальные пиковая и средняя мощности достигаются при несколько различающихся длинах активного волокна. Для образцов 1 и 2 пиковая мощность была примерно одинакова и составила 38 и 40 Вт соответственно. Максимальная энергия импульса имела место при тех же длинах волокна и составила 6.7 мкДж для лазера на основе образца 1 и около 5 мкДж для лазера на основе образца 2. Меньшая энергия импульса во втором случае объясняется более высокой частотой повторения импульсов и меньшей средней мощностью. Существование оптимума пиковой мощности и энергии импульса вызвано, скорее всего, балансом между поглощением накачки и поглощением гольмием собственного излучения. Так, при увеличении длины активного световода будет возрастать поглощение накачки, но из-за быстрой релаксации ионов гольмия, вызванной кластеризацией, увеличивается поглощение генерируемых импульсов. Уменьшение же длины приведет к уменьшению числа активных ионов, поглощающих излучение накачки и участвующих в лазерной генерации.

Спектр излучения лазера (рис.4) был достаточно гладким с полушириной около 0.5 нм. Это значение близко к спектральному разрешению анализатора спектра.

Приведенные здесь данные уместно сравнить с результатами, полученными с использованием других методов модуляции добротности. Так, в работе [12] импульсная генерация на ионах гольмия была получена при накачке

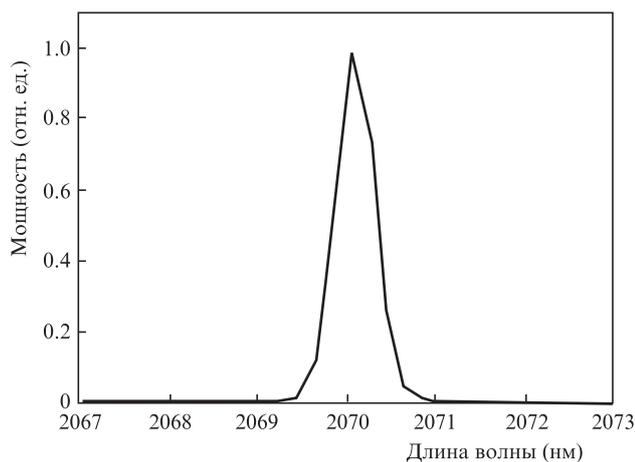


Рис.4. Спектр излучения лазера в режиме самомодуляции добротности.

тулиевым волоконным лазером, который, в свою очередь, накачивался импульсами на длине волны 1.55 мкм. При этом параметры импульсов в [12] были близки к параметрам, приведенным в настоящей работе (длительность импульсов на длине волны 2.1 мкм составила 150 нс, а энергия импульса – 3.2 мкДж). Однако схема лазера в [12] существенно более сложная. Другие сведения по режиму модуляции добротности гольмиевых волоконных лазеров в литературе отсутствуют. Для сравнения можно использовать данные об импульсной генерации тулиевого волоконного лазера, излучающего в области 1.95 мкм [13]. В этом случае режим модуляции добротности обеспечивался полупроводниковым насыщающимся поглотителем SESAM. При частотах повторения 50 и 400 кГц энергия импульса составила 15 и 1.7 мкДж соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что параметры волоконных лазеров, излучающих в режиме самомодуляции добротности, сравнимы с параметрами лазеров в режиме модуляции добротности, полученной другими способами.

## 4. Заключение

В настоящей работе проведено исследование параметров импульсной генерации гольмиевых лазеров на основе высококонцентрированных активных волокон в зависимости от длины волокна. Установлено, что при оптимальной длине активного волокна импульсная пиковая мощность достигает 38 Вт, энергия – 6.7 мкДж, а частота повторения импульсов – 410 кГц при длительности импульса 160 нс. Эти параметры сравнимы с параметрами лазеров в режиме модуляции добротности, полученной с применением полупроводникового насыщающегося поглотителя.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-02-01006-а).

1. Scholle K., Lamrini S., Koopmann P., Fuhrberg P., in *Frontiers in Guided Wave Optics and Optoelectronics*. (Croatia, InTech, 2010, pp 471–500).
2. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I., Dvoyrin V.V., Pyrkov Yu.N., Tsvetkov V.B., Marakulin A.V., Minashina L.A. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 661 (2009)
3. 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).
4. Sholokhov E. M., Marakulin A.V., Kurkov A. S., Tsvetkov V. B. *Laser Phys. Lett.*, **8**, 382 (2011).
5. Чаморовский А.Ю., Маракулин А.В., Лейнонен Т., Курков А.С., Охотников О.Г. *Квантовая электроника*, **42**, 12 (2012).
6. Hakulinen T., Okhotnikov O.G. *Opt. Lett.*, **32**, 2677 (2007).
7. Sanchez F., Le Boudec P., Francois P. L., Stephan G. *Phys. Rev. A*, **48**, 2220, (1993).
8. Boudec P. Le, Francois P.L., Delevaque E., Bayon J.-F., Sanchez F., Stephan G.M. *Opt. Quantum Electron.*, **25**, 501 (1993).
9. Плоцкий А.Ю., Курков А.С., Яшков М.Ю., Бубнов М.М., Лихачев М.Е. и др. *Квантовая электроника*, **35**, 559 (2005)
10. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Marakulin A.V., Minashina L.A. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 587 (2010)
11. Курков А.С., Шолохов Е.М., Маракулин А.В., Минашина Л.А. *Квантовая электроника*, **40**, 386 (2010).
12. Wu K.S, Ottaway D., Munch J., Lancaster D.G., Bennetts S., Jackson. S.D. *Opt. Express*, **17**, 20872 (2009).
13. Kivisto S., Koskinen R., Paajaste J., Jackson S.D., Guina M., Okhotnikov O.G. *Opt. Express*, **16**, 22058 (2008).