

# Субпикосекундный гольмиевый волоконный лазер с накачкой полупроводниковым дисковым лазером

А.Ю.Чаморовский, А.В.Маракулин, Т. Лейнонен, А.С.Курков, О.Г.Охотников

*Впервые реализован гольмиевый волоконный лазер, излучающий в режиме пассивной синхронизации мод. В качестве затвора использован полупроводниковый насыщающийся поглотитель (SESAM). Также впервые для накачки гольмиевых волоконных лазеров применены полупроводниковые дисковые лазеры. Частота следования лазерных импульсов составила 34 МГц, длительность – 830 фс, средняя выходная мощность – 6.6 мВт.*

**Ключевые слова:** волоконные лазеры, гольмиевый волоконный световод, полупроводниковое насыщающееся зеркало, полупроводниковый дисковый лазер, генерация коротких импульсов.

## 1. Введение

Волоконные лазеры, легированные ионами гольмия, излучают по сравнению с другими лазерами на основе кварцевых волокон в наиболее длинноволновой части спектра. Спектральный диапазон их генерации составляет 2–2.15 мкм [1]. Этот диапазон соответствует окну прозрачности атмосферы, что делает такие лазеры перспективными для использования в лазерной локации, для передачи информации по воздуху и в других областях. В последнее время были продемонстрированы цельноволоконные гольмиевые лазеры с выходной мощностью до 10 Вт [2] и квантовой эффективностью 0.81 [3], а также лазер на объемных элементах мощностью 83 Вт [4]. Реализованные устройства излучали либо в непрерывном режиме, либо в режиме самомодуляции добротности с длительностью импульса сотни наносекунд [5]. В то же время для ряда применений представляется необходимым получение импульсов существенно меньшей длительности, достижимой при работе лазера в режиме синхронизации мод. Основной целью настоящей работы являлась реализация схемы гольмиевого волоконного лазера с синхронизацией мод и исследование параметров генерации. Следует также отметить, что в [1–3] для накачки гольмиевых лазеров использовались мощные иттербиевые лазеры, излучающие в области 1.12–1.15 мкм. В нашей работе источником накачки впервые является полупроводниковый дисковый лазер [6], что позволяет сделать схему лазера более компактной. При этом накачка в сердцевину волокна позволяет достигать высокой степени инверсии населенности – в отличие от работы [7], где описан гольмиевый лазер с диодной накачкой в оболочку.

**A.Yu.Chamorovskiy, T.Leinonen, O.G.Okhotnikov.** Optoelectronics Research Centre, Tampere University of Technology, Finland, P.O. Box 692, FIN 33101; e-mail: alexander.chamorovskiy@tut.fi

**А.В.Маракулин.** Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ, Россия, Челябинская обл., 456770 Снежинск, ул. Васильева, 13

**А.С.Курков.** Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38;

e-mail: kurkov@kapella.gpi.ru

Поступила в редакцию 13 сентября 2011 г.

## 2. Схема эксперимента

Экспериментальная схема представлена на рис.1. Активной средой лазера служил волоконный световод, легированный ионами  $\text{Ho}^{3+}$  с концентрацией активных ионов  $5.4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Образец был изготовлен методом MCVD, легирование оксидами гольмия осуществлялось методом пропитки, дополнительно проводилось легирование оксидом алюминия. Разность показателей преломления сердцевины и оболочки световода составляла  $6 \times 10^{-3}$ , длина волны отсечки – около 2 мкм. Дисперсия групповых скоростей в области генерации определялась в основном материальной дисперсией и составляла примерно  $-50 \text{ пс} \cdot \text{нм}^{-1} \cdot \text{км}^{-1}$ . Длина волокна в резонаторе равнялась 0.8 м.

Резонатор лазера был сформирован полупроводниковым насыщающимся поглотителем (SESAM) и диэлектрическим дихроичным зеркалом. Поглотитель, содержащий 15 квантовых ям на основе GaInSb, был выращен методом молекулярно-лучевой эпитаксии в едином процессе монолитно с брэгговским отражателем, состоящим из 18 пар слоев AlAsSb–GaSb. Плотность энергии насыщения поглотителя составила  $46 \text{ Дж/см}^2$ , а глубина модуляции – 10%. При комнатной температуре спектральный максимум фотолюминесценции квантовых ям находился на длине волны 2035 нм. Коэффициент отражения распределенного брэгговского зеркала составлял 99.8% в диапазоне 1850–2150 нм. Время релаксации поглотителя было снижено до нескольких пикосекунд вследствие ионного облучения. Следует отметить, что аналогичные насыщающиеся поглотители использовались для синхронизации мод тулиевых волоконных лазеров, излучающих в области 1.9–2 мкм [8–10].

Дихроичное диэлектрическое зеркало имело высокий коэффициент отражения на длине волны генерации и вы-



Рис.1. Схема эксперимента.

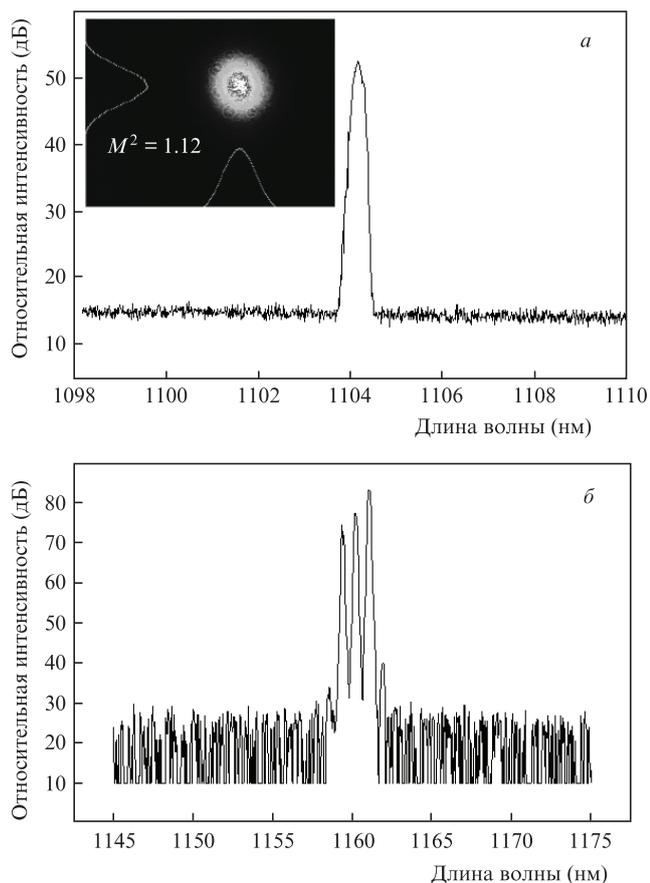


Рис.2. Спектры излучения использованных полупроводниковых дисковых лазеров. На вставке рис.2,а показан профиль пучка и приведен параметр качества пучка.

сокий коэффициент пропускания на длине волны накачки. Отсутствие отражения излучения накачки позволяет предотвратить насыщение и оптическое повреждение насыщающегося поглотителя. Для ввода излучения накачки и вывода излучения световода использовался волоконный мультиплексор. Волоконный ответвитель обеспечивал вывод 1% внутрирезонаторной мощности.

Источниками накачки служили два полупроводниковых дисковых лазера с длинами волн излучения 1104 и 1160 нм, спектры излучения которых представлены на рис.2. Благодаря высокому качеству выходного пучка по-

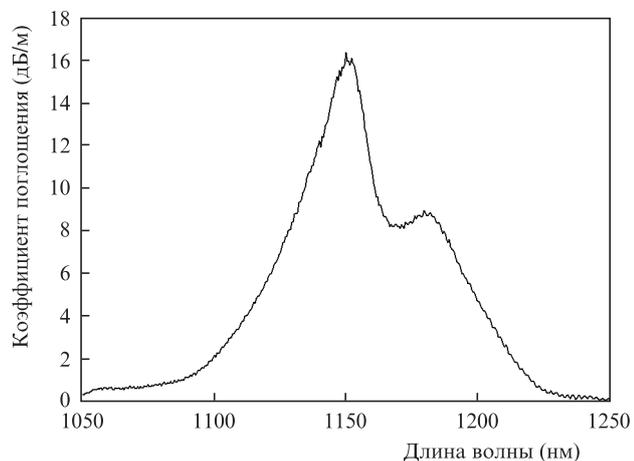


Рис.3. Спектр поглощения гольмиевого световода в области накачки.

лупроводниковых дисковых лазеров (вставка на рис.2,а), коэффициент ввода излучения в световод превысил 70% для обоих образцов. Эффективность использования лазеров накачки определяется спектром поглощения активного волокна. На рис.3 представлен соответствующий спектр полосы поглощения, используемой для накачки. Видно, что длина волны излучения одного из лазеров попадает на коротковолновый край полосы поглощения, а второго – в ее центр. Максимальная мощность излучения накачки, введенного в волокно, составила 1.3 Вт.

### 3. Результаты экспериментов

В первом эксперименте исследовалась работа гольмиевого лазера в непрерывном режиме. Конфигурация лазера была аналогична показанной на рис.1, но вместо насыщающегося поглотителя использовалось высокоотражающее зеркало, а мультиплексор для вывода излучения генерации имел коэффициент деления 30:70. При накачке на длине волны 1104 нм выходная мощность гольмиевого лазера составила 50 мВт при мощности накачки 1 Вт, а в случае накачки на 1160 нм – 130 мВт при мощности накачки 0.9 Вт. В обоих случаях лазер генерировал в непрерывном режиме на длине волны 2.1 мкм (рис.4).

При установке в схему насыщающегося поглотителя SESAM и накачке на длине волны 1104 нм был получен

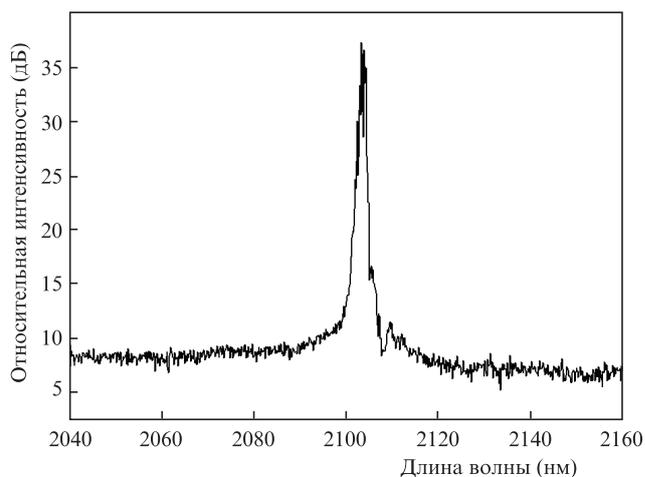


Рис.4. Спектр генерации гольмиевого лазера в непрерывном режиме.

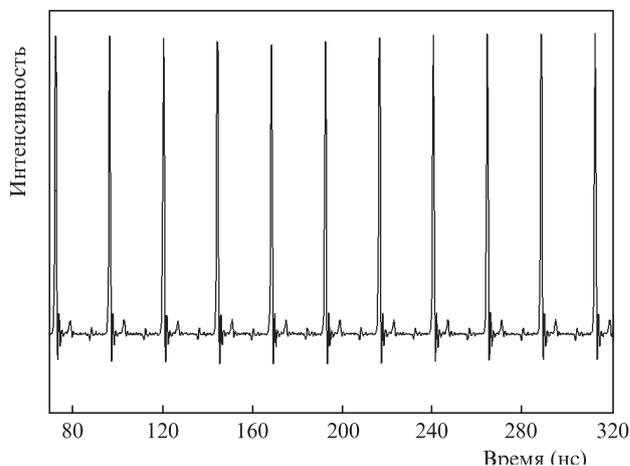


Рис.5. Последовательность импульсов, генерируемая в режиме синхронизации мод.

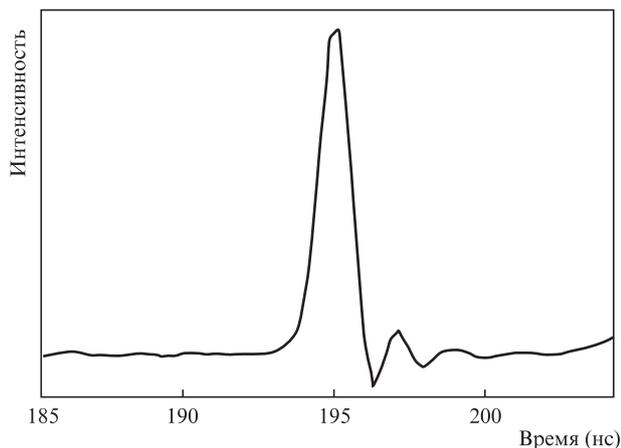


Рис.6. Осциллограмма одиночного импульса.

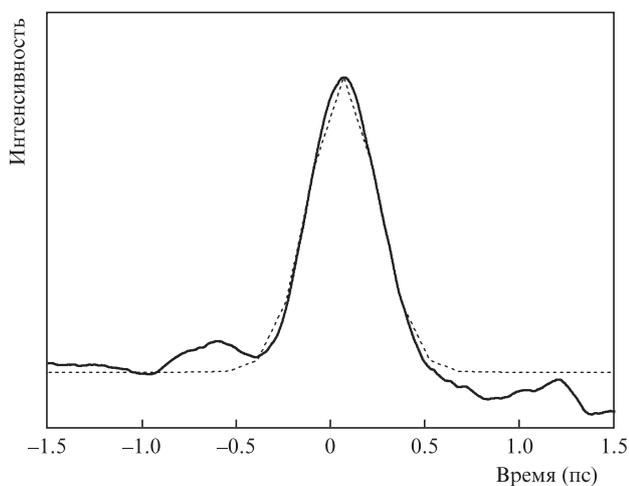


Рис.7. Автокорреляционная функция одиночного импульса.

режим синхронизации мод. Соответствующая последовательность импульсов показана на рис.5. Частота их следования определялась общей длиной резонатора и равнялась 34 МГц, средняя выходная мощность была равна 6.6 мВт. На рис.6 представлена осциллограмма одиночного импульса, полученная с использованием фотодетектора с временным разрешением 0.4 нс. Для определения реаль-

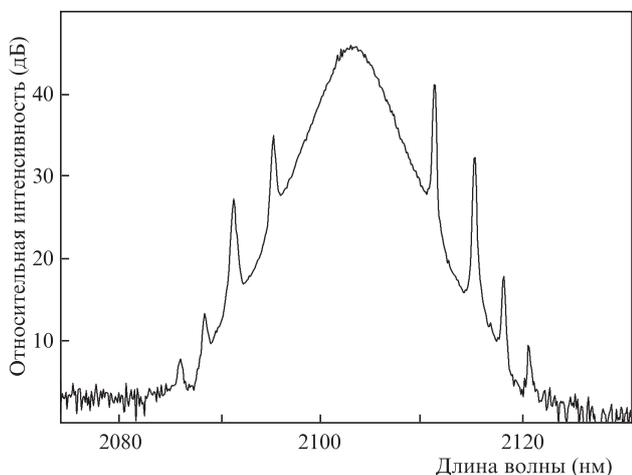


Рис.8. Спектр излучения в режиме синхронизации мод.

ной длительности импульса использовался автокорреляционный метод. На рис.7 показаны автокорреляционная функция и ее аппроксимация. Если считать, что форма импульса описывается функцией  $\text{sech}^2$ , то его длительность составляет 830 фс. На рис.8 представлен спектр выходного излучения импульсного лазера, имеющий ярко выраженные спектральные компоненты, которые указывают на солитонную природу генерируемых импульсов. Произведение спектральной ширины на длительность импульса равно 0.41.

Использование лазера накачки с длиной волны излучения 1160 нм, соответствующей спектральному максимуму поглощения, позволяло получать большие средние мощности. Однако сразу после преодоления порога генерации наблюдалась ярко выраженная тенденция к переходу в многоимпульсный режим. При дальнейшем увеличении накачки возникал режим модуляции добротности. Подобное поведение требует дальнейшего изучения спектральных особенностей кварцевых световодов, легированных гольмием.

#### 4. Заключение

Впервые реализован гольмиевый волоконный лазер, излучающий в режиме пассивной синхронизации мод. В качестве затвора использован полупроводниковый насыщающийся поглотитель (SESAM). Также впервые накачка гольмиевых волоконных лазеров осуществлялась полупроводниковыми дисковыми лазерами, которые позволяют построить мощные и эффективные волоконные лазеры, поскольку их выходное излучение характеризуется значительной мощностью при дифракционно-ограниченном качестве пучка [11]. Это дает возможность вводить в сердцевину одномодового световода излучение мультиваттной мощности с эффективностью свыше 80%. Полученная частота следования импульсов составила 34 МГц, длительность — 830 фс, а средняя выходная мощность — 6.6 мВт.

Авторы выражают благодарность А.Рантамяки, Ю.Раутиайнену и С.Ранта за помощь в изготовлении и установке полупроводниковых лазеров. А.С.Курков благодарит за поддержку РФФИ (грант № 10-02-01006).

1. 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).
2. Kurkov A.S., Dvoyrin V.V., Marakulin A.V. *Opt. Lett.*, **35**, 490 (2010).
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. Jackson S.D., Sabella A., Hemming A., Bennetts S., Lancaster D.J. *Opt. Lett.*, **32**, 241 (2007).
5. Курков А.С., Шолохов Е.М., Маракулин А.В., Минашина Л.А. *Квантовая электроника*, **40**, 858 (2010).
6. Охотников О.Г. *Квантовая электроника*, **38**, 1083 (2008).
7. Jackson S.D., Bugge F., Götz E. *Opt. Lett.*, **32**, 3349 (2007).
8. Guina M., Kivistö S., Suomalainen S., Okhotnikov O. *CLEO/Europe and QEC 2009 Conf. Dig.*, (OSA, C16-3, 2009).
9. Kivistö S., Koskinen R., Paajaste J., Jackson S.D., Guina M., Okhotnikov O.G. *Opt. Express*, **16**, 22058 (2008).
10. Kivistö S., Okhotnikov O.G. *Photon. Technol. Lett., IEEE*, **23**, 477 (2011).
11. Okhotnikov Oleg G. (ed.) *Semiconductor Disk Lasers: Physics and Technology* (Berlin: Wiley-VCH, 2010).