

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

Реализован набор лазеров на основе волоконных световодов, легированных ионами гольмия с концентрацией 1.6×10^{19} см⁻³. Длины волн излучения составили 2.02, 2.05, 2.07 и 2.1 мкм при длине волны накачки 1.15 мкм. Для всех лазеров измерена дифференциальная эффективность генерации. Максимальная эффективность составила 0.455 на длине волны 2.05 мкм. Показано, что на эффективность генерации оказывают влияние как потери на краю колебательной полосы поглощения диоксида кремния, так и кластеризация активных ионов.

Ключевые слова: волоконный лазер, ионы гольмия, квантовая эффективность генерации.

1. Введение

Лазеры на основе волоконных световодов, легированных ионами Ho^{3+} , излучают в диапазоне 2–2.15 мкм и представляют интерес для применений в лазерной локации, в открытых линиях оптической связи и в медицине. Ключевой характеристикой таких устройств является эффективность генерации по отношению к мощности накачки. К наиболее перспективным источникам накачки гольмиевых лазеров относятся иттербиевые волоконные лазеры, излучающие в области 1.12–1.16 мкм, которые позволяют вводить в сердцевину гольмиевого волокна высокие мощности накачки. При этом сохраняются компактность схемы полностью волоконного лазера и его характерные достоинства. В работе [1] был продемонстрирован набор лазеров на основе волоконного световода, легированного ионами гольмия с высокой концентрацией. Спектральный диапазон генерации составлял 2.02–2.15 мкм, максимальная выходная мощность и дифференциальная эффективность достигались на длине волны 2.1 мкм и были равны 4.2 Вт и 0.34 соответственно; отметим, что эффективность слабо менялась в спектральном диапазоне 2.05–2.15 мкм. Увеличение мощности накачки до 35 Вт позволило повысить выходную мощность гольмиевого лазера до 10 Вт [2]. Максимальная дифференциальная эффективность, составившая 41 %, была продемонстрирована в работе [3]. При этом максимальная мощность лазера была равна около 1.6 Вт на длине волны 2.1 мкм.

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

А.В.Маракулин, Л.А.Минашина. Российский федеральный ядерный центр ВНИИТФ, Россия, Челябинская обл., 456770 Снежинск, ул. Васильева, 13; e-mail: anvmag@rambler.ru

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

Поступила в редакцию 17 февраля 2011 г., после доработки – 1 апреля 2011 г.

Цель настоящей работы – оптимизация параметров активного волоконного световода и схемы накачки для повышения дифференциальной эффективности генерации. Также были рассмотрены основные факторы, ограничивающие эффективность генерации.

2. Экспериментальный образец и схема эксперимента

Фундаментальным фактором, который ограничивает эффективность волоконных лазеров двухмикронного диапазона, являются оптические потери, обусловленные краем колебательной полосы поглощения молекул SiO_2 . На рис.1 представлена спектральная зависимость оптических потерь, измеренная в многомодовом световоде с сердцевиной на основе кварцевого стекла, легированного оксидами алюминия и германия. Сходный состав матрицы стекла использовался для получения световодов, легированных ионами гольмия. Видно, что оптические потери в диапазоне 2–2.2 мкм экспоненциально возраста-

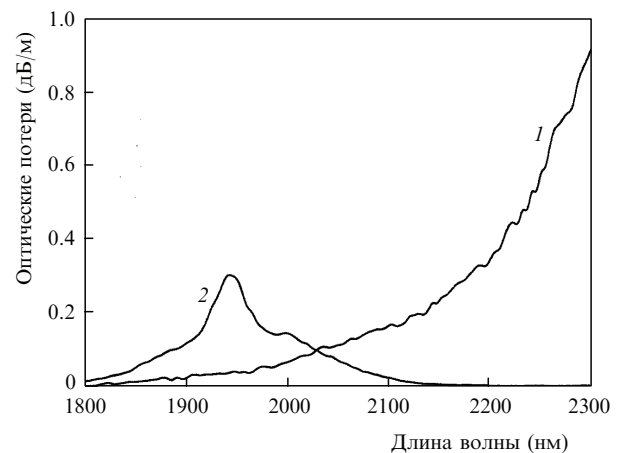


Рис.1. Спектр оптических потерь в световоде с сердцевиной на основе кварцевого стекла, легированного оксидами алюминия и германия (1), и спектр поглощения, обусловленный релаксацией ионов в кластере на основной уровень (2).

ют с 0.07 до 0.33 дБ/м. Такой уровень потерь должен заметно сказываться на эффективности генерации при длине активного волокна порядка 10 м и более. Уменьшить длину активного волокна можно путем увеличения концентрации ионов гольмия.

Однако для световодов с высокой концентрацией активных ионов характерна кластеризация последних, приводящая к тому, что значительная их часть безызлучательно релаксирует на основной уровень, влияя на эффективность генерации, которая уменьшается с ростом концентрации активных ионов [4]. Исходя из этого, для достижения максимальной эффективности генерации был выбран световод с концентрацией активных ионов $1.6 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Измерение относительной доли кластеризованных ионов по уровню непросветленного поглощения [5] позволяет оценить ее в 2%. На рис.1 представлен также спектр поглощения, обусловленный быстрой релаксацией этой доли ионов на основной уровень. Кроме того, активный световод имел дополнительные потери на уровне 0.03 дБ/м, которые измерялись на длине волны 1.3 мкм при помощи рефлектометра.

В работе [6] было показано, что для использованной концентрации ионов гольмия при накачке на $\lambda = 1.125$ мкм оптимальная длина активного световода в резонаторе составляет более 10 м, что приводит к меньшей эффективности, чем у лазера на основе волокна с большей концентрацией ионов Ho^{3+} ($5.4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$). Для уменьшения длины активного световода в качестве источника накачки использовался иттербиевый волоконный лазер с длиной волны излучения 1.15 мкм, поскольку она совпадает с максимумом полосы поглощения ионов гольмия, что обеспечивает эффективное поглощение накачки при меньших длинах световода. Максимальная мощность излучения накачки составила около 9 Вт.

Схема лазера была аналогична схеме, описанной в работе [4]. Резонатор гольмиевого лазера сформирован высокоотражающей брэгговской решеткой и выходным торцом волокна. Всего было исследовано четыре лазера с брэгговскими решетками с резонансами коэффициента отражения на длинах волн 2.02, 2.05, 2.07 и 2.1 мкм. Решетки записывались с использованием интерференционного метода [5].

3. Результаты и их обсуждение

В эксперименте измерялась зависимость выходной мощности гольмиевого лазера от поглощенной мощности накачки. Для каждого лазера подбирались оптимальная длина волокна в резонаторе, соответствующая максимальной выходной мощности. Для лазера на $\lambda = 2.1$ мкм длина волокна составила около 5.5 м. При уменьшении длины волны генерации она сокращалась до 4 м для лазера на $\lambda = 2.02$ мкм. Для разделения непоглощенной мощности накачки и сигнала генерации использовался фильтр с поглощением -27 дБ на длине волны накачки. Доля непоглощенной мощности составляла около 5% от введенной мощности. На рис.2 представлена указанная зависимость для лазера с длиной волны излучения 2.05 мкм. Дифференциальная эффективность в данном случае была равна 0.455 ± 0.01 .

На рис.3 показана спектральная зависимость дифференциальной эффективности генерации для четырех лазеров, максимальное значение которой было достигнуто на $\lambda = 2.05$ мкм и составило 0.455. Из сравнения с дан-

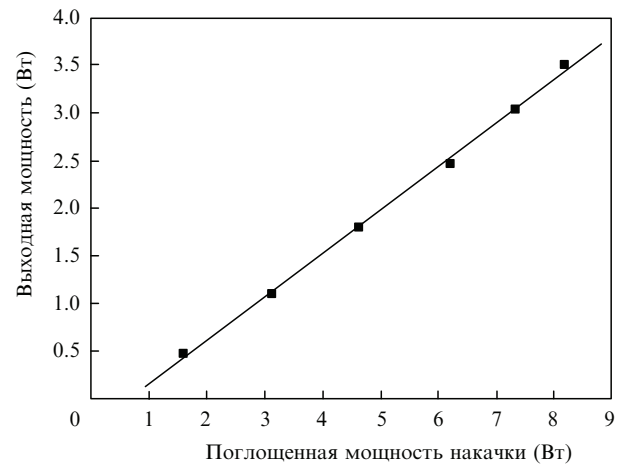


Рис.2. Зависимость выходной мощности генерации на длине волны 2.05 мкм от поглощенной мощности накачки.

ными, приведенными на рис.1, можно сделать вывод, что уменьшение эффективности в длинноволновой части спектра вызывается резким ростом фундаментальных оптических потерь, обусловленных краем колебательной полосы поглощения SiO_2 . Снижение эффективности усугубляется необходимостью увеличения длины активного волокна из-за уменьшения сечения люминесценции в длинноволновой части спектра.

В коротковолновой части спектра на эффективность лазера оказывает влияние поглощение, обусловленное быстрой релаксацией части ионов на основной уровень из-за взаимодействия в кластерах. Отсюда можно сделать вывод о том, концентрация ионов гольмия в активном волокне должна выбираться исходя из заданной длины волны генерации. Так, для лазеров, излучающих в длинноволновой части спектра ($\lambda > 2.1$ мкм), следует использовать волокна с повышенной концентрацией гольмия, чтобы уменьшить длину волокна и, следовательно, влияние фундаментальных потерь. При этом влияние кластеризации на эффективность будет не столь существенным. В то же время для лазеров коротковолнового диапазона ($\lambda < 2.05$ мкм) следует несколько уменьшать концентрацию активных ионов, снижая тем самым вероятность кластеризации. Удлинение активного волокна в этом случае не будет оказывать большого влияния на эффективность генерации.

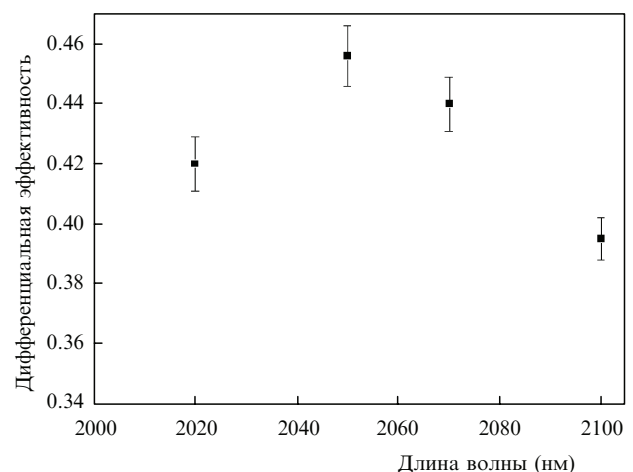


Рис.3. Спектральная зависимость дифференциальной эффективности генерации.

Достигнутая максимальная дифференциальная эффективность соответствует квантовой эффективности 0.81. Суммарные оптические потери на длине волны 2.05 мкм равны примерно 0.2 дБ/м, что при длине резонатора 5 м составляет около 1 дБ на один проход. Таким образом, достигнутая дифференциальная эффективность близка к предельной. Полученный результат можно сравнить с результатами работы [7], где была достигнута дифференциальная эффективность, равная 0.64, при накачке излучением тулиевого волоконного лазера на длине волны 1.98 мкм. Данное значение дифференциальной эффективности соответствует квантовой эффективности 0.67, а следовательно, качество активного волокна и схема резонатора в [7] еще далеки от оптимальных.

4. Заключение

Таким образом, в работе реализован гольмиевый волоконный лазер с рекордной дифференциальной квантовой эффективностью, равной 0.81. Отмечено влияние оптических потерь, обусловленных краем колебательной

полосы поглощения и кластеризацией активных ионов, на спектральную эффективность генерации лазера. Предложено выбирать концентрацию ионов в активном волокне исходя из заданной длины волны генерации лазера.

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

1. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I., Dvoyrin V.V., Purgov 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. Jackson S.D., Li Y. *Electron. Lett.*, **40**, 1174 (2004).
4. Курков А.С., Шолохов Е.М., Маракулин А.В., Минашина Л.А. *Квантовая электроника*, **40**, 386 (2010).
5. Плоцкий А.Ю., Курков А.С., Яшков М.Ю., Бубнов М.М., Лихачев М.Е., Сысолятин А.А., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 559 (2005).
6. Курков А.С., Шолохов Е.М., Маракулин А.В., Минашина Л.А. *Квантовая электроника*, **40**, 858 (2010).
7. Kim J.W., Boyland A., Sahu J.K., Clarkson W.A., in *CLEO/Europe and EQEC 2009 Conf. Dig.* (New York: OSA, 2009, paper CJ6_5).