

Влияние концентрации активных ионов на эффективность генерации гольмиевых волоконных лазеров

А.С.Курков, Е.М.Шолохов, А.В.Маракулин, Л.А.Минашина

Для оптических волокон с сердцевиной на основе кварцевого стекла, легированного ионами гольмия с концентрациями в диапазоне $2 \times 10^{19} - 2 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$, проведено измерение относительной концентрации ионов гольмия, безызлучательно релаксирующих на основной уровень из-за взаимодействия на метастабильном уровне. Показано, что доля таких ионов зависит от абсолютной концентрации активных ионов. На основе исследованных волокон создан набор лазеров с длиной волны 2.05 мкм и измерена дифференциальная эффективность генерации. Обнаружено, что эффективность генерации падает с увеличением концентрации ионов гольмия в волокне.

Ключевые слова: гольмиевой волоконный лазер, кластеризация активных ионов, дифференциальная эффективность генерации лазера

1. Введение

Волоконные лазеры являются перспективным типом излучателей благодаря их компактности, высокой эффективности, отсутствию механических юстировок и др. В настоящее время достаточно хорошо разработаны лазеры на основе оптических волокон, легированных ионами иттербия, эрбия и тулия [1]. Эти источники уже находят применение для обработки материалов, в медицине, оптической локации и пр. Значительно слабее исследованы волоконные лазеры, легированные ионами Ho^{3+} , при этом отсутствуют и коммерчески доступные излучатели данного типа. Актуальность разработки гольмиевых волоконных лазеров определяется тем, что спектральная область их излучения (2–2.2 мкм) попадает в область высокой прозрачности атмосферы. Кроме того, на этой длине волны биоткани обладают значительным поглощением, что обуславливает потенциальные возможности медицинских применений гольмиевых лазеров.

В последнее время были продемонстрированы гольмиевые волоконные лазеры мощностью излучения до 10 Вт в диапазоне 2.05–2.15 мкм [2, 3]. Максимальная дифференциальная эффективность относительно поглощенной мощности накачки на $\lambda = 1.125 \text{ мкм}$ составила 0.34, что соответствует дифференциальной квантовой эффективности 0.63. Хотя полученные характеристики позволяют рассчитывать на практическое использование разработанных лазеров, вопрос повышения эффективности их генерации остается актуальным. Одной из причин снижения эффективности генерации может являться кластеризация активных ионов. Данное явление достаточно подробно исследовано для эрбиевых волокон в работах

[4, 5], где отмечалось, что относительная доля кластеризованных ионов увеличивается с ростом абсолютной концентрации активных ионов, а добавка оксида алюминия снижает вероятность кластеризации. При возбуждении двух активных ионов, находящихся в кластере на метастабильном уровне, происходит передача энергии от одного иона к другому. В результате один переходит на более высокий энергетический уровень, а другой – безызлучательно релаксирует на основной уровень. Таким образом, половина ионов, входящих в кластеры (если считать, что кластеры состоят только из двух активных ионов), находится на основном уровне вне зависимости от мощности накачки и не участвует в процессе усиления. В результате возникают потери мощности как накачки, так и сигнала, поскольку гольмиевый лазер работает по трехуровневой схеме.

Очевидным способом предотвращения кластеризации является уменьшение концентрации активных ионов. Однако в случае гольмиевых лазеров снижение концентрации и соответствующее увеличение длины активного волокна в резонаторе могут привести к снижению эффективности генерации из-за достаточно больших оптических потерь в диапазоне 2–2.2 мкм, обусловленных влиянием края колебательной полосы поглощения, локализованной в области 10 мкм. Величина этих потерь оценивается в 0.1–0.2 дБ/м, поэтому увеличение длины резонатора до 10 м и более может существенно ухудшить характеристики лазера. В работах [2, 3] использовалось волокно с концентрацией активных ионов Ho^{3+} более 10^{20} см^{-3} , что обеспечивало длину резонатора около 1 м. Целью настоящей работы являлось исследование концентрационных эффектов и их влияния на эффективность лазерной генерации. Кроме того, исследовалось волокно, не содержащее оксида алюминия.

2. Экспериментальные образцы

Исследовались пять образцов активных волокон, изготовленных по MCVD-технологии с легированием оксидами гольмия методом пропитки. В табл.1 приведены основные характеристики исследованных волокон. Об-

А.С.Курков, Е.М.Шолохов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, Вавилова, 38; e-mail: kurkov@kapella.gpi.ru, gamlet-sf@rambler.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, LilSn@yandex.ru

Поступила в редакцию 1 марта 2010 г., после доработки – 1 апреля 2010 г.

Табл.1. Основные параметры исследованных волоконных световодов и лазеров на их основе.

Номер образца	Δn_{\max}	C_{Al} (%)	λ_c (мкм)	Поглощение на $\lambda = 1.125$ мкм (дБ/М)	$C_{Ho^{3+}}$ (10^{19} см $^{-3}$)	$2k$ (%)	η (%)
1	0.009	3	1.8	28	19	38	26
2	0.006	2.4	1.55	21	12.5	26	30
3	0.005	2	1.25	17	9	24	32
4	0.003	1.4	1.2	7	4.1	11.4	—
5	0.012	—	1.5	4	2	66	20

Примечание: C_{Al} – массовая концентрация Al; λ_c – длина волны отсечки; $C_{Ho^{3+}}$ – концентрация Ho $^{3+}$; $2k$ – доля ионов в кластерах; η – дифференциальная эффективность.

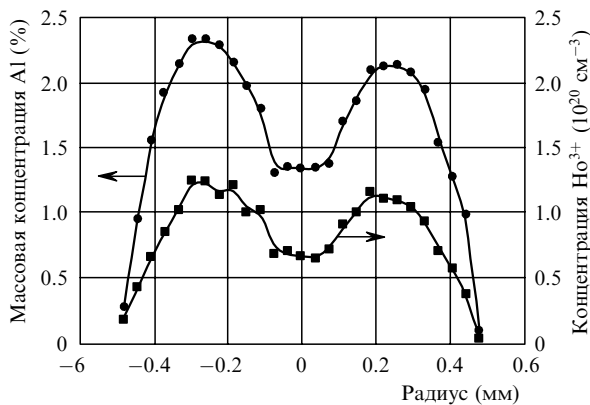


Рис.1. Радиальное распределение легирующих примесей в заготовке образца 2.

разцы 1–4 были дополнительно легированы оксидом алюминия. Профиль показателя преломления образца 5 формировался только добавкой оксида германия. В заготовках образцов 2–4 с помощью рентгеновского микроскопа были измерены распределения легирующих примесей. На рис.1 представлены результаты измерения радиального распределения концентраций гольмия и алюминия в образце 2. В образце 1 концентрация оксида алюминия оценивалась по профилю показателя преломления, концентрация ионов гольмия в образцах 1 и 5 определялась из спектров поглощения в области 1.15 и 2 мкм с учетом распределения поля в данных волокнах.

3. Измерение степени кластеризации ионов Ho $^{3+}$

Для исследования степени кластеризации ионов гольмия в изготовленных волокнах использовался метод, предложенный в работе [4] для эрбиевых оптических волокон и модифицированный в работе [5]. Для определения доли ионов $2k$, объединенных в пары, в настоящей работе измерялась зависимость пропускания излучения T на длине волны 1.125 мкм, соответствующей одной из полос поглощения ионов Ho $^{3+}$, от вводимой мощности P . В качестве источника накачки использовался иттербиевый волоконный лазер. При этом предполагалось, что взаимодействие активных ионов в кластерах приводит к тому, что вследствие передачи энергии часть ионов k быстро релаксирует в основное состояние, поглощая излучение накачки, независимо от его интенсивности. Таким образом, проводилось измерение остаточного поглощения. Для более корректного учета волноводных характеристик активного волокна измеренная зависимость

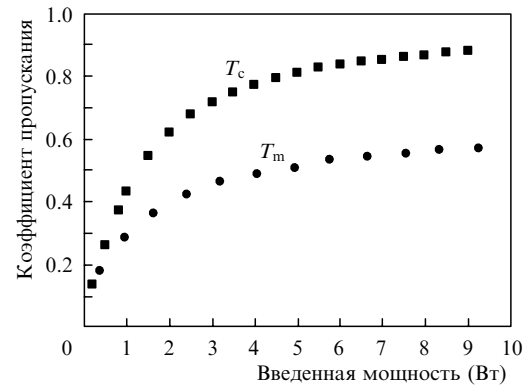


Рис.2. Расчетная (T_c) и измеренная (T_m) зависимости пропускания от введенной мощности накачки для образца 1.

$T_m(P)$ сравнивалась с соответствующей расчетной зависимостью T_c , полученной в предположении, что передача энергии между ионами отсутствует. Доля ионов k , релаксирующих на основной уровень, определялась из следующего соотношения:

$$k = \frac{10 \lg(T_c/T_m)}{L\alpha}, \tag{1}$$

где L – длина использованного отрезка световода, α – коэффициент поглощения, измеренный в режиме слабого входного сигнала.

Расчет пропускания проводился с учетом волноводных свойств волокна, легированного ионами гольмия. На рис.2 представлены расчетная и измеренная зависимости пропускания от введенной мощности накачки для образца 1, имеющего наибольшую концентрацию активных ионов. Длина волокна соответствовала поглощению слабого сигнала на уровне 10 дБ. Исходя из сравнения расчетных и экспериментальных данных, доля ионов, безызлучательно релаксирующих на основной уровень, может быть оценена в 19%.

На рис.3 представлены экспериментальные зависимости коэффициента пропускания от введенной мощности накачки для ряда образцов. Номера кривых соответствуют номеру образца в табл.1. Во всех случаях длина волокон соответствовала поглощению слабого сигнала в 10 дБ. Полученная зависимость для образца 3 слабо отличается от таковой для образца 2. Различие коэффициентов k для этих образцов обусловлено в основном различием их волноводных характеристик. В табл.1 приведены значения доли ионов k для всех исследованных образцов; видно, что k увеличивается с ростом концент-

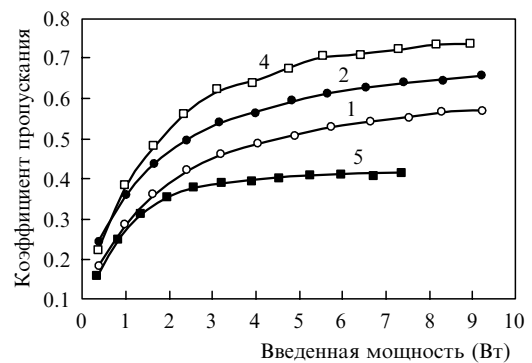


Рис.3. Измеренные зависимости коэффициента пропускания от введенной мощности накачки (номер кривой соответствует номеру образца).

рации активных ионов. Отметим, что для волокна на основе стекла, не содержащего добавки алюминия, концентрация кластеризованных ионов резко возрастает.

4. Исследование эффективности лазерной генерации

Для определения влияния концентрации ионов гольмия и состава сетки стекла на эффективность генерации были проведены эксперименты с использованием исследованных выше образцов в качестве активной среды лазера. Схема лазера представлена на рис.4. В качестве источника накачки использовался иттербиевый волоконный лазер на основе GTWave-волокна, излучающий на длине волны 1.125 мкм. Использование иттербиевых лазеров для накачки гольмиевых лазеров впервые предложено в работе [6] и развито в работах [7, 8]. В свою очередь, для накачки иттербиевого лазера применялся полупроводниковый источник «Милон Лазер». Резонатор гольмиевого лазера был сформирован выходным торцом волокна и высокоотражающей брэгговской решеткой с резонансной длиной волны 2.05 мкм. Для записи решетки использовался интерференционный метод [9], контроль резонансной длины волны проводился по второму порядку. Во всех использованных образцах активных волокон, за исключением образца 4, была получена лазерная генерация. Образец 4 обладал значительными излучательными потерями в двухмикронной области из-за слабых волноводных свойств, что препятствовало возникновению лазерной генерации.

На рис.5 представлены зависимости выходной мощности на $\lambda_{\text{ген}} = 2.05$ мкм от поглощенной мощности накачки на $\lambda_p = 1.125$ мкм. Номера кривых соответствуют номеру образца в табл.1. Для всех лазеров определялась оптимальная длина волокна в резонаторе, соответствующая максимальной выходной мощности, т. к. это существенно для работы лазера по трехуровневой схеме. Для удаления непоглощенной мощности накачки использовался фильтр с поглощением -27 дБ на длине волны накачки и -1 дБ на длине волны генерации. На основании экспериментальных зависимостей была определена дифференциальная эффективность генерации для каждого активного волокна (см. табл.1). Из приведенных данных следует, что эффективность генерации коррелирует со значением доли ионов k , релаксирующих безызлучательно на основной уровень. Максимальная дифференциальная эффективность достигается при минимальном k . Для волокон с дополнительным легированием сердцевины алюминием эффективность падает с увеличением концентрации ионов гольмия. Образец 5, не содержащий оксида алюминия, характеризуется низкой эффективностью генерации даже при относительно невысокой концентрации активных ионов. Следует отметить, что даже

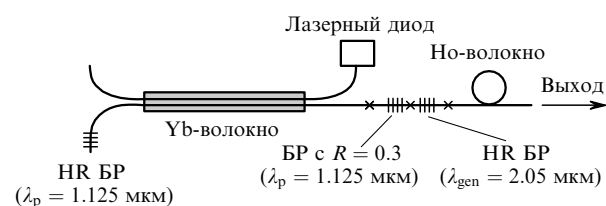


Рис.4. Схема волоконного лазера: HR БР – брэгговские решетки с высоким коэффициентом отражения; R – коэффициент отражения; \times – точки сварки волокон.

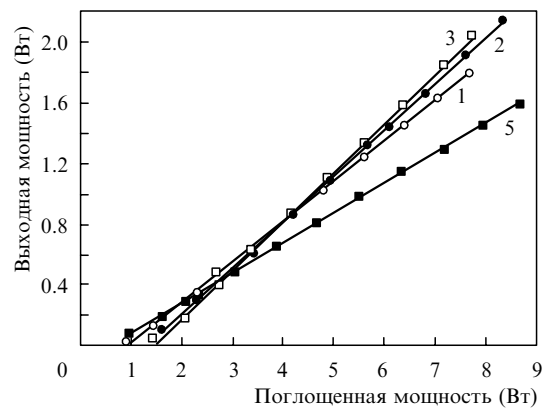


Рис.5. Зависимости выходной мощности гольмиевого лазера ($\lambda_{\text{ген}} = 2.05$ мкм) от поглощенной мощности накачки.

для образца 3 с максимальной дифференциальной эффективностью 32 %, дифференциальная квантовая эффективность составляет 58 %, т. е. заметно ниже квантового предела. Поскольку для этого образца характерно достаточно высокое значение k , можно полагать, что именно кластеризация активных ионов является основной причиной падения эффективности. Следовательно, можно ожидать, что уменьшение концентрации ионов гольмия в активном волокне приведет к увеличению эффективности генерации. В то же время концентрация активных ионов не может быть менее 10^{19} см $^{-3}$, т. к. в этом случае длина волокна в резонаторе превысит 10 м и начнут сказываться дополнительные оптические потери, характерные для кварцевых волокон в этой спектральной области.

5. Выводы

Таким образом, показано, что в оптических волокнах, легированных ионами гольмия, проявляются концентрационные эффекты, обусловленные кластеризацией активных ионов. В свою очередь, это приводит к тому, что значительная доля ионов безызлучательно релаксирует на основной уровень и, как следствие, вызывает уменьшение эффективности генерации гольмиевых волоконных лазеров при увеличении концентрации активных ионов. Концентрационные эффекты менее выражены в волокнах с сердцевиной на основе алюмосиликатного стекла. Для повышения эффективности гольмиевых волоконных лазеров представляется необходимой оптимизация концентрации ионов гольмия в активной среде лазера.

Авторы выражают благодарность О.И.Медведкову, В.В.Двойрину и А.В.Кирьянову за помощь в работе и полезные обсуждения. Данная работа была выполнена при поддержке РФФИ (грант № 10-02-01006-а).

1. Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **34**, 881 (2004).
2. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I., Dvoyrin V.V., Pyrkov Yu.N., Tsvetkov V.B., et al. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 661 (2009).
3. Kurkov A.S., Dvoyrin V.V., Marakulin A.V. *Opt. Lett.*, **35**, 490 (2010).
4. Myslinski P. et al. *IEEE J. Lightwave Technol.*, **15**, 112 (1997).
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. Kurkov A.S., Dianov E.M., Medvedkov O.I., Ivanov G.A., Aksenov V.A., Paramonov V.M., et al. *Electron. Lett.*, **36**, 1015 (2000).
7. Jackson S.D. *Appl. Phys. B*, **76**, 793 (2003).
8. Kurkov A.S., Paramonov V.M., et al. *Laser Phys. Lett.*, **3**, 151 (2006).
9. Васильев С.А., Медведков О.И., Королев И.Г., Божков А.С., Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 1085 (2005).