

Влияние концентрации активных ионов на динамику генерации гольмиевых волоконных лазеров

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

Проведено исследование динамики генерации волоконных лазеров с сердцевиной на основе кварцевого стекла, легированного ионами гольмия с концентрациями в диапазоне $10^{19} - 10^{20} \text{ см}^{-3}$. Показано, что волоконные лазеры на основе волокон с высокой концентрацией активных ионов гольмия излучают в импульсном режиме, но при уменьшении концентрации характер генерации меняется и лазер начинает работать в непрерывном режиме. В то же время, уменьшение концентрации активных ионов и соответствующее увеличение длины волокна в резонаторе приводит к уменьшению эффективности генерации.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный лазер, динамика лазерной генерации, ап-конверсия.

1. Введение

В последнее время были продемонстрированы гольмиевые волоконные лазеры с выходной средней мощностью до 10 Вт на длинах волн 2.05–2.1 мкм с накачкой волоконным иттербиевым лазером [1]. В качестве активной среды таких лазеров использовались волокна, имеющие высокую концентрацию активных ионов (более 10^{20} см^{-3}), при этом дифференциальная эффективность относительно мощности накачки достигала 34 % [2]. В работе [3] было показано, что при таких концентрациях имеет место кластеризация активных ионов, приводящая к тому, что значительная их часть безызлучательно релаксирует на основной уровень, влияя на эффективность генерации. Ионы, релаксирующие на основной уровень, могут играть роль насыщающегося поглотителя, что приводит к появлению импульсного режима генерации. Следует отметить, что импульсная генерация лазеров на основе волокон, легированных ионами эрбия с высокой концентрацией, наблюдалась в работах [4, 5]. В работе [6] обнаружено, что гольмиевый лазер на основе волокна с концентрацией активных ионов $1.9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$ также генерирует в импульсном режиме.

Цель настоящей работы – исследование влияния концентрации ионов гольмия в активных волокнах на динамические свойства лазеров на их основе и выбор концентрации активных ионов, обеспечивающей получение непрерывного режима генерации. Кроме того, проводилось сравнение эффективности генерации для лазеров на основе волокон с высокой и пониженной концентрациями ионов гольмия.

2. Экспериментальные образцы и схема эксперимента

В работе исследовались три образца активных волокон со следующими концентрациями ионов гольмия: $9 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (№ 1), $5.4 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (№ 2) и $1.6 \times 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (№ 3). Все образцы были изготовлены по MCVD-технологии с легированием сердцевины заготовки оксидами гольмия методом пропитки и дополнительным легированием оксидом алюминия. Концентрация ионов гольмия определялась в заготовке образца № 1 с помощью рентгеновского микроскопа, а в образцах № 2 и 3 из спектров поглощения в области 1.15 и 2 мкм с учетом распределения поля в данных волокнах.

Схема эксперимента была аналогична описанной в работе [3]. В качестве источника накачки использовался иттербиевый волоконный лазер на основе GTWave волокна, излучающий на длине волны 1.125 мкм. Резонатор гольмиевого лазера был сформирован высокоотражающей брэгговской решеткой с резонансной длиной волны 2.1 мкм и выходным торцом волокна. Для регистрации динамических характеристик лазеров использовался фотодетектор на основе InGaAs, имеющий рабочий спектральный диапазон 1.2–2.6 мкм и частотную полосу до 15 МГц.

3. Результаты и обсуждение эксперимента

Обнаружено, что лазер на основе образца № 1 с максимальной концентрацией активных ионов стабильно генерирует в импульсном режиме во всем диапазоне мощностей накачки (вплоть до 10 Вт). Характерная форма лазерного импульса представлена на рис.1. Частота повторения и длительность импульсов зависели от мощности излучения накачки. Соответствующие зависимости показаны на рис.2. Видно, что с ростом мощности накачки частота повторения увеличивается нелинейным образом, а длительность импульса уменьшается. Пиковая мощность гольмиевого лазера также возрастает, достигая 10 Вт при мощности накачки 10 Вт. При уменьшении длины волокна в резонаторе от 1.8 до 0.3 м импульсный

А.С.Курков, Е.М.Шолохов. Институт общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. 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: anvmar@rambler.ru, LilSn@yandex.ru

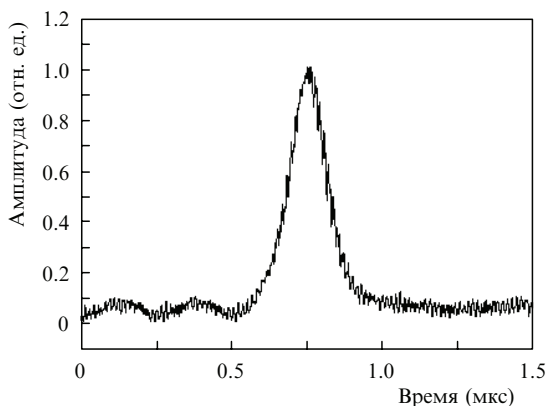


Рис.1. Осциллограмма импульса, генерируемого лазером на основе образца № 1.

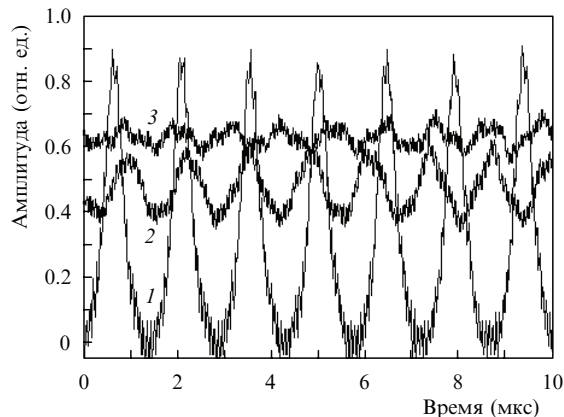


Рис.3. Осциллограммы выходного излучения лазера на основе образца № 2 при мощностях накачки 6 (1), 8 (2) и 10 Вт (3).

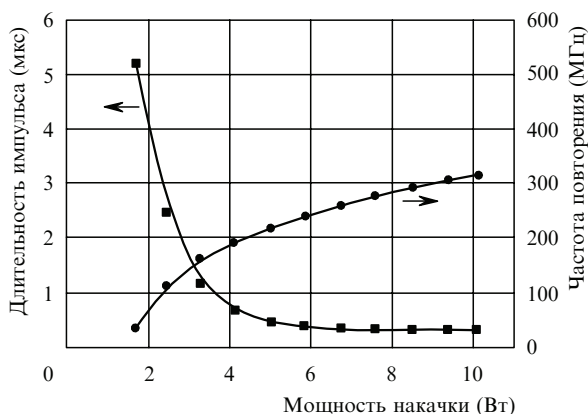


Рис.2. Зависимости частоты повторения и длительности импульса от мощности накачки для лазера на основе образца № 1.

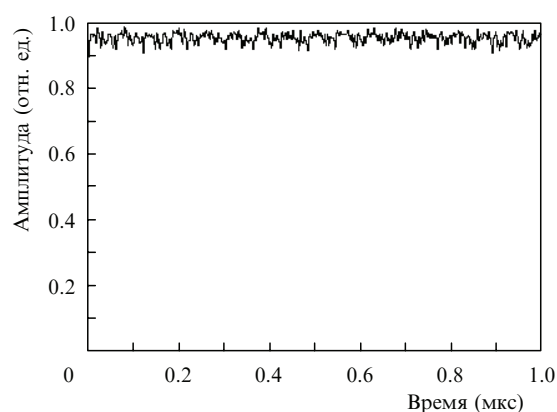


Рис.4. Осциллограмма выходного излучения лазера на основе образца № 3.

характер генерации сохранялся вплоть до ее срыва из-за малой длины активной среды. В целом эти результаты аналогичны результатам работы [6], в которой использовалось волокно с несколько большей концентрацией активных ионов ($1.9 \times 10^{20} \text{ см}^{-3}$).

Для лазера на основе образца № 2 длиной около 3.5 м с меньшей концентрацией ионов гольмия при изменении мощности накачки наблюдалось изменение не только параметров импульсов, но и самого характера генерации. При мощностях накачки до 6 Вт имела место импульсная генерация с параметрами, близкими к параметрам генерации лазера на основе образца № 1. Однако далее с ростом мощности накачки во временной картине излучения лазера появлялся пьедестал, промодулированный по интенсивности, а при еще большем увеличении мощности накачки генерация приобретала черты непрерывного режима. Соответствующие осциллограммы выходного излучения представлены на рис.3. Такое поведение гольмиевого лазера качественно совпадает с поведением эрбиевых волоконных лазеров, описанным в [4].

Очевидно, что для получения непрерывного режима генерации в широком диапазоне мощностей накачки необходимо дальнейшее уменьшение концентрации активных ионов и, соответственно, относительной концентрации их пар, участвующих в процессе ап-конверсии [7]. Действительно, при использовании лазера на основе образца № 3 с длиной 13 м была получена непрерывная генерация, начиная с мощностей накачки, лишь слегка превышающих порог (осциллограмма излучения представлена на рис.4).

Приведенные результаты позволяют сделать вывод, что для получения непрерывного режима генерации необходимо использовать волокна, легированные ионами гольмия с концентрацией $\sim 10^{19} \text{ см}^{-3}$ и ниже. Однако снижение концентрации приводит к существенному увеличению длины волокна в резонаторе лазера, и могут начать сказываться оптические потери, вызванные краем ИК полосы поглощения молекул SiO_2 , локализованной в области 10 мкм. Для проверки влияния увеличения длины волокна лазеров на основе образцов № 2 и 3 на их рабочие характеристики было проведено измерение эффективности генерации. Результаты измерений представлены на рис.5. Видно, что увеличение длины активного

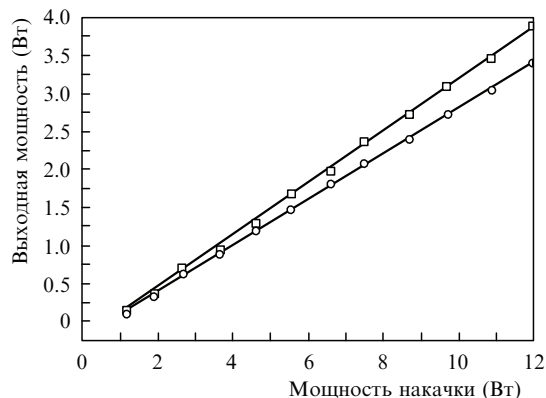


Рис.5. Зависимости выходной мощности от мощности накачки для лазеров на основе образцов № 2 (□) и № 3 (○).

волокна в резонаторе заметно уменьшает эффективность генерации лазера. Так, если лазер на основе образца № 2 с длиной около 3.5 м имел дифференциальную эффективность 34 %, то у лазера на основе образца № 3 с длиной около 13 м она была 27 %. Для уменьшения длины волокна в резонаторе при сохранении концентрации активных ионов можно предложить несколько способов. В частности, представляется перспективной оптимизация волноводной структуры волокна и распределения активной примеси в сердцевине. Кроме того, для накачки перспективно использовать излучение иттербиевого волоконного лазера с длиной волны 1.15 мкм, соответствующей максимуму полосы поглощения ионов гольмия. Возможность изготовления эффективных иттербиевых лазеров на этот спектральный диапазон обсуждена в работе [8].

4. Выводы

Таким образом, показано, что динамика генерации волоконного гольмиевого лазера зависит от концентрации активных ионов в сердцевине волокна. При концентрациях около 10^{20} см⁻³ и выше наблюдается импульсный режим генерации. В лазере с концентрацией $\sim 5 \times 10^{19}$ см⁻³ при увеличении мощности накачки имеет место переход от импульсной к непрерывной генерации. При уменьшении концентрации до уровня 10^{19} см⁻³ непрерывный режим генерации лазера наблюдается во всем диапазоне мощностей накачки. Такое поведение объяс-

няется тем, что в волокнах с высокой концентрацией активных ионов возрастает доля ионов, безызлучательно релаксирующих на основной уровень и выполняющих роль насыщающегося поглотителя. Уменьшение концентрации активных ионов и соответствующее увеличение длины волокна в резонаторе приводит к уменьшению эффективности генерации.

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

1. Kurkov A.S., Dvoyrin V.V., Marakulin A.V. *Opt. Lett.*, **35**, 490 (2010).
2. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Medvedkov O.I., Dvoyrin V.V., Purykov Yu.N., Tsvetkov V.B., Marakulin A.V., Minashina L.A. *Laser Phys. Lett.*, **6**, 661 (2009).
3. Курков А.С., Шолохов Е.М., Маракулин А.В., Минашина Л.А. *Квантовая электроника*, **40**, 386 (2010).
4. Boudec P.Le, Francois P.L., Delevaque E., Bayon J.-F., Sanchez F., Stephan G.M. *Opt. and Quantum Electron.*, **25**, 501 (1993).
5. Kir'yanov A.V., P'ichev N.N., Barmenkov Yu.O. *Laser Phys. Lett.*, **1**, 194 (2004).
6. Kurkov A.S., Sholokhov E.M., Marakulin A.V., Minashina L.A. *Laser Phys. Lett.*, **7**, 587 (2010).
7. Плочкин 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).
8. Kurkov A.S., Paramonov V.M., Medvedkov O.I. *Laser Phys. Lett.*, **3**, 503 (2006).