

Эффективный неодимовый одномодовый волоконный лазер, работающий в области 0.9 мкм

И.А.Буфетов, В.В.Дудин, А.В.Шубин, А.К.Сенаторов, Е.М.Дианов, А.Б.Грудинин, С.Е.Гончаров, И.Д.Залевский, А.Н.Гурьянов, М.В.Яшков, А.А.Умников, Н.Н.Вечканов

Впервые создан эффективный одномодовый волоконный лазер на легированном ионами Nd^{3+} световоде с двойной оболочкой, работающий в непрерывном режиме при комнатной температуре по квазитрехуровневой схеме на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ (длина волны 925 нм) с диодной накачкой на длине волны 805 нм. Реализовано эффективное подавление усиления излучения в резонаторе лазера в области длин волн 1.06 мкм за счет выбора профиля показателя преломления сердцевины световода. Получена выходная мощность лазерного излучения более 0.5 Вт с дифференциальной эффективностью свыше 35 %.

Ключевые слова: волоконный лазер, световод с двойной оболочкой, брэгговская решетка.

Конструкции волоконных лазеров на световодах с двойной оболочкой, легированных ионами неодима и генерирующих на длинах волн около 1.06 мкм (переход ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$), хорошо известны (см., напр., [1]). Значительно труднее получить в такой схеме генерацию на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ (диапазон 0.9 мкм), поскольку в этом случае лазер работает по квазитрехуровневой схеме и, соответственно, коэффициент усиления излучения в четырехуровневой схеме на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{11/2}$ будет всегда выше, чем на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ (сечения излучения переходов можно считать примерно равными, см., напр., [2]).

Создание такого волоконного лазера с накачкой через оболочку открывает путь к получению излучения на длине волны 0.92 мкм в одной поперечной моде с мощностью, сравнимой с достигнутой в настоящее время иттербиевыми лазерами на световодах с двойной оболочкой, – от единиц до сотен ватт. Это позволит, во-первых, создать мощный источник синего излучения путем удвоения частоты, во-вторых, использовать излучение с $\lambda \simeq 0.92$ мкм для накачки волоконных иттербиевых лазеров и усилителей на 0.98 мкм и, в-третьих, с помощью волоконных рамановских лазеров в качестве преобразователей частоты получать излучение примерно такой же мощности на любой длине волны, большей 0.9 мкм, в окне прозрачности световодов на основе плавленого кварца.

И.А.Буфетов, В.В.Дудин, А.В.Шубин, А.К.Сенаторов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики при Институте общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: iabuf@fo.gpi.ru

А.Б.Грудинин. Fianium – New Optics Ltd, 20 Compass Point, Ensign Way, Southampton, UK

С.Е.Гончаров. ООО «Милон Лазер», Россия, С.-Петербург; web-site: www.milon.ru

И.Д.Залевский. ФГУП «НИИ "Полнос" им. М.Ф.Степанаха», Россия, 117342 Москва, ул. Введенского, 3

А.Н.Гурьянов, М.В.Яшков, А.А.Умников, Н.Н.Вечканов. Институт химии высококачественных веществ РАН, Россия, 603600 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступило в редакцию 29 октября 2003 г.

Для реализации такого неодимового лазера необходимо каким-либо образом внести дополнительные потери в резонатор на длине волны 1.06 мкм. При вводе излучения накачки непосредственно в сердцевину световода можно получить генерацию на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ за счет заданного различия коэффициентов отражения зеркал резонатора на длинах волн 0.92 и 1.06 мкм [3, 4]. Максимальная мощность, полученная в такой схеме, составила к настоящему времени 43 мВт [5]. По сравнению с вводом накачки в сердцевину использование световода с двойной оболочкой (и, соответственно, применение более дешевых многомодовых лазерных диодов как источников накачки) обычно снижает на несколько порядков интенсивность излучения накачки в сердцевине при той же его мощности, что затрудняет подавление усиления на $\lambda = 1.06$ мкм.

До недавнего времени на этом переходе мощность излучения порядка нескольких ватт при комнатной температуре была получена только в кристаллических матрицах YAG и YVO₄ [6]. Волоконный лазер на переходе ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ с накачкой через оболочку был реализован лишь при охлаждении активного световода до температуры жидкого азота и, как следствие, при переходе к четырехуровневой схеме генерации [7].

В данной работе получена эффективная лазерная генерация с высокой выходной мощностью в нормальных условиях по квазитрехуровневой схеме, соответствующей переходу ${}^4F_{3/2} - {}^4I_{9/2}$ уровней иона неодима в оптическом волокне на основе плавленого кварца с легированной сердцевиной и двойной оболочкой. Для обеспечения наилучшего поглощения излучения накачки и достижения низких оптических потерь в состав сердцевины были введены Nd₂O₃ (массовая концентрация 1 %), Al₂O₃ (молярная концентрация 1 %) и GeO₂ (молярная концентрация 0.5 %).

Для обеспечения необходимого уровня оптических потерь в полосе $\lambda = 1.06$ мкм с целью подавления генерации в этой области профиль показателя преломления (ППП) световода был выбран в виде, представленном на рис.1. Известно [8–11], что в световодах с таким ППП (W-световоды) основная мода имеет конечную

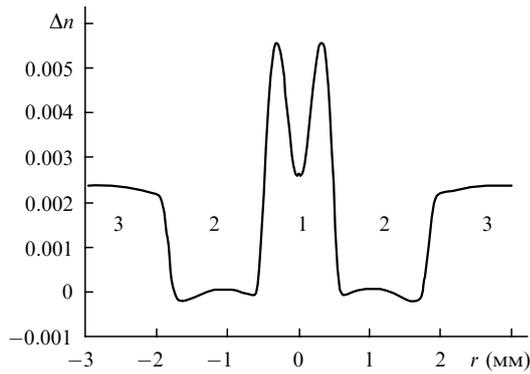


Рис.1. Профиль показателя преломления активного световода, измеренный в преформе: 1 – сердцевина, легированная окислами Nd, Al и Ge; 2 – депрессированная область, легированная F; 3 – внутренняя оболочка из нелегированного плавленого кварца.

длину волны отсечки (в отличие от световодов со ступенчатым ППП без области депрессии). Для понижения показателя преломления в области депрессии в материал заготовки вводился фтор, а в качестве оболочки световода использовалось нелегированное кварцевое стекло. Размеры сердцевины и депрессированной области выбирались так, чтобы длина волны отсечки основной моды лежала между 925 и 1060 нм, что приводило к существенным потерям на вытекание излучения в области 1.06 мкм. Отметим, что аналогичная форма ППП в световоде применялась в [12], что позволяло подавить в эрбиевом усилителе пик усиления на 1530 нм для работы в S-полосе усиления (область 1480–1520 нм).

Схема экспериментальной установки показана на вставке на рис.2. Активным элементом являлся волоконный световод с одномодовой сердцевиной, легированной ионами неодима, и двойной оболочкой. Поперечное сечение внешней (первой) кварцевой оболочки световода имело форму квадрата (аналогично [1]) со стороной 104 мкм. Резонатор лазера был образован парой брэгговских

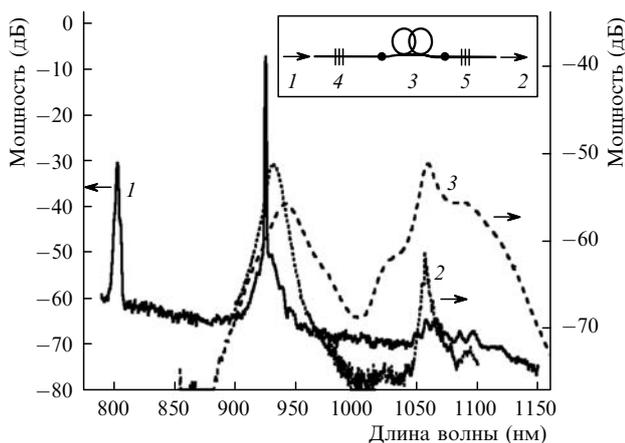


Рис.2. Спектр выходного излучения волоконного неодимового лазера (1). Пик на 805 нм – непоглощенное излучение накачки, пик на 925 нм – излучение генерации, пик в районе 1060 нм – остатки излучения люминесценции. Для сравнения представлены спектр люминесценции на выходе того же волоконного лазера при допороговом уровне накачки (2) и спектр люминесценции волоконного лазера на основе световода без области депрессии показателя преломления (3). На вставке представлена схема лазера: 1 – излучение накачки ($\lambda = 805$ нм); 2 – выходное излучение ($\lambda = 925$ нм); 3 – активный световод; 4 – брэгговская решетка с коэффициентом отражения $R \approx 1$; 5 – выходная брэгговская решетка с $R = 20\%$.

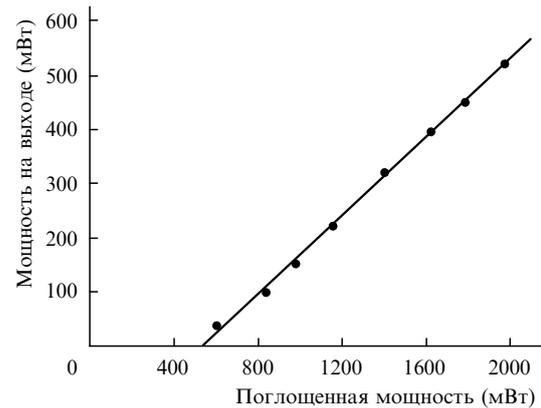


Рис.3. Зависимость выходной мощности излучения ($\lambda = 925$ нм) от поглощенной мощности накачки ($\lambda = 805$ нм) (длина активного участка световода 5.4 м).

решеток с максимумом коэффициента отражения на $\lambda = 925$ нм и со спектральной шириной около 1 нм, записанных в сердцевине одномодового фоточувствительного световода. Отрезки оптических волокон с брэгговскими решетками приваривались к обоим концам активного световода.

Полимерное покрытие световодов имело коэффициент преломления ниже, чем у плавленого кварца, поэтому первая оболочка световодов сама являлась многомодовым световодом с числовой апертурой 0.4. Накачка на длине волны 805 нм осуществлялась многомодовым полупроводниковым лазером с волоконным выводом излучения (диаметр сердцевины 220 мкм, числовая апертура 0.22). Излучение накачки вводилось с помощью объектива в первую оболочку световода со стороны высокоотражающей брэгговской решетки.

Спектр и мощность генерируемого излучения измерялись на выходе волоконного лазера. При мощности излучения накачки ниже пороговой на выходе лазера 2 (рис.2, вставка) регистрировался спектр люминесценции ионов Nd^{3+} в сердцевине световода (кривая 2 на рис.2). Для сравнения на рис.2 представлен спектр люминесценции ионов Nd^{3+} (кривая 3) в другом световоде в такой же схеме и с примерно таким же составом сердцевины, но без области депрессии показателя преломления (подробнее параметры этого световода приведены в [1]). Оба спектра нормированы на одинаковую величину в максимуме. В световоде с областью депрессии показателя преломления (рис.1) максимум люминесценции наблюдался в районе длин волн 930 нм, а интенсивность люминесценции в полосе 1060 нм была примерно на порядок ниже. В световоде без области депрессии соотношение интенсивностей в полосах 930 и 1060 нм обратное, что демонстрирует наличие дополнительных оптических потерь в районе 1060 нм в световоде с ППП, изображенном на рис.1.

При повышении мощности накачки возникала генерация на длине волны 925 нм. Измеренный спектр выходного излучения в этом случае представлен кривой 1 на рис.2. Излучение в районе 1060 нм практически отсутствует, в спектре видна лишь непоглощенная часть излучения накачки с $\lambda = 805$ нм.

Оптимальная длина световода (соответствующая максимальному КПД лазера в условиях эксперимента) составила 5.4 м. При этом поглощенная мощность накачки на пороге лазерной генерации оказалась равной

~ 500 мВт, а дифференциальный КПД генерации составил 36 %. Зависимость выходной мощности излучения от поглощенной мощности накачки представлена на рис.3. Максимальная выходная мощность волоконного лазера составила 0.51 Вт при КПД, равном 25 % (по отношению к поглощенной мощности накачки).

Таким образом, нами была получена при комнатной температуре эффективная генерация в диапазоне 0.9 мкм в лазере на легированном ионами неодима световоде с двойной оболочкой. Усиление на 1.06 мкм было подавлено благодаря использованию W-образного ППП сердцевины активного световода. Достигнутый КПД лазера (25 %) может быть увеличен при накачке лазера источниками излучения более высокой яркости и при соответствующем уменьшении площади поперечного сечения первой оболочки лазерного световода. Используя волоконный лазер такого типа и применяя существующие в настоящее время более мощные источники накачки, можно достигнуть выходной мощности 10–20 Вт. Кроме того, использованная структура активного световода может быть применена в неодимовых усилителях, работающих в диапазоне 0.9 мкм, о чем авторы планируют сообщить в ближайшем будущем.

Авторы выражают благодарность сотрудникам НЦВО при ИОФ РАН М.М.Бубнову, С.А.Васильеву и О.И.Медведкову за помощь при проведении экспериментов и полезные обсуждения.

1. Дианов Е.М., Белов А.В., Буфетов И.А. и др. *Квантовая электроника*, **24**, 3 (1997).
2. Arai K., Namikawa H., Kumata K., et al. *Appl. Phys.*, **59**, 3430 (1986).
3. Alcock I.P., Ferguson A.I., Hanna D.C., Tropper A.C. *Opt. Lett.*, **11**, 709 (1986).
4. Reekie L., Jauncey I.M., Poole S.B., Payne D.N. *Electron. Lett.*, **23**, 884 (1987).
5. Cook A.L., Hendricks H.D. *Appl. Opt.*, **37**, 3276 (1998).
6. Zeller P., Peuser P. *Opt. Lett.*, **25**, 34 (2000).
7. Dawson J.W., Drobshoff A., Liao Z., Beach R.J., et al. *Proc. SPIE Int. Soc. Opt. Eng.*, **4974**, 75 (2003).
8. Унгер Х.-Г. *Планарные и волоконные оптические волноводы* (М.: Мир, 1980, с. 344).
9. Kawakami S., Nishida S. *IEEE J. Quantum Electron.*, **4**, 130 (1975).
10. Monerie M. *IEEE Trans. Microwave Theory Techn.*, **4**, 381 (1982).
11. Andreev A.T., Grudin A.B., Dianov E.M., et al. *Electron. Lett.*, **17**, 416 (1981).
12. Arbore M.A., Zhou Y., Keaton G., Kane T. In: *Proc. of the ECOC* (Copenhagen, Denmark, 2002, paper 2.2.2).