

## Волоконный световод с сердцевинной из германатного стекла для генерации излучения в области 2 мкм

В.В.Двойрин, В.М.Машинский, Л.Д.Исхакова,  
М.В.Яшков, В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов, Е.М.Дианов

*Впервые создан волоконный световод с сердцевинной на основе германатного стекла ( $45\text{SiO}_2-55\text{GeO}_2$ ), легированного тулием, и оболочкой из кварцевого стекла. В волоконном лазере на основе данного световода получена генерация на ионе  $\text{Tm}^{3+}$  ( $\lambda = 1.862$  мкм) с выходной мощностью до 70 мВт при дифференциальной эффективности 37 %.*

**Ключевые слова:** волоконные световоды, волоконные лазеры.

Современные волоконные лазеры работают в спектральном диапазоне 1–2 мкм (см., напр., [1]). Дальнейшее продвижение в область среднего ИК диапазона является безусловно важной задачей вследствие возможного широкого применения волоконных лазеров в медицине, зондировании атмосферы и других областях. В наиболее распространенных световодах на основе кварцевого стекла достаточно мощная и эффективная лазерная генерация получена в области длин волн 1.9–2 мкм [2]. Однако продвижению в более длинноволновый диапазон препятствует рост оптических потерь, обусловленный краем фундаментального многофононного поглощения в кварцевом стекле. В связи с этим представляет интерес исследование материалов, характеризующихся меньшей энергией фонона. Кроме того, оптическая нелинейность таких материалов, потенциально большая, чем у кварцевого стекла, позволит использовать нелинейные эффекты для расширения спектрального диапазона работы лазеров.

Отметим, что указанными свойствами обладают сравнительно недавно разработанные световоды с сердцевинной из германатного стекла, т.е. стекла с преобладающим содержанием диоксида германия, и оболочкой из кварцевого стекла [3]. Как известно, фундаментальный минимум оптических потерь в стеклообразном диоксиде германия находится в области 2 мкм и составляет  $\sim 0.2$  дБ/км [4], тогда как в кварцевом стекле оптические потери минимальны на длине волны 1.55 мкм. Сечение комбинационного рассеяния в стеклообразном  $\text{GeO}_2$  примерно в 10 раз превышает сечение в кварцевом стекле [5]. Кроме того, благодаря большой разности показателей преломления сердцевины и оболочки ( $\Delta n \sim 0.1$ ) такие волоконные световоды обладают малым диаметром поля моды, и поэтому значительная концентрация диоксида германия в сердцевине является дополнительным фактором, усиливающим их нелинейные свойства.

Возможность использования таких световодов в качестве активных сред в волоконных ВКР-лазерах продемонстрирована в [6], где были реализованы лазер с выходной мощностью 10 Вт и длиной световода всего 3 м и лазеры, генерирующие на длинах волн до 2.2 мкм. Данные параметры достигнуты с использованием внешней накачки иттербиевым и эрбиевым волоконными лазерами. Для упрощения конструкции волоконного лазера представляется интересным совместить в одном световоде две среды: стекло, активированное редкоземельным элементом (для генерации исходного излучения) и материал (для его эффективного нелинейного преобразования). В настоящей работе была решена первая часть этой задачи: разработан световод, часть сердцевины которого изготовлена из германатного стекла, легированного ионами тулия ( $\text{Tm}^{3+}$ ), и на его основе создан и исследован волоконный лазер, генерирующий на длине волны 1.86 мкм.

Световодная заготовка с сердцевинной из германатного стекла была изготовлена методом MCVD с использованием опорной трубы из кварцевого стекла фирмы Heraeus. После осаждения буферной оболочки из стекла состава  $\text{SiO}_2 - \text{P}_2\text{O}_5 - \text{F}$ , согласованного по показателю преломления с кварцевым стеклом, производилось осаждение нескольких германосиликатных слоев с постепенным повышением концентрации  $\text{GeO}_2$  примерно до 20 мол. %. На этом этапе путем осаждения из газовой фазы вводился тулий (в качестве исходного вещества использовался летучий металлоорганический комплекс тулия  $\text{Tm}(\text{tmhd})_3$ ). На последнем этапе осаждалось германатное стекло сердцевины. Химический состав полученной заготовки определялся методом рентгеновского микроанализа. Максимальная концентрация  $\text{GeO}_2$  составляла 55 мол. %, концентрация тулия была близка к уровню обнаружения и составляла около 0.2 вес. %. Из исходной заготовки вытягивался многомодовый световод (электронная микрофотография торца световода и распределение  $\text{GeO}_2$  показаны на рис. 1). После дополнительного жакетирования исходной заготовки был вытянут одномодовый световод с диаметром сердцевины около 2 мкм и длиной волны отсечки в области 1.4 мкм.

Спектр оптических потерь в световоде, измеренный с использованием фотоприемника PbS, приведен на рис. 2. Широкая полоса поглощения с максимумом в области

В.В.Двойрин, В.М.Машинский, Л.Д.Исхакова, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: vlad@fo.gpi.ru, vmm@fo.gpi.ru

М.В.Яшков, В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов. Институт химии высококипящих веществ РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступило в редакцию 10 ноября 2010 г., после доработки – 29 ноября 2010 г.

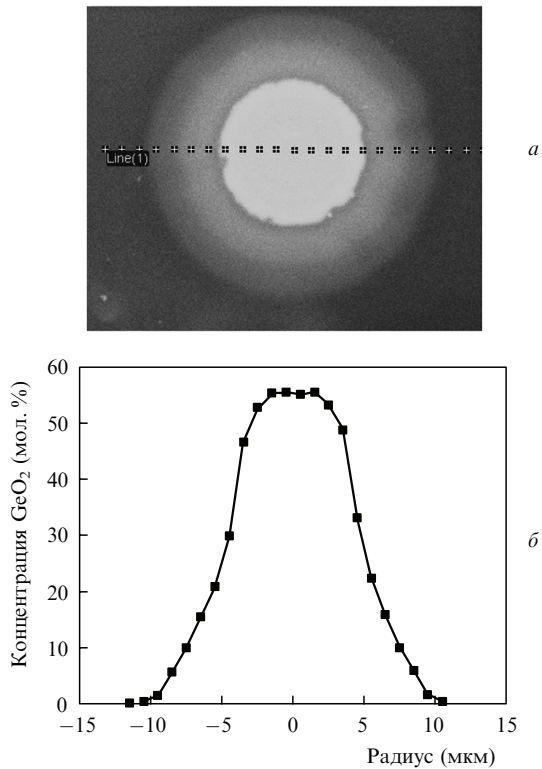


Рис.1. Электронная микрофотография сердцевины многомодового световода (а) и распределение  $\text{GeO}_2$ , измеренное методом рентгеновского микроанализа (б). Расстояние между точками, в которых измерялась концентрация, равно 1 мкм.

1.58 мкм соответствует электронному переходу  $^3\text{H}_6 - ^3\text{F}_4$  иона  $\text{Tm}^{3+}$ , узкий пик на 1.22 мкм – переходу  $^3\text{H}_6 - ^3\text{H}_5$ , пик в области 1.43 мкм обусловлен отсечкой высших мод световода и переходом в одномодовый режим в более длинноволновой области. Минимум оптических потерь световода расположен в области 1990 нм и составляет 0.123 дБ/м. Эта величина обусловлена, в основном, потерями на малоугловое рассеяние, связанными с технологией изготовления световодов при очень высоких концентрациях легирующих добавок [3]. С увеличением длины волны вклад полосы иона  $\text{Tm}^{3+}$  должен уменьшать-

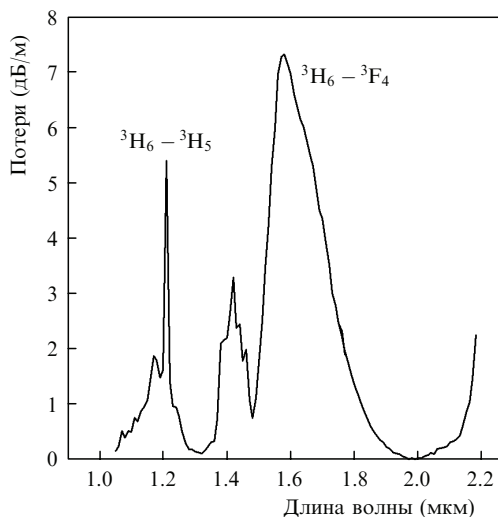


Рис.2. Спектр оптических потерь в исследованном световоде. Пик в области 1.43 мкм обусловлен отсечкой высших мод.

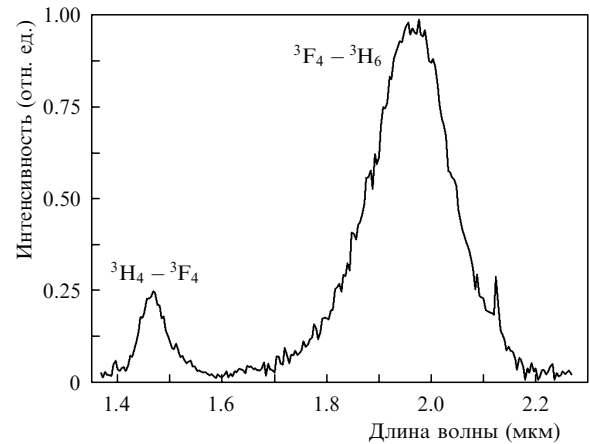


Рис.3. Спектр люминесценции при возбуждении на длине волны 1.064 мкм.

ся, а избыточные потери могут быть в значительной степени снижены при усовершенствовании технологии. Следует, однако, отметить, что достижение в световодах такого типа уровня фундаментальных потерь в чистом  $\text{GeO}_2$  принципиально ограничивается наличием  $\text{SiO}_2$  как в сердцевине, так и в оболочке световода, сильно поглощающей в области 2–3 мкм. Даже в случае чисто германатной сердцевины поглощение мощности моды, распространяющейся по оболочке из кварцевого стекла, соответствует оптическим потерям в одномодовом световоде на уровне 100 дБ/км уже на длине волны  $\sim 2500$  нм.

При возбуждении на длине волны 1.064 мкм в отрезке световода длиной 20 м и детектировании излучения из торца световода наблюдалась характерная для иона  $\text{Tm}^{3+}$  в силикатных стеклах люминесценция в спектральных диапазонах 1.47 и 1.9 мкм для переходов  $^3\text{H}_4 - ^3\text{F}_4$  и  $^3\text{F}_4 - ^3\text{H}_6$  соответственно [7] (рис.3). Сдвиг максимума длинноволновой полосы в область 1.9 мкм, примерно отвечающую минимуму оптических потерь световода, обусловлен, по-видимому, перепоглощением излучения при распространении по световоде.

Для получения лазерной генерации нами использовались отрезки световода длиной 2.5 и 4.5 м. Резонатор был сформирован путем приваривания волоконной брэгговской решетки с высоким (более 20 дБ) коэффициентом отражения на длине волны 1.862 мкм к одному из торцов активного световода. Выходным зеркалом служил противоположный торец активного световода, обеспечивающий коэффициент отражения около 4%. Коэффициент оптических потерь для малого сигнала в световоде на этой длине волны равен 0.5 дБ/м (см. рис.2).

Генерация была получена при накачке излучением эрбиевого волоконного лазера ( $\lambda = 1.56$  мкм) мощностью до 230 мВт. Для короткого и длинного отрезков световода дифференциальная эффективность генерации достигала 26% и 37%, а порог генерации составлял 40 и 25 мВт соответственно (рис.4).

Отметим, что ВКР в выходных спектрах излучения лазера не наблюдалось, по-видимому, из-за недостаточно высокой выходной мощности тулиевого лазера (максимальная мощность генерации не превышала 70 мВт). Это говорит о возможности получения спектрально чистого излучения в желаемой области спектра в лазерах на основе данного световода, несмотря на высокую нелинейность его материала. Однако основной задачей дальнейших исследований является нелинейное преобразова-

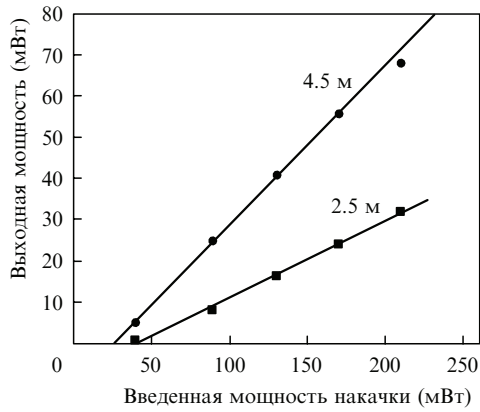


Рис.4. Зависимости выходной мощности тулиевого волоконного лазера ( $\lambda_g = 1.862$  мкм) от введенной мощности накачки ( $\lambda_p = 1.56$  мкм) для длин активного световода 2.5 и 4.5 м.

ние лазерного излучения с целью продвижения в длинноволновую область спектра и демонстрация других нелинейных эффектов в световодах такого типа.

1. Курков А.С., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **34**, 881 (2004).
2. Jackson S.D., King T.A. *Opt. Lett.*, **23**, 1462 (1998).
3. Mashinsky V.M., Neustruev V.B., Dvoyrin V.V., Vasiliev S.A., Medvedkov O.I., Bufetov I.A., Shubin A.V., Dianov E.M., Guryanov A.N., Khopin V.F., Salgansky M.Yu. *Opt. Lett.*, **29**, 2596 (2004).
4. Машинский В.М., Дианов Е.М., Неуструев В.Б., *Кр. сообщ. физ. ФИАН*, № 3, 46 (1981).
5. Galeener F. L., Mikkelsen J. C., Geils R.H., Mosby W.J. *Appl. Phys. Lett.*, **32**, 34 (1978).
6. Дианов Е.М., Буфетов И.А., Машинский В.М., Шубин А.В., Медведков О.И., Ракигин А.Е., Мелькумов М.А., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 435 (2005).
7. Peterka P., Faure B., Blanc W., Karasek M., Dussardier B. *Opt. Quantum Electron.*, **36**, 201 (2004).