

Волоконный лазер на основе активного световода, легированного теллуром

С.В.Алышев, К.Е.Рюмкин, А.В.Шубин, О.И.Медведков, В.Ф.Хопин,
А.Н.Гурьянов, Е.М.Дианов

Исследованы генерационные свойства германо-силикатного световода, легированного теллуром. Обнаружены полосы усиления и поглощения из возбужденного состояния. Исследовано влияние на них охлаждения до низких (77 К) температур. Измерен спектр возбуждения ближней ИК люминесценции. Впервые в мире на данной активной среде, охлажденной до температуры жидкого азота, с использованием накачки на длинах волн 1.064 или 1.085 мкм получена лазерная генерация на 1.55 мкм. Измеренный спектр комбинационного рассеяния позволил сделать предположение о структуре люминесцирующего центра.

Ключевые слова: теллур, теллуровый волоконный световод, лазерная генерация.

Для создания волоконных лазеров и усилителей наиболее широко используются световоды, легированные редкоземельными элементами. В современных волоконно-оптических линиях связи используется спектральный диапазон, который определяется полосой усиления эрбиевого волоконного усилителя (1.53–1.61 мкм), тогда как германо-силикатные телекоммуникационные световоды имеют приемлемый (не более 0.4 дБ/км) уровень потерь в гораздо более широком спектральном диапазоне (от ~ 1.3 до ~ 1.5 мкм). Для расширения диапазона длин волн генерации и усиления необходимо исследовать возможность использования других легирующих добавок, поскольку в указанном спектральном диапазоне эффективные редкоземельные лазеры и усилители отсутствуют.

Заметный успех в данном диапазоне связан с оптически чистыми волокнами, легированными висмутом. На них получена лазерная генерация в диапазоне длин волн 1150–1550 нм и реализовано оптическое усиление вблизи длин волн 1320 и 1430 нм. За более подробной информацией, касающейся активных сред, легированных висмутом, можно обратиться, например, к работе [1] и к ссылкам в ней.

В качестве легирующей добавки, приводящей к формированию люминесцирующих в ближнем ИК диапазоне оптических центров, могут использоваться, помимо висмута, и другие постпереходные элементы (Pb, Sb, Sn, Te и In) [2–5]. В частности, нами уже сообщалось о том, что легированный теллуром германо-силикатный световод при накачке на длине волны в районе 1 мкм имеет широкую (~ 400 нм) полосу люминесценции с максимумом в районе 1.5 мкм [6]. Настоящая работа посвящена исследованию низкотемпературной люминесценции, оптического усиления, поглощения из возбужденного состояния и возможности получения лазерной генерации в данной активной среде.

С.В.Алышев, К.Е.Рюмкин, А.В.Шубин, О.И.Медведков, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: alyshs@fo.gpi.ru
В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов. Институт химии высококичеств веществ РАН, Россия, 603600 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 13 декабря 2013 г.

Мы использовали тот же многомодовый световод ($\text{Te:94SiO}_2-6\text{GeO}_2$), что и ранее [6], и одномодовый световод, вытянутый из той же исходной заготовки. Измерения спектров возбуждения, усиления и поглощения из возбужденного состояния, а также исследование лазерной генерации проводились на одномодовом световоде. Нами применялись методики, подобные реализованным в работах [6–8]. При измерении спектров комбинационного рассеяния (КР) использовался многомодовый световод. Спектры снимались с помощью тройного монохроматора T64000 (Jobin Yvon) с разрешением ~ 1 см $^{-1}$. Возбуждение осуществлялось аргоновым лазером Stabilite 2000 (Spectra-Physics) на длине волны 514.5 нм.

На рис.1 представлены спектры люминесценции многомодового световода, снятые при комнатной температуре (RT) и при температуре жидкого азота (NT), а также временные зависимости релаксации возбужденного состояния для данных сигналов люминесценции, снятые в диапазоне от ~ 1.1 до 1.7 мкм. Видно, что при охлаждении до

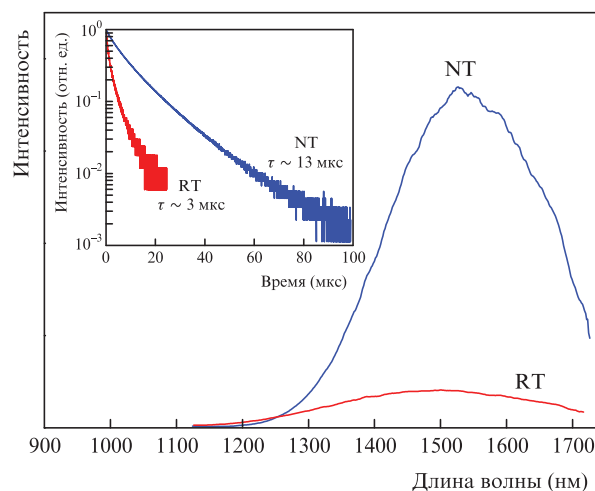


Рис.1. Спектры люминесценции германо-силикатного световода, легированного теллуром, при комнатной температуре (RT) и температуре жидкого азота (NT). Возбуждение осуществлялось излучением лазерного диода ($\lambda_p = 974$ нм). На вставке показаны соответствующие кривые затухания люминесценции.

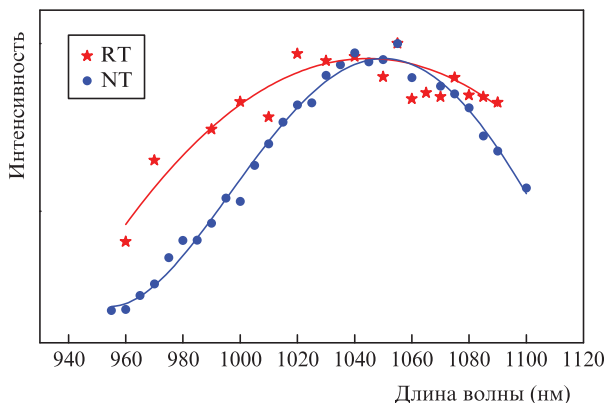


Рис.2. Спектры возбуждения люминесценции германо-силикатного световода, легированного теллуром, в районе 1.5 мкм, снятые при комнатной температуре (RT) и температуре жидкого азота (NT). Сплошные линии проведены для удобства.

NT люминесцентные свойства исследуемого образца заметно меняются. Максимум интенсивности люминесценции возрастает практически на порядок и незначительно (на 20–30 нм) смещается в сторону больших длин волн, ширина на полувысоте уменьшается с 400 до 300 нм. Кривые кинетики люминесценции могут быть аппроксимированы зависимостью вида $A_0 + A_1 \exp(-t/\tau_1) + A_2 \exp(-t/\tau_2)$ с параметрами $A_0 < 0.01$, $A_1 \sim 0.4$, $A_2 \sim 0.6$, $\tau_1 \sim 3$ мкс, $\tau_2 \sim 1$ мкс для RT и $A_0 < 0.01$, $A_1 \sim 0.6$, $A_2 \sim 0.4$, $\tau_1 \sim 13$ мкс, $\tau_2 \sim 4$ мкс для NT.

На рис.2 представлен спектр возбуждения ближней ИК люминесценции, максимум которого находится в районе 1.05 мкм. При накачке на $\lambda_p = 1064$ нм исследовалось оптическое просветление световода на длине волны накачки. Установлено, что при температуре жидкого азота (77 К) имеет место частичное просветление, а при комнатной температуре, напротив, оптические потери возрастают (рис.3).

Следующим шагом было исследование оптического усиления и поглощения из возбужденного состояния. Для этого при комнатной температуре и температуре жидкого азота измерялись спектры оптических потерь при наличии и в отсутствие накачки (рис.4). Видно, что при комнатной температуре спектр потерь в диапазоне длин волн

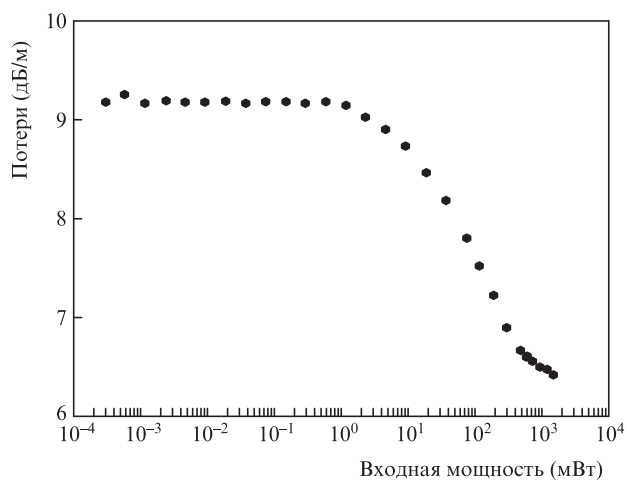


Рис.3. Зависимость оптических потерь на длине волны накачки ($\lambda_p = 1064$ нм) германо-силикатного световода, легированного теллуром, от мощности вводимого излучения при температуре жидкого азота. Источник накачки – иттербиевый волоконный лазер.

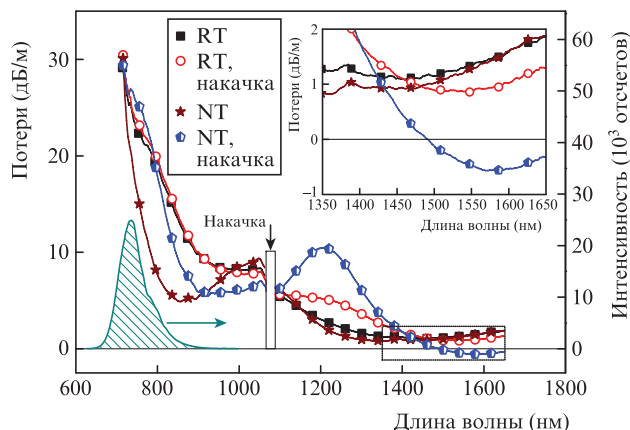


Рис.4. Спектры оптических потерь германо-силикатного световода, легированного теллуром, снятые при наличии и в отсутствие накачки ($\lambda_p = 1085$ нм) для комнатной температуры (RT) и 77 К (NT), а также спектр ап-конверсионной низкотемпературной люминесценции (заштрихован). На вставке показана отмеченная прямоугольником область спектров в увеличенном масштабе.

700–1050 нм не зависит от наличия накачки, в диапазоне 1100–1450 нм в спектре присутствует плечо поглощения из возбужденного состояния, а в диапазоне 1450–1650 нм наблюдается оптическое усиление, не превышающее, однако, потерь в среде.

При температуре 77 К прежде всего изменяется сам вид потерь. В отсутствие накачки полоса поглощения в районе 1 мкм становится уже, а максимум потерь в ней возрастает. То же происходит с полосой возбуждения (см. рис.2, об увеличении максимума при NT свидетельствует улучшение отношения сигнал/шум). При накачке появляется «чистое», превышающее потери оптическое усиление с шириной (по уровню -3 дБ) ~ 125 нм и максимумом в районе 1.57 мкм. Максимальный коэффициент усиления составляет ~ 0.6 дБ/м. Полоса поглощения из возбужденного состояния смещается в сторону длинных волн. Отчетливо виден ее максимум в районе 1.2 мкм; ширина полосы на полувысоте составляет ~ 200 нм. Просветление наблюдается в диапазоне 900–1050 нм, а в диапазоне 750–850 нм видно плечо еще одной полосы поглощения из возбужденного состояния.

Таким образом, можно сделать вывод, что отсутствие просветления оптических потерь при комнатной температуре объясняется частичным перекрытием полосы возбуждения ИК люминесценции и полосы поглощения из возбужденного состояния. При температуре 77 К перекрытие значительно уменьшается – отчасти из-за длинноволнового смещения полосы поглощения, отчасти из-за сужения обеих полос. В результате эффективность накачки при низких температурах возрастает. Это позволило получить лазерную генерацию, используя представленную на рис.5 простую схему.

На рис. 6 показаны спектры излучения на выходе лазера на основе германо-силикатного световода, легированного теллуром. Генерация получена с использованием



Рис.5. Схема лазера на основе германо-силикатного световода, легированного теллуром (ВБР – волоконная брэгговская решетка с высоким коэффициентом отражения, x – точки сварки волокон).

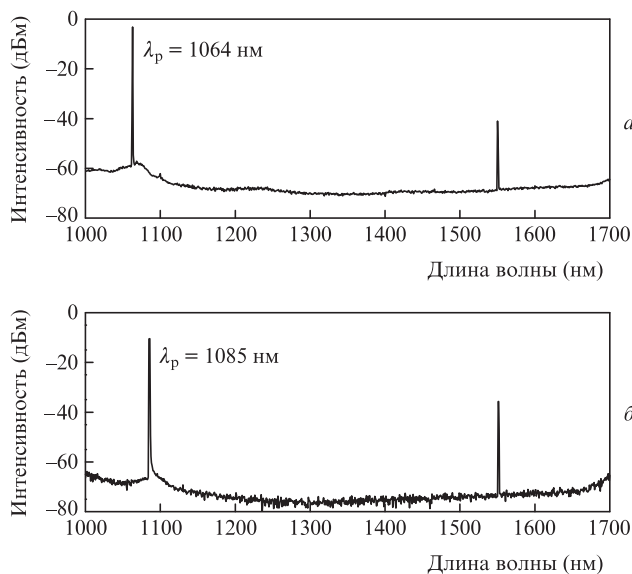


Рис.6. Спектры излучения на выходе лазера на основе германо-силикатного световода, легированного теллуром, при длинах волн излучения накачки $\lambda_p = 1064$ и 1085 нм.

накачки на длинах волн 1064 или 1085 нм. В обоих случаях порог генерации составлял ~ 300 мВт.

При исследовании лазерной генерации была обнаружена ап-конверсия излучения накачки, проявляющаяся в виде красной люминесценции (максимум на длине волны ~ 735 нм), спектр которой представлен на рис.4 (слева); красное свечение световода при этом видно невооруженным глазом.

Ранее сообщалось [3, 9], что наличие полос поглощения и люминесценции в материалах, содержащих теллур, может быть связано с образованием в них, в частности, нейтральных (Te_2) и заряженных (Te_2^-) димеров теллура. Энергии колебаний димеров известны и могут давать вклад в спектр КР. Для проверки данного предположения мы исследовали спектр КР германо-силикатного световода, легированного теллуром (рис.7). Вверху изображен спектр КР световода без легирующей добавки. Нелегированный световод был изготовлен по той же технологии, что и легированный, но без пропитки пористого слоя. ИК люминесценция в данном световоде не наблюдалась. Спектр КР нелегированного световода имеет стандартную форму такого спектра германо-силикатного световода. Внизу изображен спектр КР германо-силикатного световода, легированного теллуром. Отчетливо видны две появившиеся характерные узкие полосы с частотами 198 и 244 см^{-1} . Нам не удалось объяснить происхождение первой полосы, однако вторая с большой долей уверенности может быть отнесена к нейтральному димеру [9, 10].

Разумеется, на данном этапе исследований нет оснований полагать, что линии КР и ИК люминесценция принадлежат одному и тому же объекту. Однако димер теллура имеет систему энергетических уровней, разности энергий которых лежат в видимом и ближнем ИК диапазонах [10], и частоту колебаний, близкую к 244 см^{-1} [9, 10]. Это позволяет рассматривать димеры теллура, находящиеся в полости сетки стекла световода, в качестве потенциальных кандидатов на роль люминесцирующих центров.

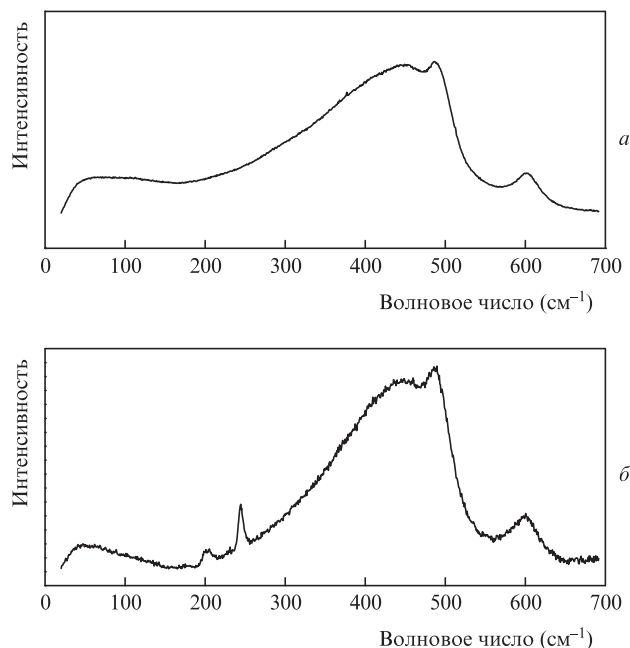


Рис.7. Спектры комбинационного рассеяния германо-силикатного световода без легирующей добавки (а) и такого же световода, легированного теллуром (б). Накачка осуществлялась излучением аргонового лазера ($\lambda_p = 514.5$ нм).

Таким образом, в настоящей работе измерен спектр возбуждения ИК люминесценции германо-силикатного световода, легированного теллуром. Исследовано влияние низких температур и наличия накачки на спектр оптических потерь световода. При температуре 77 К обнаружено «чистое» усиление с шириной (по уровню -3 дБ) ~ 125 нм, максимумом в районе 1.57 мкм и наибольшим коэффициентом усиления ~ 0.6 дБ/м. Это позволило впервые в активной среде данного типа в схеме резонатора с глухими зеркалами получить для накачки с $\lambda_p = 1.064$ или 1.085 мкм лазерную генерацию на длине волны 1.55 мкм. Обнаружение в спектре КР полосы колебаний с частотой 244 см^{-1} позволило предположить, что люминесцирующим центром в данном световоде может быть димер теллура Te_2 .

Авторы выражают благодарность А.А.Умникову за изготовление нелегированного германо-силикатного световода, В.В.Колташеву за измерение спектров КР и В.Г.Плотниченко за помощь в анализе данных спектров.

1. Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **42** (9), 754 (2012).
2. Зленко А.С., Фирстов С.В., Рюмкин К.Е., Хопин В.Ф., Исакова Л.Д., Семенов С.Л., Буфетов И.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **42** (4), 310 (2012).
3. Khonthon S., Morimoto S., Arai Y., Ohishi Y. *J. Ceram. Soc. Jpn.*, **115**, 259 (2007).
4. Sharonov M.Yu., Bykov A.B., Petricevich V., Alfano R.R. *Opt. Lett.*, **33**, 2131 (2008).
5. Sun H.-T., Sakka Y., Shirahata N., Fujii M. *J. Mater. Chem.*, **22**, 24792 (2012).
6. Дианов Е.М., Алышев С.В., Шубин А.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **42**, 189 (2012).
7. Yoo S., Kalita M.P., Nilsson J., Sahu J. *Opt. Lett.*, **34**, 530 (2009).
8. Firstov S.V. et al. *Opt. Express*, **19**, 19551 (2011).
9. Lindner G.-G., Witke K., Schlaich H., Reinene D. *Inorg. Chim. Acta*, **252**, 39 (1996).
10. Смирнов Б.М., Яценко А.С. *Димеры* (Новосибирск: Наука, 1997).