

Волоконные световоды с активной областью в виде кольцевой пленки кварцевого стекла, легированного ионами висмута

А.С.Зленко, У.Г.Ахметшин, В.В.Двойрин, В.А.Богатырев, С.В.Фирстов

Предложен новый способ легирования висмутом волоконных световодов, при котором легирующая примесь образует тонкий кольцевой слой, окружающий сердцевину световода, что позволяет стабилизировать висмут в кварцевом стекле и никак не ограничивает состав сердцевины. Так, в сердцевине световода молярное содержание диоксида германия составило около 16%. Спектроскопические исследования и измерения оптического усиления, проведенные в таком волоконном световоде, показывают перспективность этого способа легирования для лазерных приложений.

Ключевые слова: висмут, волоконный световод, технология изготовления, метод FCVD.

1. Введение

Разработанные относительно недавно световоды на основе кварцевого стекла с сердцевиной, легированной висмутом, позволяют получать лазерную генерацию (в зависимости от состава стекла сердцевины) в диапазоне 1140–1550 нм [1–5]. Спектр люминесценции кварцевого стекла, в котором висмут является единственной добавкой, перекрывает диапазон 1100–1700 нм [6]. Висмутые световоды представляются достаточно перспективными для создания телекоммуникационных усилителей, интегрирование которых в уже существующие линии связи позволило бы расширить традиционные спектральные С- и L-диапазоны передачи сигнала (1.53–1.625 мкм). Кроме того, система кварцевое стекло – висмут, как наиболее простая, представляет интерес с точки зрения выяснения природы висмутowego активного центра.

Технологические трудности, связанные с сильной тенденцией висмута к испарению [7, 8], обуславливают актуальность исследования различных способов легирования световодов висмутом. Так, в настоящей работе приведены результаты исследований волоконного световода, легированного висмутом в кольцевой слой оболочки. Поскольку легирование световодов ионами иттербия в кольцевой слой оболочки уже успешно применялось для волоконных лазеров [9, 10], мы решили использовать подобный подход в случае легирования висмутом.

2. Способ изготовления волоконных заготовок и световодов

Заготовки были изготовлены методом FCVD (Furnace Chemical Vapor Deposition) [11, 12]. Легирование висмутом осуществлялось путем пропитки водным раство-

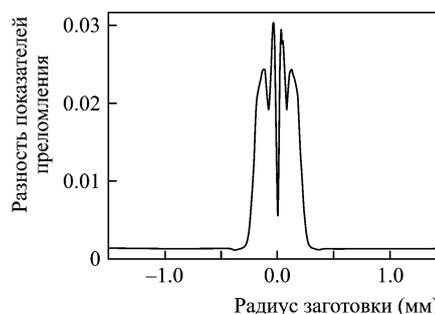


Рис.1. Профиль показателя преломления волоконной заготовки, легированной ионами висмута.

ром висмута (BiOCl) пористого слоя из кварцевого стекла, осажденного при температуре 1520 °С. После пропитки пористый слой проплавлялся и образовывал слой кварцевого стекла, легированного оксидом висмута. Когда формирование этой кольцевой области заканчивалось, наносился слой германосиликатного стекла сердцевины, после чего заготовка схлопывалась в атмосфере хлорида германия и кислорода.

Нами были изготовлены заготовки с одинаковой структурой профиля показателя преломления и с различными концентрациями висмута в промежуточном слое. На рис.1 приведен профиль показателя преломления волоконной заготовки (измерен на установке P102 York Technology) с молярным содержанием диоксида германия около 16%. Из полученных заготовок были вытянуты световоды. По оценке, проведенной исходя из геометрических параметров заготовки, легированный ионами висмута слой в поперечном сечении световода имеет вид кольцевой области толщиной около 600 нм – нанопленки [13].

3. Результаты исследований изготовленных световодов

На рис.2 показаны характерные спектры поглощения световодов L, M и H, вытянутых из заготовок с различными концентрациями висмута (Low, Medium и High). Наблюдается группа из трех полос поглощения актив-

А.С.Зленко, В.В.Двойрин, В.А.Богатырев, С.В.Фирстов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: aszlenko@fo.gpi.ru

У.Г.Ахметшин. Тарусский филиал Института общей физики им. А.М.Прохорова РАН, Россия, Калужская обл., 249100 Таруса, ул. Энгельса, 6

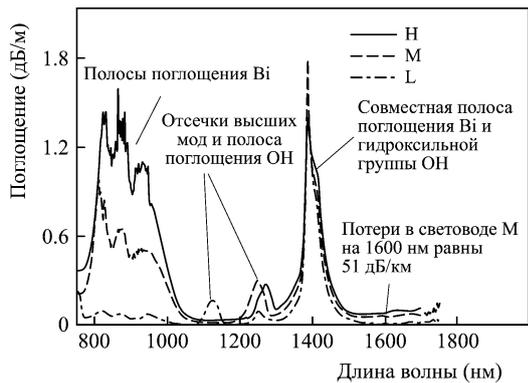


Рис.2. Спектры поглощения световодов.

ного центра в районе 820, 870 и 940 нм. Характерные полосы поглощения ОН-групп расположены в районе 1240 и 1380 нм, причем последняя маскирует полосу поглощения активного центра. Также видны области отсечек, несколько варьирующиеся для различных образцов (1100–1250 нм). В световоде L концентрация висмута мала и характерные полосы поглощения чуть заметны. Минимальный уровень оптических потерь, оцененный в районе 1600 нм для световода М с большей концентрацией висмута и соответственно с достаточно отчетливо выраженными характерными полосами поглощения, составляет около 50 дБ/км. Хотя ранее в легированных висмутом световодах был достигнут более низкий уровень пассивных оптических потерь (~10 дБ/км [1, 3]), полученный нами результат является вполне приемлемым для активных световодов.

На рис.3 и 4 приведены спектры люминесценции световодов, измеренные при возбуждении на длинах волн $\lambda = 808$ и 1350 нм. Интенсивность люминесценции качественно пропорциональна поглощению в сердцевине. При возбуждении на $\lambda = 808$ нм наблюдаются две по-

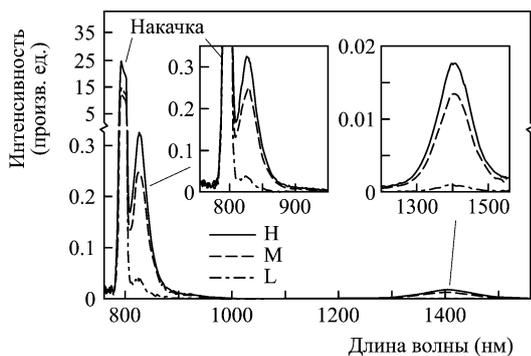


Рис.3. Спектры люминесценции световодов при возбуждении на длине волны $\lambda_p = 808$ нм.

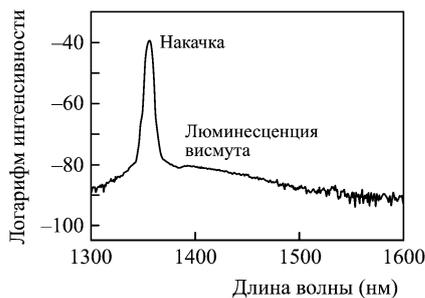


Рис.4. Спектр люминесценции световода М при возбуждении на длине волны $\lambda_p = 1350$ нм.

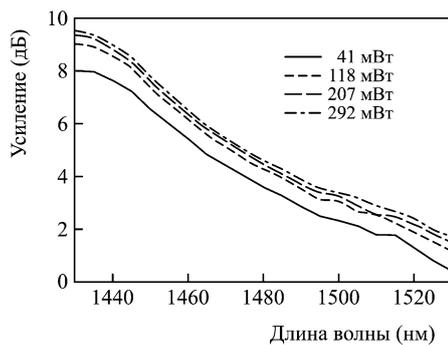


Рис.5. Спектр усиления световода Н при возбуждении на длине волны $\lambda_p = 1350$ нм.

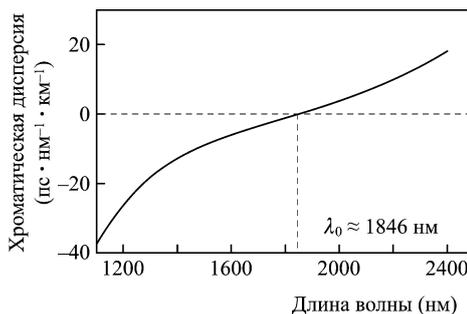


Рис.6. Расчет дисперсионной зависимости световода с ППП, показанного на рис.1.

лосы люминесценции, в областях 825 и 1400 нм, а при возбуждении с большей длиной волны – только одна полоса с максимумом около 1400 нм.

Следует отметить, что в настоящей работе не исследовалась возможная диффузия ионов висмута в сердцевину световода и ионов германия в кольцевую область, легированную висмутом. Тем не менее спектры люминесценции и поглощения хорошо коррелируют с данными, полученными в [6] для легированного висмутом кварцевого стекла.

Характерный спектр оптического усиления (относительно выходного сигнала без накачки), измеренного на отрезке световода Н длиной 20 м при накачке излучением с $\lambda = 1350$ нм, приведен на рис.5. Усиление наблюдается во всем исследованном диапазоне 1430–1530 нм. При увеличении мощности накачки от 41 до 292 мВт усиление насыщается, превышая 9 дБ в районе 1430 нм, и остается заметным (~2 дБ) на длинноволновом крае диапазона (на 1530 нм).

На рис.6 приведена расчетная спектральная зависимость хроматической дисперсии групповых скоростей изготовленных волоконных световодов. Нулевая длина волны дисперсии λ_0 расположена в районе 1850 нм, а в интервале 1400–1550 нм дисперсия нормальна (в отличие от стандартных световодов с нулевой дисперсией в области 1300 нм, например Corning SMF-28). Следовательно, использование данного световода в качестве активной среды для волоконных лазеров фемтосекундной длительности в области 1430–1530 нм позволит упростить компенсацию дисперсии в таких лазерах.

4. Обсуждения

Поскольку структура профиля показателя преломления (ППП) волоконного световода сильно влияет на его

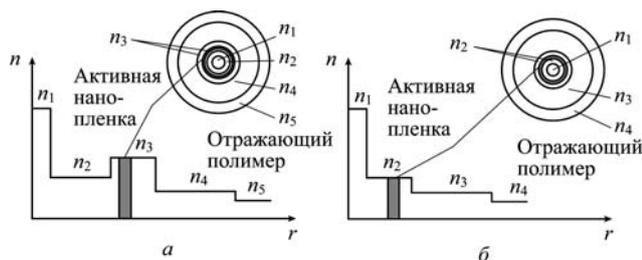


Рис.7. Модели структур ППП волоконного световода с одной активной нанопленкой.

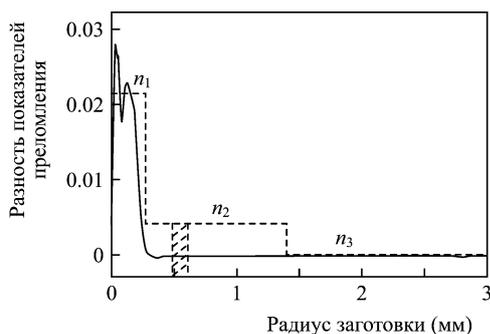


Рис.8. Сравнение модельного и реального ППП с активной нанопленкой.

оптические параметры, методика изготовления световодов с тонким активным кольцом представляется перспективной, т. к. область легирования, благодаря малым размерам, практически не оказывает влияния на ППП. Эта методика позволяет создавать активные световоды с заданными волноведущими параметрами, используя уже известные ППП и не учитывая влияние на них области, легированной активной добавкой.

На рис.7 приведены примеры возможных структур ППП для световода с одной активной нанопленкой [13]. Так, структура на рис.7,а может использоваться для создания активных волоконных световодов с контролируемой дисперсией [14, 15], при этом местоположение активной добавки может целенаправленно изменяться.

Другая структура (рис.7,б) может служить для создания световодов с повышенной чувствительностью к нелинейным эффектам при условии достаточно большой разности показателей преломления сердцевин и оболочки ($n_1 - n_3$) [16]. Упрощенный вариант такого ППП, реализованный в этой работе, показан на рис.8. В данной заготовке с целью увеличения коэффициента нелинейности [16, 17] путем уменьшения радиуса поля моды область с повышенным показателем преломления n_2 не формировалась. В модельной структуре (рис.7,б) область с показателем преломления n_2 предусмотрена для управления радиусом поля моды световода. Изменение радиуса позволяет управлять коэффициентом нелинейности световода [17] и интенсивностью светового излучения в области активного кольца. Кольцевой активный слой в оболочке может сочетаться с легированной активной примесью сердцевинной, что позволит создавать волоконные световоды с различными активными элементами, находящимися в разных областях световода (например, для исключения возможности взаимодействия между ними).

5. Выводы

Удалось создать световод с германосиликатной сердцевиной и примесью висмута в чисто кварцевом стекле оболочки. Благодаря достаточной близости к сердцевине окружающего ее тонкого кольцевого слоя оболочки, легированного висмутом, в измеренных при возбуждении сердцевин световода спектрах потерь и люминесценции наблюдаются характерные полосы поглощения и люминесценции активных висмутовых центров. Продемонстрировано оптическое усиление в широком (1430–1530 нм) спектральном диапазоне, достигающее 9 дБ на длине волны 1430 нм. Пассивные оптические потери (50 дБ/км) находятся на приемлемом для активных световодов уровне. Таким образом, предложенный в данной работе способ изготовления активных световодов является перспективным для создания лазеров и усилителей.

Развитие предложенного способа легирования даст возможность создавать световоды с различными вариантами радиального распределения активной примеси (или примесей) по сечению световода, что позволит более гибко варьировать оптические параметры световода.

Авторы глубоко благодарны Л.И.Булатову, В.М.Машинскому, И.А.Буфетову и С.Л.Семенову за плодотворные дискуссии. Авторы выражают глубокую признательность Е.М.Дианову за обсуждение результатов и поддержку работы.

1. Дианов Е.М., Двойрин В.В., Машинский В.М., Умников А.А., Яшков М.В., Гурьянов А.Н. *Квантовая электроника*, **35**, 1083 (2005).
2. Дианов Е. М., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **38**, 615 (2008).
3. Dvoyrin V.V., Medvedkov O.I., Mashinsky V.M., Umnikov A.A., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Express*, **16**, 16971 (2008).
4. Bufetov I.A., Firstov S.V., Khopin V.F., Medvedkov O.I., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **33**, 2227 (2008).
5. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Хопин В.Ф., Медведков О.И., Гурьянов А.Н., Буфетов И.А. *Квантовая электроника*, **39**, 299 (2009).
6. Neff M., Romano V., Luthy W. *Opt. Mater.*, **31**, 247 (2008).
7. Dvoyrin V.V., Mashinsky V.M., Bulatov L.I., Bufetov I.A., Shubin A.V., Melkumov M.A., Kustov E.F., Dianov E.M., Umnikov A.A., Khopin V.F., Yashkov M.V., Guryanov A.N. *Opt. Lett.*, **31**, 2966 (2006).
8. Umnikov A.A., Guryanov A.N., Abramov A.N., Vechkanov N.N., Firstov S.V., Mashinsky V.M., Dvoyrin V.V., Bulatov L.I., Dianov E.M. *Proc. 34th Europ. Conf. Opt. Commun.* (Brussels, Belgium, 2008, p. 1).
9. Nilsson J., Minelly J.D., Paschotta R., Tropper A.C., Hanna D.C. *Opt. Lett.*, **23**, 355 (1998).
10. Nilsson J., Paschotta R., Caplen J.E., Hanna D.C. *Opt. Lett.*, **22**, 1092 (1997).
11. Cognolato L. *J. Phys. IV (France)*, **5**, C5-975 (1995).
12. Зленко А.С., Ахметшин У.Г. *Материалы третьего российского семинара по волоконным лазерам* (Уфа, Россия, 2009, с. 33).
13. Зленко А.С., Ахметшин У.Г. *Материалы третьего российского семинара по волоконным лазерам* (Уфа, Россия, 2009, с. 44).
14. Belov A.V. *Opt. Commun.*, **161**, 212 (1999).
15. Ахметшин У.Г., Богатырев В.А., Сенаторов А.К., Сысолятин А.А., Шалыгин М.Г. *Квантовая электроника*, **33**, 265 (2003).
16. Onishi M. *Proc. Opt. Fiber Commun. Conf.* (Los Angeles, USA, 2004, TuC3).
17. Агравал Г. *Нелинейная волоконная оптика* (М.: Мир, 1991).