

Непрерывный висмутовый волоконный лазер, перестраиваемый в спектральном диапазоне 1.65–1.8 мкм

В.М.Парамонов, С.А.Васильев, О.И.Медведков, С.В.Фирстов, М.А.Мелькумов, В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов, Е.М.Дианов

Рассмотрен одномодовый волоконный световод на основе легированного висмутом германосиликатного стекла с высокой концентрацией германия в качестве активной среды лазера, непрерывно перестраиваемого в диапазоне 1.65–1.8 мкм. В схеме лазера использовался широкополосный кольцевой резонатор, а излучаемая длина волны задавалась с помощью внешней плоской дифракционной решетки, расположенной в конфигурации Littrow. При мощности накачки 300 мВт на длине волны 1.564 мкм максимальная мощность излучения лазера составила 15 мВт в нулевом порядке дифракционной решетки и 6 мВт на его волоконном выходе.

Ключевые слова: перестраиваемый лазер, висмутовый волоконный лазер, лазерная генерация.

1. Введение

В настоящее время растет интерес к получению интенсивного лазерного излучения в спектральной области 1.65–1.8 мкм, что обусловлено его различными практическими применениями. В частности, в лазерной хирургии глаза использование излучения на длине волны 1.65 мкм позволяет увеличить глубину проникновения при сохранении высокого качества разреза и низкого уровня рассеянного света, что крайне важно при проведении подобного рода операций, поскольку снижает риск возникновения нежелательных побочных эффектов [1]. В лазерной когерентной томографии и многофотонной микроскопии биологических тканей использование длины волны 1.675 ± 0.02 мкм позволяет улучшить отношение сигнал/шум (из-за меньшего уровня рассеяния и поглощения молекулами воды в данной спектральной области) и, как следствие, получать информацию с большей глубины [2, 3]. Привлекательность спектральной области вблизи 1.7 мкм для лидарных систем зондирования атмосферы Земли [4] обусловлена тем, что здесь находится полоса прозрачности атмосферы, и излучение в этой области спектра является безопасным для человеческого глаза.

К сожалению, указанный спектральный диапазон находится вне спектров оптического усиления традиционно используемых в лазерной волоконной оптике активных редкоземельных элементов, таких как Nd, Yb, Er, Ho (тулиевые лазеры в данной области длин волн не эффективны), поэтому поиск и изучение новых лазерных сред, обладающих оптическим усилением в этой области спектра, являются весьма актуальными.

В.М.Парамонов, С.А.Васильев, О.И.Медведков, С.В.Фирстов, М.А.Мелькумов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119991 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: medoi@fo.gpi.ru, fir@fo.gpi.ru

В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603600 Н. Новгород, ул. Тропинина, 49

Поступила в редакцию 20 октября 2017 г.

Известно, что волоконные световоды на основе кварцевого стекла, легированного висмутом, позволили создать целое семейство новых волоконных лазерных и широкополосных люминесцентных источников, а также оптических усилителей для ближней ИК области спектра [5, 6]. Этого удалось добиться благодаря особенностям висмутовых световодов, которая заключается в том, что спектрально-люминесцентные свойства активных висмутовых центров (АВЦ) сильно зависят от стеклянной матрицы и введенных в нее легирующих добавок (например, Р, Al) [7, 8].

Ранее показано, что в световодах с высокой концентрацией Ge (например, 50 мол.% SiO₂/50 мол.% GeO₂) может быть получено оптическое усиление в области 1.7 мкм, величина которого оказывается достаточной для создания лазерных [9–11] и суперлюминесцентных [12] источников, а также оптических усилителей [13] в диапазоне длин волн 1.6–1.8 мкм. Длина активного световода, как правило, в этом случае составляет 50–100 м, что обусловлено относительно низкой концентрацией активных висмутовых центров, ассоциированных с атомами германия (Ge-АВЦ). В качестве накачки использовалось излучение с длиной волны 1.55–1.57 мкм одномодового лазерного диода с выходной мощностью 150 мВт (для волоконно-оптического усилителя [13]) или эрбий-иттербиевого волоконного лазера с выходной мощностью ~10 Вт (для висмутовых волоконных лазеров [11]). В результате за счет усиления в полосе Ge-АВЦ была получена лазерная генерация с максимальной выходной мощностью более 1 Вт для дискретного набора длин волн в диапазоне 1.625–1.775 мкм (шириной ~150 нм), заданных парами волоконных брэгговских решеток [10].

В настоящей работе рассмотрена возможность использования висмутового световода с высокой концентрацией германия для получения лазера с длиной волны генерации, непрерывно перестраиваемой без замены оптических элементов схемы в полосе усиления Ge-АВЦ 1.65–1.8 мкм. Отметим, что ранее нами была продемонстрирована возможность широкополосной непрерывной перестройки лазерной генерации в спектральном диапа-

зоне 1.36–1.51 мкм для полосы усиления активных висмутовых центров, ассоциированных с атомами кремния (Si-ABЦ) [14].

2. Схема перестраиваемого висмутового волоконного лазера

Оптическая схема разработанного нами лазера приведена на рис.1. В лазере использовался кольцевой резонатор, сформированный широкополосными спектральными элементами и имеющий, вследствие этого, низкую спектральную селективность. Источником излучения накачки служил волоконный лазер на основе эрбий-иттербиевого световода с двойной оболочкой (длина волны $\lambda_p = 1.564$ мкм). Ввод излучения накачки в кольцевой резонатор осуществлялся через мультиплексор 1, изготовленный на основе тонкопленочной технологии и обладающий хорошей равномерностью спектральной характеристики в диапазоне 1.63–1.8 мкм. Максимальная мощность накачки была ограничена оптической стойкостью мультиплексора и составляла 300 мВт.

В качестве активной среды лазера использовался изготовленный методом MCVD германо-силикатный световод (50 мол. % SiO_2 /50 мол. % GeO_2), легированный висмутом с концентрацией менее 0.01 мас. % [10]. Световод имел профиль показателя преломления, близкий к ступенчатому (числовая апертура $\text{NA} \approx 0.45$), и длину волны отсечки первой высшей моды $\lambda_c \approx 1.2$ мкм. Величина поглощения в полосах активных висмутовых центров Si-ABЦ и Ge-ABЦ в этом световоде составляла ~ 1 дБ/м (рис.2), что в 2–3 раза меньше значения, приведенного в работах [10, 11], и свидетельствует о меньшей их концентрации. В связи с этим длина активного висмутового световода была увеличена до 55 м, что обеспечило практически полное поглощение излучения накачки.

Аналогично [14], селекция длины волны лазерной генерации осуществлялась с помощью внешней плоской дифракционной решетки (ДР) с плотностью штрихов 600 штрих./мм (3 на рис.1). Излучение из кольцевого резонатора выводилось с помощью циркулятора 4 и направлялось на ДР в виде параллельного пучка с диаметром ~ 5 мм, сформированного микрообъективом 5 ($\text{NA} = 0.2$) с компенсированными сферическими и хроматическими aberrациями. Чтобы исключить неселективное отражение, выходной торец световода (АРС-адаптер, 6) был отшлифован под углом 7° . Излучение в -1 -м порядке дифракции решетки возвращалось в резонатор лазера (конфигурация Littrow), а в нулевом порядке дифракции представляло собой выходной параллельный лазерный

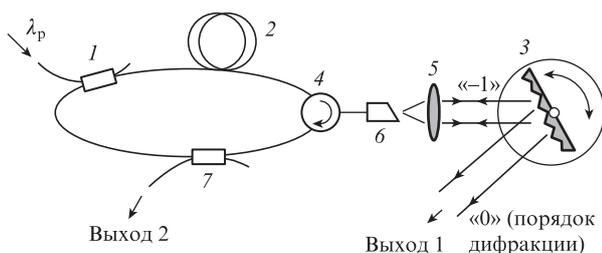


Рис.1. Схема перестраиваемого висмутового волоконного лазера: 1 – мультиплексор; 2 – висмутовый световод; 3 – дифракционная решетка на угловом трансляторе; 4 – волоконный циркулятор; 5 – микрообъектив; 6 – волоконный адаптер со скошенным торцом; 7 – разветвитель 30/70.

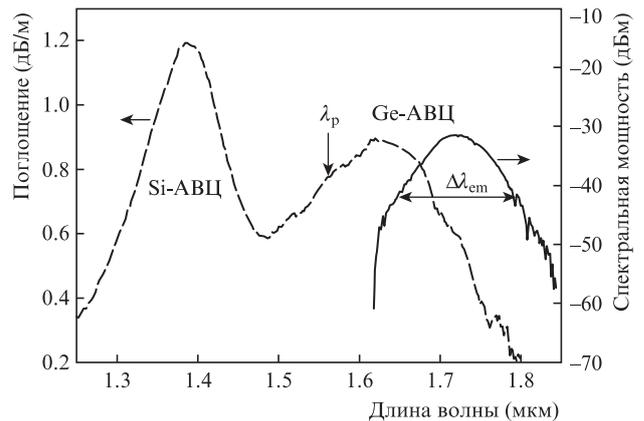


Рис.2. Спектры поглощения (штриховая кривая) и люминесценции (сплошная кривая) активного висмутового световода (λ_p – длина волны излучения накачки, $\Delta\lambda_{em}$ – область перестройки длины волны генерации лазера).

пучок. Перестройка длины волны генерации осуществлялась путем поворота ДР, помещенной на автоматизированный угловой транслятор. Длина волны генерации линейно зависела от угла поворота транслятора во всем диапазоне перестройки с коэффициентом 49.4 нм/град. Использованный нами угловой транслятор Standa 8MR190-2 обеспечивал минимальный шаг перестройки длины волны ~ 60 пм.

В представленном на рис.1 варианте схемы лазер имел волоконный выход, сформированный широкополосным волоконным разветвителем 7, с помощью которого 70% мощности излучения выводилось из кольцевого резонатора. Все элементы схемы, за исключением активного световода, были выполнены на основе стандартного световода SMF-28e. Следует отметить, что особенностью используемого висмутового волоконного световода является относительно высокая числовая апертура, что приводит к значительным (~ 3 дБ) потерям на стыковку с низкоапертурными (в том числе стандартными) волоконными световодами. Эти потери могут быть уменьшены при использовании промежуточных согласующих световодов [15] или путем формирования переходных участков с достаточно медленно изменяющимся диаметром [16]. Наиболее простым и в то же время эффективным способом снижения потерь при сварке германо-силикатных световодов с существенно различными модовыми полями является увеличение времени сварки, что приводит (вследствие диффузии германия в область оболочки световода) к локальному расширению диаметра сердцевины высокоапертурного световода и формированию требуемого переходного участка [17, 18]. Увеличение времени процесса сварки позволило нам снизить оптические потери на сварном соединении активного световода со стандартным SMF-28e с 3 до 0.5 дБ. С учетом параметров использованных в схеме оптических элементов и качества сварок суммарные потери в кольцевом резонаторе лазера (без учета потерь в активном волокне) составили около 10–12 дБ.

Для измерения спектров выходного излучения лазера применялись спектроанализаторы ANDO-6317B (длинноволновый край измерений 1.75 мкм, спектральное разрешение 0.01 нм, большой (свыше 60 дБ) динамический диапазон за счет использования двойной монохроматизации излучения) и StellarNet RED-Wave-NIRx-SR (спектральный диапазон измерений 1.5–2.0 мкм, спектраль-

ное разрешение ~ 10 нм, относительно небольшой (менее 30 дБ) динамический диапазон измерений).

3. Полученные результаты

Спектры излучения лазера, измеренные через каждые 0.2° угла поворота ДР ($\Delta\lambda \approx 10$ нм), приведены на рис.3,а. При мощности накачки 300 мВт мощность излучения на волоконном выходе лазера составляла в районе максимума (около 1.7 мкм) ~ 6 мВт (~ 15 мВт в нулевом порядке ДР). Область спектральной перестройки длины волны λ_{em} при снижении мощности на 3 дБ составила ~ 120 нм (1.66–1.78 мкм), при этом на краях диапазона 1.65–1.8 мкм (150 нм) мощность генерации уменьшалась на 15 дБ.

На рис.3,б приведены спектры генерации, измеренные спектроанализатором ANDO-6317B со спектральным разрешением 0.02 нм. Спектральная ширина линии генерации составила 0.07 нм (FWHM), а интенсивность генерации превосходила уровень спонтанного излучения более чем на 60 дБ.

4. Заключение

Впервые, насколько нам известно, создан одномодовый висмутовый волоконный лазер с выходной мощностью излучения в нулевом порядке дифракции ~ 15 мВт с плавной перестройкой в области усиления активных висмуто-

вых центров, ассоциированных с атомами германия, длины волны генерации в диапазоне 1.65–1.8 мкм. Перестройка осуществлялась путем поворота внешней плоской дифракционной решетки, используемой в конфигурации Littrow. Предложенная кольцевая конфигурация перестраиваемого лазера имеет, кроме того, одномодовый волоконный выход, обеспечивающий при мощности излучения накачки 300 мВт мощность выходного излучения (через волоконный разветвитель 30/70) ~ 6 мВт. Активная среда лазера представляла собой легированный висмутом световод с высокой концентрацией германия длиной ~ 55 м. К достоинствам лазера следует отнести узкую линию генерации (0.07 нм) при значительном (более 60 дБ) превышении мощности лазерной генерации по отношению к мощности спонтанного излучения.

Дальнейшая оптимизация элементов схемы лазера, в том числе повышение оптической стойкости широкополосного мультиплексора, используемого для ввода излучения накачки, позволит, на наш взгляд, увеличить мощность и эффективность лазерной генерации.

Работа в части разработки, изготовления и тестирования активного висмутового световода, а также в части исследования его оптических характеристик выполнена при поддержке Российского Научного Фонда (соглашение №16-19-10688).

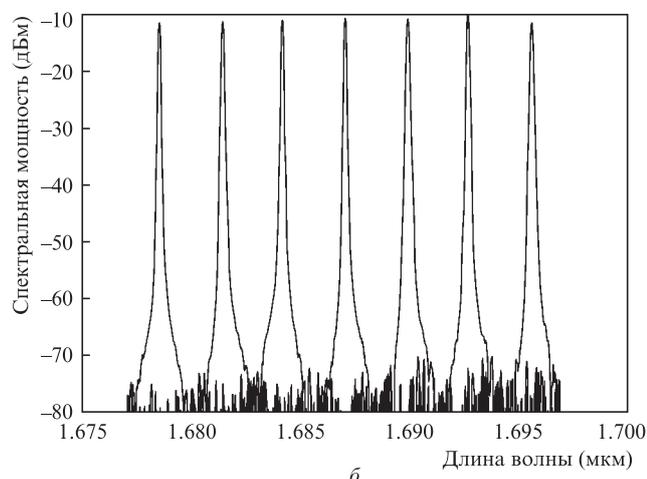
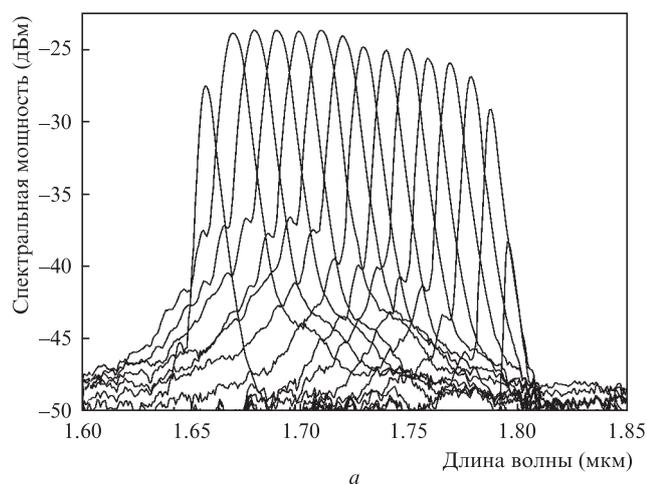


Рис.3. Спектры генерации, измеренные с разрешением 10 нм (а) и 0.02 нм (б) при последовательном повороте дифракционной решетки.

- Crotti C., Deloison F., Alahyane F., Aptel F., Kowalczyk L., Legeais J.-M., Peyrot D.A., Savoldelli M., Plamann K. *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, **54** (5), 3340 (2013).
- Chong S.P., Merkle C.W., Cooke D.F., Zhang T., Radhakrishnan H., Krubitzer L., Srinivasan V.J. *Opt. Lett.*, **40** (21), 4911 (2015).
- Horton N.G., Wang K., Kobat D., Clark C.G., Wise F.W., Schaffer C.B., Xu C. *Nature Photon.*, **7** (3), 205 (2013).
- Kotov L.V., Töws A., Kurtz A., Bobkov K., Aleshkina S., Bubnov M.M., Lipatov D.S., Guryanov A.N. Likhachev M.E. *Proc. SPIE*, **9728**, 97282U (2016).
- Dianov E.M. *J. Lightwave Technol.*, **31** (4), 681 (2013).
- Sun H.T., Zhou J., Qiu J. *Progress Mater. Sci.*, **64**, 1 (2014).
- Firstov S.V., Khopin V.F., Bufetov I.A., Firstova E.G., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Express*, **19** (20), 19551 (2011).
- Фирстова Е.Г., Буфетов И.А., Хопин В.Ф., Вельмискин В.В., Фирстов С.В., Буфетова Г.А., Нишчев К.Н., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **45** (1), 59 (2015) [*Quantum Electron.*, **45** (1), 59 (2015)].
- Dianov E.M., Firstov S.V., Khopin V.F., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Gladyshev A.V., Guryanov A.N. *Proc. SPIE*, **9728**, 97280U (2016).
- Firstov S.V., Alyshev S.V., Melkumov M.A., Riumkin, K.E., Shubin A.V., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **39** (24), 6927 (2014).
- Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **40** (18), 4360 (2015).
- Фирстов С.В., Рюмкин К.Е., Хопин В.Ф., Алишев С.В., Мелькумов М.А., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **46** (9), 787 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (9), 787 (2016)].
- Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Khopin, V.F., Guryanov A.N., Melkumov M.A., Dianov E.M. *Sci. Reports*, **6**, 28939 (2016).
- Парамонов В.М., Беловолов М.И., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Васильев С.А., Медведков О.И., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **46** (12), 1068 (2016) [*Quantum Electron.*, **46** (12), 1068 (2016)].
- Yablon A.D., Sumetsky M. *Opt. Lett.*, **32** (6), 617 (2007).
- Martínez-Ríos A., Torres-Gómez I., Monzon-Hernandez D., Barbosa-García O., Duran-Ramírez V.M. *Revista Mexicana de Física*, **56** (1), 80 (2010).
- Shiraishi K., Aizawa Y., Kawakami S. *J. Lightwave Technol.*, **8** (8), 1151 (1990).
- Krause J., Reed W., Walker K. *J. Lightwave Technol.*, **4** (7), 837 (1986).