

Волоконный висмутовый лазер с непрерывной перестройкой длины волны генерации в диапазоне 1.36–1.51 мкм

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

На основе одномодового висмутового волоконного световода разработана схема волоконного лазера, обеспечивающая с помощью внешней дифракционной решетки возможность непрерывной перестройки длины волны генерации в диапазоне 1366 – 1507 нм. Столь широкий диапазон перестройки лазерной длины волны был достигнут благодаря использованию спектрального фильтра на основе длиннопериодной волоконной решетки, сглаживающего спектр усиления и обеспечивающего таким образом устойчивую лазерную генерацию на краях указанного спектрального диапазона. Выходная мощность лазера составляла от 25 мВт на краях диапазона до 50 мВт в центре при мощности накачки 300 мВт на длине волны 1.34 мкм.

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

1. Введение

Активное исследование легированных висмутом кварцевых волоконных световодов как перспективной лазерной среды позволило уже в настоящее время изготавливать такие световоды, которые обеспечивают эффективное усиление оптического сигнала в четырех участках спектра ближнего ИК диапазона, почти полностью покрывая диапазон длин волн 1.1–1.78 мкм [1, 2]. Это оказалось возможным благодаря тому, что длина волны лазерного перехода в активном висмутовом центре (АВЦ) сильно зависит от его локального окружения в сетке кварцевого стекла. Так, АВЦ в кварцевом стекле с алюминием усиливают оптическое излучение в диапазоне длин волн 1.1–1.22 мкм, в то время как легирование световода фосфором вместо алюминия сдвигает полосу усиления в диапазон 1.27–1.37 мкм. В чистом кварцевом стекле или в стекле с небольшой концентрацией диоксида германия АВЦ усиливают на длинах волн от 1.34 до 1.52 мкм, а в высокогерманатном стекле полоса усиления висмута приходится на диапазон 1.65–1.78 мкм. В настоящее время во всем указанном диапазоне длин волн (1.1–1.78 мкм) продемонстрированы усиление и лазерная генерация, в том числе с выходной мощностью более 1 Вт [1, 3].

Для висмутовых световодов разных составов используется излучение накачки с различными длинами волн, причем в силу относительно низкого уровня концентрации АВЦ, достигнутого на сегодняшний день, во всех висмутовых лазерах и усилителях излучение накачки вводится в сердцевину световода. В зависимости от типа световода и необходимого суммарного усиления на задан-

ной длине волны длина активных висмутовых световодов варьируется в пределах 3–300 м.

Ранее в работе [4] с использованием активного висмутового световода с небольшой концентрацией диоксида германия была получена лазерная генерация с выходной мощностью более 1 Вт для дискретного набора длин волн, заданных парами волоконных брэгговских решеток и расположенных в диапазоне 1389–1538 нм (ширина ~150 нм), что является рекордом для волоконных лазеров в данной спектральной области.

В настоящей работе на основе висмутового световода с небольшой концентрацией диоксида германия разработан и исследован одномодовый волоконный лазер, в котором обеспечивается возможность широкополосной непрерывной перестройки длины волны генерации без замены оптических элементов схемы. Разработанная схема лазера при использованной нами элементной базе позволила получить выходную мощность более 25 мВт в диапазоне длин волн 1.36–1.51 мкм при мощности накачки 300 мВт на длине волны $\lambda_p = 1.34$ мкм.

Существующие ныне источники одномодового лазерного излучения с достаточно большой (~100 нм) шириной перестройки длины волны генерации в рассматриваемом диапазоне спектра реализованы на полупроводниковых структурах, что ограничивает максимальную выходную мощность таких устройств – не более нескольких милливатт. Вместе с тем перестраиваемые лазерные источники повышенной мощности востребованы при решении задач спектроскопии, метрологии, передачи данных в линиях оптической связи, медицины и ряда других.

2. Схема перестраиваемого висмутового волоконного лазера

В исследованиях использовался изготовленный методом MCVD германосиликатный (~5 мол.% GeO₂) световод, легированный висмутом (менее 0.01 мас.%) [5, 6]. Профиль показателя преломления световода был близок к ступенчатому, длина волны отсечки первой высшей моды равнялась 1.1 мкм. Использованная схема перестра-

В.М.Парамонов, М.И.Беловолов, С.А.Васильев, О.И.Медведков, М.А.Мелькумов, Е.М.Дианов. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: melkoumov@fo.gpi.ru

В.Ф.Хопин, А.Н.Гурьянов. Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

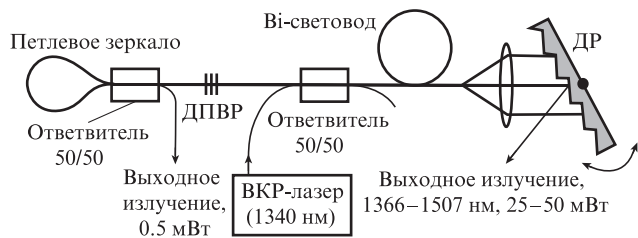


Рис. 1. Схема непрерывно перестраиваемого висмутового волоконного лазера: ДР – дифракционная решетка; ДПВР – длиннопериодная волоконная решетка.

иваемого висмутового волоконного лазера приведена на рис. 1. В качестве источника накачки использовался одномодовый волоконный ВКР-лазер с длиной волны выходного излучения $\lambda_p = 1340$ нм, представляющий собой однокаскадный ВКР-конвертер на основе фосфоросиликатного световода, который накачивался иттербиевым волоконным лазером мощностью 2 Вт на длине волны 1137 нм. И хотя выходная мощность ВКР-конвертера достигала 600 мВт, мощность накачки в наших экспериментах составляла 300 мВт, что было обусловлено низкой оптической стойкостью использованного нами волоконного ответвителя 50/50, через который осуществлялась накачка висмутового лазера. Ввод излучения накачки в резонатор через ответвитель 50/50 был обусловлен необходимостью использования широкополосных оптических элементов для достижения максимально широкого диапазона перестройки лазерной генерации. Все элементы схемы, за исключением активного световода, были построены на основе стандартного световода SMF-28e. Типичные потери на сварке висмутового световода и световода SMF-28e составляли не более 0,5 дБ (при использовании стандартной программы сварки для световодов SMF-28e).

Резонатор лазера был сформирован петлевым отражателем (зеркало Саньяка) и плоской дифракционной решеткой (ДР) с числом штрихов 600 штр./мм, поворот которой обеспечивал селекцию нужной длины волны. На решетку направлялся параллельный пучок диаметром ~ 5 мм, сформированный с помощью микрообъектива ($NA = 0.2$) с компенсированными сферическими и хроматическими aberrациями (апохромат). Излучение в первом порядке дифракции решетки возвращалось в световод, а выходной пучок висмутового лазера распространялся в нулевом порядке дифракции. Мощность выходного пучка составляла 25–50 мВт в зависимости от длины волны. Излучение, выходящее из петлевого зеркала (см. рис. 1), имело мощность ~ 0.5 мВт и использовалось для измерения спектра генерации лазера и контроля перестройки длины волны. Длина активного световода составляла ~ 65 м, что обеспечивало практически полное поглощение излучения накачки с $\lambda_p = 1340$ нм. Спектр усиления, измеренный при накачке на $\lambda_p = 1320$ нм, и спектр поглощения световода приведены на рис. 2.

Выравнивание спектра усиления, необходимое для устойчивой генерации лазера на краях полосы усиления, осуществлялось при помощи длиннопериодной волоконной решетки (ДПВР), записанной в световоде SMF-28e излучением второй гармоники Ag^+ -лазера ($\lambda = 244$ нм). Спектр пропускания ДПВР приведен на рис. 3, а. Длина решетки составляла 8 мм, а период ее штрихов – 340 мкм. Как видно из рис. 3, а в минимуме пропускания решетки, находящемся на длине волны ~ 1435 нм, вносимые ДПВР

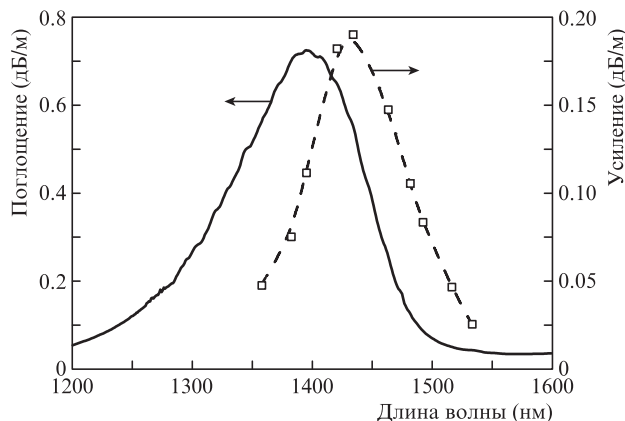


Рис. 2. Спектры поглощения и усиления висмутового световода.

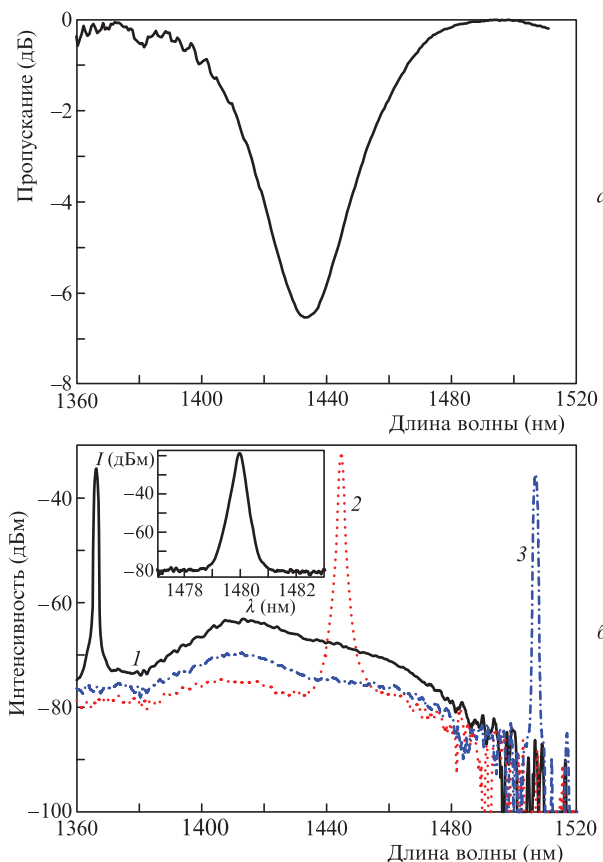


Рис. 3. Спектр пропускания ДПВР (а), а также спектры генерации висмутового волоконного лазера на краях диапазона перестройки (1366 (1) и 1507 нм (3)) и в центре этого диапазона (2), на вставке – спектр генерации, измеренный с высоким спектральным разрешением (б).

оптические потери в резонаторе лазера за один проход излучения составляли ~ 6.5 дБ ($\sim 80\%$). Спектральная ширина резонанса ДПВР была ~ 45 нм, что примерно в два раза уже ширины полосы усиления АВЦ (см. рис. 2).

3. Полученные результаты

На рис. 3, б показаны спектры непрерывной генерации исследуемого висмутового волоконного лазера на краях диапазона перестройки лазерной генерации 1366–1507 нм и характерный спектр генерации в середине этого диапазона. Указанная выше полоса перестройки шириной

141 нм определялась как спектральная область, в которой выходная мощность снижалась по сравнению с максимальной мощностью вблизи центра полосы перестройки (50 мВт) не более чем в два раза. Спектры измерялись спектроанализатором ANDO AQ6317 с разрешением 1 нм. Спонтанная люминесценция вне линии генерации висмутового лазера оказалась ниже спектральной плотности мощности в основной линии для любой длины волны генерации не менее чем на 30 дБ. На вставке на рис.3,б приведен спектр генерации, измеренный при разрешении 0.05 нм. Ширина линии генерации составляла примерно 0.15 нм по уровню –3 дБ.

Помимо описанных выше экспериментов мы исследовали возможность получения лазерной генерации в предложенной схеме лазера в более длинноволновой части спектра (до 1530 нм), которая вплотную примыкает к спектральной области генерации активных эрбиевых волоконных световодов. Для этого длина активного висмутового световода была увеличена до 120 м, а ответвитель 50/50 с целью повышения эффективности ввода накачки был заменен на волоконный мультиплексор. Это позволило сдвинуть длинноволновый край диапазона непрерывной перестройки лазерной генерации висмутового лазера до желаемого значения 1530 нм, однако потери в резонаторе значительно возросли в коротковолновой части спектра из-за недостаточной спектральной ширины мультиплексора, вследствие чего коротковолновый край сдвинулся с 1366 до 1400 нм.

4. Заключение

Впервые, насколько нам известно, создан одномодовый висмутовый волоконный лазер с выходной мощностью от 25 до 50 мВт с непрерывной перестройкой длины

волны генерации в диапазоне шириной 141 нм (от 1366 до 1507 нм), которая осуществлялась с помощью поворота внешней плоской дифракционной решетки. Значительный диапазон перестройки был достигнут путем помещения в резонатор лазера спектрального фильтра на основе ДПВР, имеющей максимум оптических потерь на длине волны 1440 нм.

Отметим, что в данной схеме непрерывного перестраиваемого висмутового волоконного лазера для накачки использовалось излучение ВКР-лазера мощностью 300 мВт на длине волны 1.34 мкм; вместе с тем, в настоящее время в этом спектральном диапазоне уже существуют коммерчески доступные одномодовые диодные лазеры, имеющие такую выходную мощность.

Настоящая 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).

1. Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Riumkin K.E., Shubin A.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, **20**, 111 (2014).
2. Фирстов С.В., Альшев С.В., Рюмкин К.Е., Хопин В.Ф., Мелькумов М.А., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **45** (12), 1083 (2015).
3. Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **40**, 4360 (2015).
4. Shubin A.V., Bufetov I.A., Melkumov M.A., Firstov S.V., Medvedkov O.I., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **37** (13), 2589 (2012).
5. Фирстов С.В., Шубин А.В., Хопин В.Ф., Мелькумов М.А., Буфетов И.А., Медведков О.И., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **41** (7), 581 (2011).
6. Melkumov M.A., Bufetov I.A., Shubin A.V., Firstov S.V., Khopin V.F., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **36**, 2408 (2011).