

Проблемы создания гибридных перестраиваемых висмут-эрбиевых волоконных лазеров

В.М.Парамонов, М.И.Беловолов, М.А.Мелькумов, М.М.Беловолов, О.И.Медведков, Е.М.Дианов

Рассмотрены экспериментальные данные и опыт реализации перестраиваемых волоконных лазеров на основе световодов с висмутовыми активными центрами в матрицах кварцевого стекла различного состава, имеющими полосы люминесценции в диапазоне 1200–1800 нм. Показано, что перекрыть указанный диапазон генерации узкополосного непрерывного лазерного излучения милливаттной мощности (1–10 мВт) можно путем построения гибридных волоконных схем объединения и, возможно, применения солегирования матриц активаторами висмута и эрбия. Исследованы непрерывно перестраиваемые висмутовые волоконные лазеры с частично перекрывающимися спектральными диапазонами излучения 1270–1370 нм, 1360–1540 нм и 1600–1800 нм. Предложены гибридные схемы волоконных лазеров, генерирующих излучение в спектральном диапазоне, включающем диапазон люминесценции ионов эрбия (1500–1600 нм).

Ключевые слова: эрбий, висмут, одномодовый волоконный световод, волоконный лазер, перестраиваемый лазер.

1. Введение

Волоконные лазеры на основе световодов, легированных висмутом, интенсивно исследуются с 2005 г., и интерес к ним обусловлен тем, что основные полосы люминесценции висмута находятся в диапазоне длин волн 1200–1800 нм, совпадающем с диапазоном для волоконно-оптической связи. Сами эти полосы имеют относительно большую ширину (200–300 нм), а MCVD-технология позволяет синтезировать разные матрицы кварцевого стекла, смещать максимумы люминесценции и таким образом несколько варьировать рабочие диапазоны длин волн генерации и оптического усиления. Интенсивности люминесценции в максимумах полос также зависят от длины волны и мощности накачки (см., напр., табл.1 в [1]). Это дает дополнительные возможности для смещений краев рабочих диапазонов и максимумов длин волн генерации. В обзорных статьях [1, 2] приводятся обширные данные о результатах реализации лазерной генерации в диапазоне 1150–1550 нм. Мощности генерации составляли от нескольких десятков милливатт до 20 Вт и выше. В работах [3, 4] установлено, что в более длинноволновом диапазоне спектра (1625–1775 нм) также возможно создание лазеров с ваттными мощностями. Помимо мощных лазеров, отдельный интерес для техники связи и волоконных датчиков представляют лазеры небольшой мощности (1–10 мВт) в сочетании с широкими диапазонами непрерывной перестройки длины волны их излучения. Это обосновывает в качестве самостоятельного направления разработку и исследование перестраиваемых в широком диапазоне висмутовых волоконных лазеров с узкими линиями излучения. Для практического применения желательно иметь сходные или одинаковые конструкции схем

лазеров с одним общим волоконным выходом и, по возможности, с одним управляющим спектрально-селективным элементом.

2. Цели и задачи работы

Будем называть гибридными лазеры, реализованные на основе разнородных активных центров или оптических схем с целью расширения диапазона непрерывной перестройки длины волны излучения при одном управляющем элементе и одном или двух волоконных выходах. Висмутовые активные центры привлекательны для задачи гибридизации в связи с широкими (от ~1100 нм до ~1800 нм) полосами люминесценции в различных матрицах кварцевого стекла. До настоящего времени исследования висмутовых волоконных лазеров велись главным образом с целью изучения физики их работы и поиска наиболее эффективных схем для получения генерации с максимальной мощностью (1–20 Вт). Несмотря на значительные достижения в исследовании висмутовых лазеров и оптических усилителей, до сих пор изучается и уточняется природа люминесценции висмутовых активных центров в матрицах из кварцевого стекла.

Другое важное направление работ, следующее из результатов исследования множества реализованных висмутовых лазеров и режимов генерации, заключается, по нашему мнению, в разработке непрерывно-перестраиваемых волоконных лазеров с узкими спектрами генерации и выходной мощностью 1–10 мВт для передачи информации, измерений и сенсорных систем.

В настоящей работе суммируются накопленный экспериментальный опыт и данные по реализации волоконных лазеров на основе легированных висмутом световодов, генерирующих в области максимумов основных полос люминесценции висмута вблизи длин волн 1300, 1400 и 1700 нм, а также известные данные по эрбиевым волоконным лазерам, генерирующим излучение вблизи $\lambda = 1550$ нм, с целью создания волоконной конструкции или единой волоконной среды с солегированием $\text{Bi}-\text{Er}$, которая позволила бы реализовать эффективную лазерную ге-

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

Поступила в редакцию 16 октября 2018 г.

нерацию в широкой полосе непрерывной перестройки (1.2–1.8 мкм), желательно без пропусков диапазонов длин волн, и с мало меняющейся в процессе перестройки мощностью генерации. После реализации лазеров с широкими диапазонами непрерывной перестройки актуальными станут проблемы получения одночастотного излучения с узкими однородно уширенными линиями генерации и низким уровнем амплитудных и фазовых шумов. Шумовые свойства одночастотного излучения волоконных лазеров вызывают повышенный интерес из-за возможности использования таких источников в технике высокочувствительных волоконно-оптических измерений и в интерферометрических датчиках, поскольку в волоконных лазерах отсутствует такой механизм шума, как фликер-шум, или шум типа $1/f$, присутствующий в диодных лазерах, в которых ток накачки непосредственно преобразуется в лазерное излучение. Важной задачей технологии изготовления световодов из кварцевого стекла для лазеров является синтез однородных по составу легирующих примесей заготовок и волокон из них, в которых отсутствуют эффекты кластеризации и не образуются дополнительные, нежелательные возбужденные состояния в энергетическом спектре активного элемента, способные вызвать явления паразитной генерации и пульсации выходного лазерного излучения.

На рис.1 показаны основные диапазоны длин волн генерируемого излучения, уже реализованные с помощью Bi- или Bi-Er- лазера, а также проблемные участки, подлежащие освоению, включая и область полосы люминесценции активности ионов Er^{3+} . Для матриц кварцевого стекла сердцевины волоконных световодов использовали следующие обозначения: PSB – фосфорсиликатное стекло, легированное висмутом; LGSB – германосиликатное стекло, легированное висмутом, с малой (1–5 мол. %) концентрацией германия; HGSB – германосиликатное стекло, легированное висмутом, с высокой (~ 50 мол. %) концентрацией германия; ASG + Er – алюмосиликатное стекло с германием или фосфором, легированное эрбием.

Создание лазеров с перестраиваемой в широком диапазоне длиной волны генерации может быть полезным для новых применений в волоконном приборостроении, при опросе многих волоконных датчиков с мультиплексированием по длинам волн, в когерентной связи с DWDM, в астрономии, медицине и др. Предполагается, что в ходе решения проблем создания перестраиваемых висмутовых волоконных лазеров будут реализованы одномодовые волоконные световоды с оптимальными концентрациями активных солегирующих примесей, подобраны и оптимизированы все основные элементы волоконных лазерных схем (волоконные мультиплексоры, длины волн накачки, фильтрации и селекции), а также волоконных устройств ввода-вывода сигналов с целью реализации широкополосного усиления DWDM-сигналов для систем коммуникаций и систем с мультиплексированием по длинам волн.

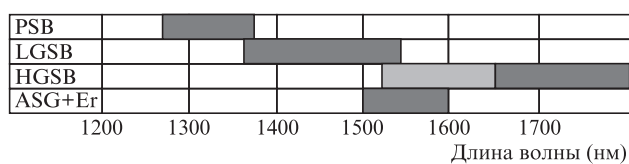


Рис.1. Диапазоны непрерывной перестройки, которые потенциально могут быть реализованы с помощью висмутовых или гибридных Bi-Er- лазеров в интервале длин волн 1200–1800 нм. Слева – обозначения основных матриц кварцевого стекла.

К настоящему времени имеются данные по реализации оптического усиления и лазерной генерации в диапазоне длин волн 1100–1800 нм, разработаны и исследованы схемы висмутовых волоконных лазеров, непрерывно перестраиваемых в диапазонах длин волн 1366–1507 нм [5] и 1654–1794 нм [6]. Созданы и испытаны первые висмутовые волоконно-оптические усилители для спектральной области 1600–1800 нм [7]. Между указанными диапазонами располагается полоса люминесценции ионов Er^{3+} (вблизи $\lambda = 1550$ нм), которая рассматривается как полоса для «сшивки» спектров в единую широкую полосу перестройки длины волны лазерной генерации. Край полосы люминесценции висмута в оптическом волокне из кварцевого стекла могут ощутимо смещаться в зависимости от добавок примесей алюминия, фосфора или германия, что в сочетании с выбором длины волны и мощности излучения накачки позволяет несколько смещать края рабочих диапазонов длин волн генерации и оптического усиления и может быть использовано для сопряжения схем по диапазонам рабочих длин волн генерации. Серым прямоугольником на рис.1 обозначен диапазон люминесценции только висмутовых активных центров в световоде с большим содержанием германия, который потенциально может охватить и область люминесценции ионов эрбия в диапазоне 1500–1600 нм. Солегиrowание висмутом и эрбием одномодовых световодов с большим содержанием германия (матрицы HGSB) позволяет расширить область эффективного оптического усиления, включая телекоммуникационные C+L+U-зоны, и в работе [8] были реализованы волоконно-оптические усилители в широкой (1515–1775 нм) полосе с усилением 15 дБ при мощности излучения лазерного диода накачки 350 мВт на $\lambda = 1460$ нм.

На данном этапе мы рассматриваем возможность реализации схем гибридных висмутовых и эрбиевых волоконных перестраиваемых лазеров, работающих отдельно по диапазонам длин волн. Основное внимание уделено ширине поддиапазонов перестройки, чтобы получить, по возможности, их небольшое перекрытие и широкую суммарную область непрерывной перестройки узкополосного лазерного излучения. Поэтому в настоящей работе приведены уточненные данные о реализованных полосах непрерывной перестройки (рис.1), в основном на их краях. Далее рассматриваются схемы перестраиваемых висмутовых лазеров в последовательности освоения спектральных диапазонов.

3. Престраиваемые висмутовые лазеры с длинами волн излучения в диапазоне 1270–1370 нм

Как уже отмечалось, длина волны лазерного перехода в активных висмутовых центрах сильно зависит от их окружения. Так, в алюмосиликатном кварцевом стекле одномодового волоконного световода усиление происходит в диапазоне длин волн 1100–1200 нм. Легирование фосфором вместо алюминия сдвигает полосу усиления в область 1270–1370 нм. Поэтому для создания и исследования непрерывного висмутового волоконного лазера в первом из показанных на рис.1 диапазонов мы использовали одномодовые световоды с матрицей PSB, в которых сердцевина была также слабо легирована германием. Максимум полосы люминесценции приходился на $\lambda \approx$

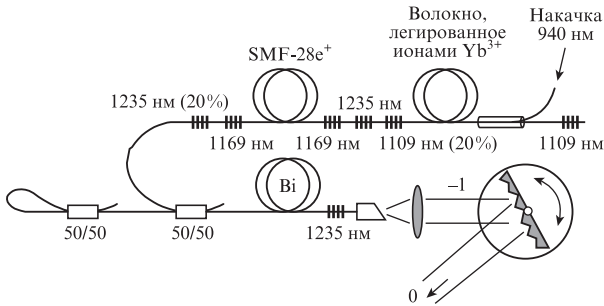


Рис.2. Схема волоконного перестраиваемого лазера, излучающего в диапазоне 1270–1370 нм (здесь и на рис.11 – 1,0 – порядки дифракции).

1300 нм (см. также [1, 2]). Для накачки можно было использовать излучение с длиной волны 1240 нм.

Схема перестраиваемого волоконного лазера, излучающего в диапазоне 1270–1370 нм, приведена на рис.2. В качестве активного висмутового световода использован одномодовый PSB-световод длиной 60 м с концентрацией висмута ~ 0.01 мас.%. Широкополосным зеркалом на одном конце резонатора служил петлевой отражатель или волоконное зеркало Саньяка на X-разветвителе 50/50, а спектрально-селективным и перестраиваемым зеркалом резонатора лазера на другом конце являлась голографическая дифракционная решетка 600 штрих./мм, включенная по автоколлимационной схеме. Решетка работала в минус первом порядке дифракции, а вывод лазерного излучения происходил в нулевом порядке. Излучение накачки на $\lambda = 1235$ нм поступало в резонатор через спектрально-неселективный волоконный разветвитель 50/50. Волоконная брэгговская решетка с высоким коэффициентом отражения на длине волны излучения накачки 1235 нм, находящаяся вблизи выходного конца резонатора, возвращала непоглощенное излучение накачки обратно в активную часть волоконного лазера и создавала равномерное распределение его интенсивности. Несмотря на потери на зеркалах и в устройстве подвода излучения накачки запаса его мощности (300 мВт) хватало для поддержания генерации в широкой спектральной полосе перестройки (1270–1370 нм).

В качестве источника накачки использовался ВКР-лазер, состоящий из двухкаскадного ВКР-конвертера на основе стандартного одномодового волокна SMF-28e⁺ с длиной волны выходного излучения 1235 нм, который в свою очередь накачивался излучением иттербиевого лазера мощностью 2 Вт на $\lambda = 1109$ нм. Накачка иттербиевого лазера производилась излучением диодного лазера на $\lambda = 940$ нм мощностью 2 Вт с волоконным выходом. Мощность генерации ВКР-лазера накачки могла достигать 600 мВт. Через волоконно-оптический разветвитель 50/50 в резонатор висмутового лазера вводилось 50% мощности излучения накачки, которая составляла 300 мВт на $\lambda = 1235$ нм. Ограничение сверху мощности накачки было связано с лучевой прочностью направленных ответвителей X-типа в резонаторе. Поскольку нам не требовалось достигать максимальной мощности генерации волоконного лазера, которая ожидалась в максимуме полосы люминесценции вблизи $\lambda = 1300$ нм, то при меньшей мощности накачки мы могли расширить диапазон непрерывной перестройки длины волны излучения и реализовать генерацию на краях диапазона 1270–1370 нм.

Отметим, что схема перестраиваемого висмутового волоконного лазера выбрана максимально простой и ти-

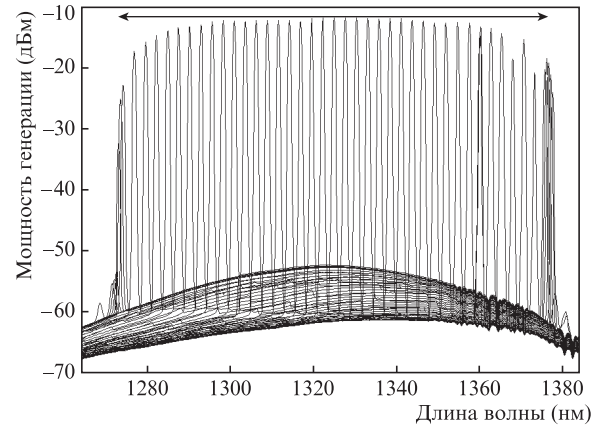


Рис.3. Спектры непрерывной перестройки длины волны генерации висмутового лазера на основе PSB-световода.

повой для данных экспериментов, чтобы в ней можно было менять лишь активную часть и некоторые волоконные брэгговские решетки (ВБР).

На рис.3 приведен «частокол» спектральных линий генерации узкополосного лазерного излучения висмутового перестраиваемого лазера в диапазоне длин волн 1270–1370 нм. В центре диапазона перестройки мощность генерации доходила до ~ 50 мВт, а на его краях она снижалась почти на порядок (до 5 мВт), оставаясь, тем не менее, достаточной для различных применений. Столь значительное изменение мощности генерации делает необходимым выравнивание контура усиления дополнительными спектральными элементами – фильтрами, которые нужно включить в состав резонатора висмутового лазера. (Это будет сделано при исследовании висмутового лазера, генерирующего излучение в следующем спектральном диапазоне (рис.1).)

Мы зарегистрировали спектральные линии генерации с повышенным спектральным разрешением 0.02 нм (рис.4) вблизи центральной длины волны 1327 нм. Видно, что линии относительно гладкие, и их форма определяется аппаратной функцией спектроанализатора. Пока нельзя сделать заключение, являются ли они однородно уширенными (их форма тогда должна быть лоренцевской). Однако предпосылки для формирования узких линий с заданной когерентностью имеются, поскольку боковые частоты около отдельных линий подавлены более чем на

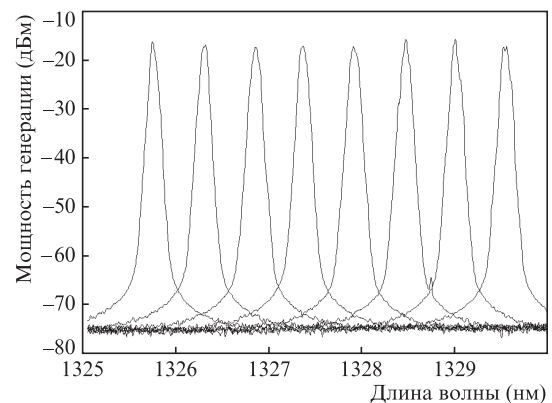


Рис.4. Спектры непрерывной перестройки длины волны генерации висмутового лазера, полученные с повышенным спектральным разрешением 0.02 нм. Интервал между линиями (спектральными каналами) 0.6 нм, отношение сигнал/помеха не менее 50 дБ.

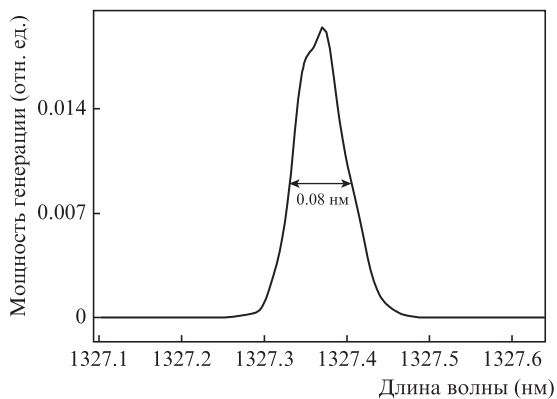


Рис.5. Одиночная линия генерации висмутового волоконного лазера с центром вблизи $\lambda = 1327.36$ нм, зарегистрированная со спектральным разрешением ~ 0.01 нм.

40 дБ. Расстояние между отдельными линиями при перестройке может составлять ~ 0.6 нм, что соответствует $\Delta\nu \approx 100$ ГГц.

На рис.5. показана одиночная линия генерации висмутового волоконного лазера с центром вблизи $\lambda = 1327.36$ нм, зарегистрированная со спектральным разрешением ~ 0.01 нм. Полуширина линии составила ~ 0.08 нм. Полученные данные показывают, что разработанный и исследованный перестраиваемый висмутый лазер, генерирующий излучение в области $\lambda = 1270-1370$ нм, пригоден для использования в системах связи с DWDM, в технике измерений и в датчиках со спектральным разделением. Однако для применений, требующих высокой когерентности излучения, как и аттестации по шумовым параметрам, необходимы дополнительные разработки и исследования.

4. Перестраиваемый висмутый лазер с длинами волн излучения в диапазоне 1350–1510 нм

На рис.6 показана разработанная и исследованная нами, в основном в работе [5], схема непрерывно перестраиваемого висмутового лазера, излучающего в диапазоне 1350–1510 нм. Здесь мы приводим результаты дополнительных исследований. Как и в предыдущем случае, мы использовали в качестве типовой схему резонатора с широкополосными зеркалами и дифракционной решеткой 600 штрих./мм для перестройки длины волны генерации. Перестройка осуществлялась поворотом решетки, для чего узел вывода и перестройки был снабжен мотором, управляемым электрическими сигналами. Конструкция моторизованного узла перестройки висмутового волоконного лазера, генерирующего излучение в диапазоне 1350–1510 нм, показана на рис.7.

Учитывая опыт работы с аналогичным висмутым лазером с диапазоном перестройки длины волны излучения 1270–1370 нм, описанным выше, в схему лазера на рис.6 для диапазона перестройки 1360–1510 нм были внесены следующие изменения, обусловленные изменением рабочего диапазона по длинам волн.

Матрицей активного одномодового световода служило силикатное кварцевое LGSB-стекло с малой концентрацией германия, легированное висмутом. Длина висмутового волокна, изготовленного методом MCVD, равня-

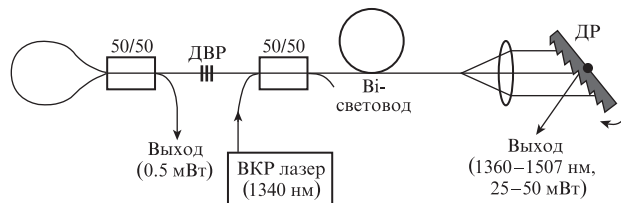


Рис.6. Типовая схема перестраиваемого волоконного лазера на основе LGSB-световода для диапазона длин волн 1360–1510 нм.

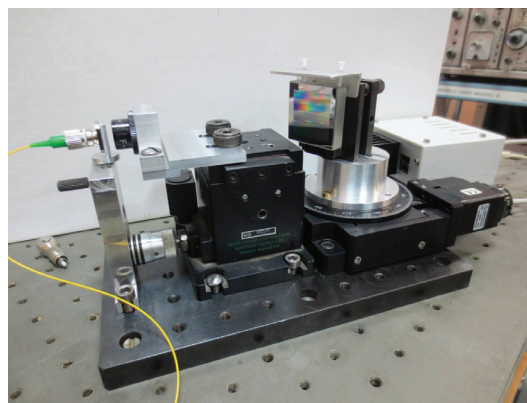


Рис.7. Конструкция узла перестройки длины волн излучения висмутового волоконного лазера в диапазоне 1360–1550 нм, состоящего из дифракционной решетки и мотора для ее вращения. Вывод излучения производится в нулевой порядок дифракции (зеркально по отношению к плоскости решетки).

лась 65 м. Сердцевина волокна состояла из 95% SiO₂, 5% GeO₂ и 0.02% Bi₂O₃. Внешний диаметр световода был равен 125 мкм (без учета полимерного покрытия). Длина волны отсечки второй моды приходилась на 1.1 мкм. Спектр поглощения и усиления висмутового одномодового световода показан на рис.8. Длина активного световода, легированного висмутом, выбиралась из условия практически полного поглощения излучения мощностью ~ 300 мВт на $\lambda = 1340$ нм, получаемого на выходе системы накачки, которая была аналогична показанной на рис.2 с тем лишь различием, что ВКР-лазер генерировал излучение на требуемой для накачки длине волны 1340 нм в соответствии со спектром поглощения висмутых центров.

Для сглаживания контуров люминесценции и усиления с максимумами на $\lambda = 1400$ нм в резонатор была введена длиннопериодная волоконная решетка (ДВП), которая трансформировала суммарный контур так, как это проиллюстрировано на рис.9 для совместного спектра висмутового волокна и решетки. Этим достигалось уплотнение суммарного спектра, подавлялась генерация на длинах волн вблизи центра полосы люминесценции и расширялся диапазон длин волн генерации на краях диапазона перестройки. На рис.10 показана длинноволновая часть частотола линий генерации при перестройке длины волны излучения. Практически удалось получить лазерную генерацию вплоть до длин волн 1540–1550 нм. Таким образом, данный диапазон перестройки с длинноволновой стороны достигал полосы усиления ионов эрбия Er³⁺, что позволяет надеяться на получение квазинепрерывной перестройки длины волны генерации висмутовых лазеров до $\lambda \approx 1550$ нм при использовании гибридных схем волоконных лазеров.

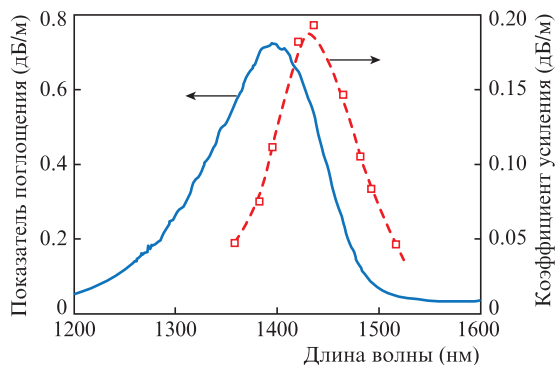


Рис.8. Рабочие полосы поглощения и люминесценции висмутового одномодового волоконного LGSB-световода с матрицей состава 95%SiO₂, 5%GeO₂, 0.02%Bi₂O₃, изготовленного методом MCVD для лазера, перестраиваемого в диапазоне длин волн 1360–1550 нм.

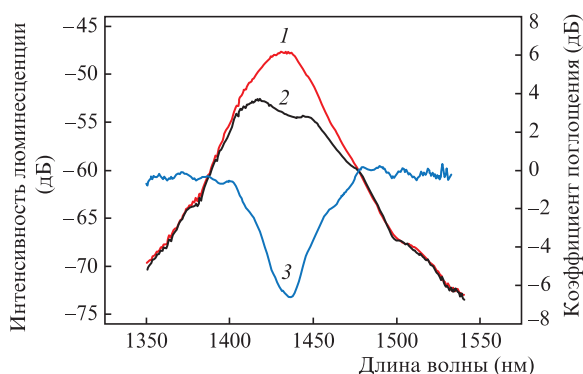


Рис.9. Спектры люминесценции висмутового одномодового LGSB-световода (1) и этого же световода совместно со встроенной ДВР (2), а также спектр поглощения ДВР (3).

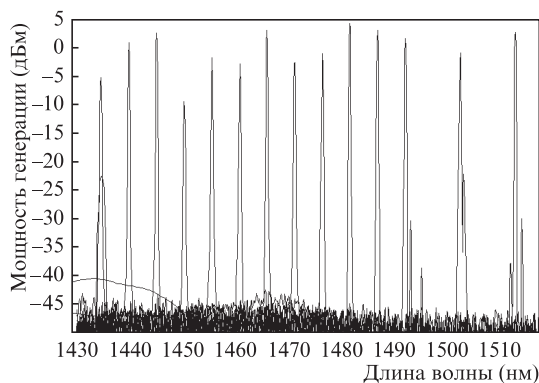


Рис.10. Типичный вид спектральных линий генерации висмутового волоконного лазера при перестройке длины волны излучения дифракционной решеткой вблизи длинноволнового края диапазона на 1360–1550 нм.

5. Перестраиваемые висмутовые лазеры с длинами волн излучения в диапазоне 1600–1800 нм

Для реализации и исследования непрерывной перестройки длины волны излучения висмутовых лазеров в диапазоне 1600–1800 нм нами была выбрана более простая, чем схема на рис.6, и широкополосная волоконная схема висмутового лазера, а именно кольцевая (рис.11). Она универсальна для данного круга задач, поскольку позволяет использовать в контуре подобранный актив-

ный висмутовый световод и другие элементы типа длиннопериодных решеток и/или фильтров на основе ВБР. В схеме можно не использовать глухое зеркало, поскольку спектральная широкополосность определяется только оптической широкополосностью одномодового световода, а в качестве спектрально-селективного элемента для управления длиной волны на выходе можно использовать одну дифракционную решетку, подключаемую к кольцевому контуру – резонатору – с помощью волоконного циркулятора.

Первые результаты исследований висмутового перестраиваемого волоконного лазера для диапазона 1600–1800 нм были получены в работе [6]. Кроме волоконной схемы висмутового лазера, мы для полноты изложения взяли из работы [6] картину перестройки спектральных полос лазерной генерации (рис.12) в указанном диапазоне длин волн. Для данного диапазона был использован одномодовый волоконный HGSB-световод с большим содержанием германия (50 мол.% SiO₂, 50 мол.% GeO₂), легированный висмутом с концентрацией ~0,01 мас.%. Излучение накачки на $\lambda_p = 1564$ нм вводилось через мультиплексор, изготовленный на основе тонкопленочной технологии, которая обеспечивает максимальную равномерность его спектральной характеристики в диапазоне 1600–1800 нм. Потери, связанные со стыковкой элементов, составляли 0.9 дБ. Длина активного висмутового световода равнялась 45 м. Мощность вводимого в активное волокно излучения накачки ограничивалась лучевой стойкостью мультиплексора и составляла 300 мВт. Селективный элемент, сформированный плоской дифракционной решеткой, встраивался в схему резонатора при помощи волоконного циркулятора. Излучение лазера выводилось из резонатора через волоконный разветвитель X-типа с отщеплением 30% оптической мощности. Суммарные потери в резонаторе составляли 10 дБ, а максимальная мощность на выходе лазера равнялась 6 мВт.

Дифракционная решетка, работающая в конфигурации Литтрова, была установлена на автоматизированной поворотной платформе, обеспечивающей точность установки длины волны ~0.05 нм.

Ширина диапазона перестройки исследуемого лазера составила 140 нм. На рис.12 представлены спектры перестройки лазера в диапазоне 1654–1794 нм, полученные на спектроанализаторе Stellar Net с разрешением 10 нм.

Из рис.11,12 следует, что пока технологической и практической проблемой является задача получения активного волоконного световода или построения такой

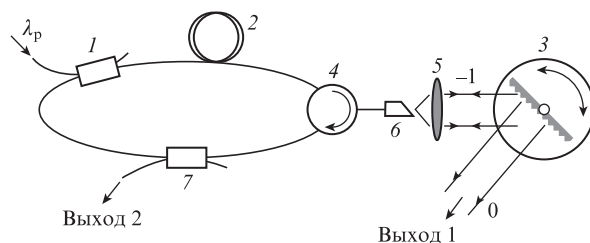


Рис.11. Схема непрерывно перестраиваемого висмутового волоконного лазера кольцевой геометрии для диапазона длин волн 1650–1800 нм [6]:

1 – мультиплексор 1480/1700 нм для ввода излучения накачки; 2 – висмутовый HGSB-световод; 3 – дифракционная решетка на поворотном столике; 4 – волоконно-оптический циркулятор; 5 – микроскопический объектив; 6 – волоконный наконечник со скошенным торцом; 7 – направленный волоконный ответвитель 30/70 для вывода излучения.

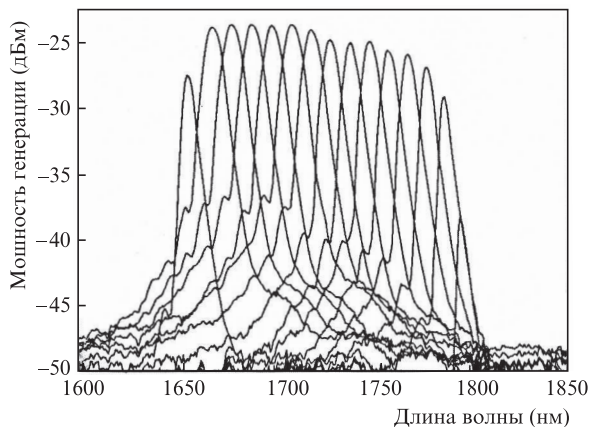


Рис.12. Спектр излучения перестраиваемого висмутового волоконного лазера с HGSB-сердцевиной (50 мол.% SiO₂, 50 мол.% GeO₂, ~ 0.01 мас.% Bi) [6].

гибридной волоконной схемы перестраиваемого лазера, которая позволила бы охватить перестройкой лазерной генерации и диапазон длин волн от ~ 1540 нм до 1600 нм. На этот диапазон и приходится полоса люминесценции (лазерной генерации) ионов Er³⁺ в различных матрицах. Рассмотрим, какие физические и технологические возможности можно рассматривать в качестве перспективных для освоения диапазона перестройки 1540–1650 нм.

6. Возможности создания перестраиваемых гибридных висмут-эрбиевых лазеров для диапазона длин волн 1500–1650 нм

На рис.13 приведены возможные схемы комбинированных волоконных систем для усиления и генерации лазерного излучения в диапазоне длин волн 1500–1650 нм. Соответствующий висмутовый или висмут-эрбиевый одномодовый световод предполагается включить в схему лазера с кольцевой конфигурацией, подобной показанной на рис.11. Варианты I, II и III на рис.13 иллюстрируют возможность применения трех разновидностей активных волокон: с солегированием висмутом и эрбием в одном волокне (I); специально разработанного висмутового световода (II); волокна (III), следующие друг за другом участки которого легированы висмутом и эрбием соответственно.

Для одновременной работы разнородных активных центров в одномодовом волокне резонатора надо будет применять волоконно-оптические спектральные мультиплексоры и демультимплексоры для ввода излучения накачки на $\lambda = 1480$ нм и вывода излучения перестраиваемого лазера, что увеличит габариты всего устройства. Кольцевая схема построения гибридного лазера представляется наиболее удобной для поиска наилучшего сочетания активных участков одномодовых световодов и конфигурации включения их в резонатор. В этой связи в качестве первоочередной возникает задача разработки и исследования волоконного световода, солегированного ионами эрбия Er³⁺, и активных центров висмута (вариант I). Серьезной технологической проблемой является разработка матрицы кварцевого стекла сердцевины одномодового световода и оптимизация концентраций активных центров висмута и эрбия в нем для получения примерно одинаковых интенсивностей люминесценции и лазерной

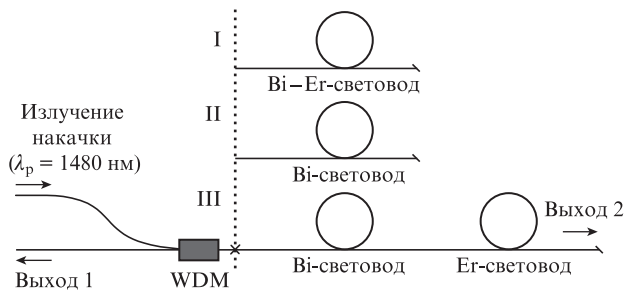


Рис.13. Возможные варианты комбинированных волоконных Bi–Er схем перестраиваемых лазеров для диапазона 1500–1650 нм.

генерации, за которые ответственны эти центры. Результаты разработки и исследования широкополосного оптического усилителя для C+L+U-диапазонов на основе солегированного висмутом и эрбием одномодового волокна, полученные в работе [8], позволяют надеяться на решение задачи создания непрерывно перестраиваемого узкополосного лазера на диапазон 1520–1650 нм.

Мы исследовали характеристики люминесценции одного из первых образцов одномодового световода, солегированного висмутом и эрбием (вариант I). Накачка осуществлялась излучением на $\lambda = 1480$ нм. На рис.14 приведены спектры люминесценции образца одномодового волоконного световода, солегированного Bi и Er³⁺, при различных мощностях излучения накачки. Видно, что при накачке излучением мощностью от 50 до 175 мВт (рис.14,а) интенсивность люминесценции зависит от мощности накачки не сильно, а от длины волны – более существенно: неравномерность по длине волны превышает 10 дБ главным образом вследствие «слишком интенсивной люминесценции» ионов Er³⁺ в своей спектральной полосе (1530–1570 нм). Крыло полосы люминесценции, обусловленной висмутом, с максимумом на $\lambda = 1700$ нм является достаточно пологим и подходящим для равномерной и плавной перестройки длины волны генерации или оптического усиления. Приведенные на рис.14,а результаты показывают, что дальнейшая работа должна быть направлена главным образом на совершенствование технологии изготовления активных волокон и оптимизацию концентраций активаторов висмута и эрбия, а возможно, и состава матрицы и распределения примесей по длине волокна.

На рис.14,б для сравнения с предыдущим вариантом приведены спектры люминесценции комбинированного активного волокна, составленного из последовательно включенных висмутового (65 м) и эрбиевого (7 м) отрезков одномодового волокна (вариант III), при возбуждении и регистрации люминесценции со стороны Bi-волокна. Видно, что при мощности излучения накачки 200 мВт мощность люминесценции (кривая 4) в спектральной полосе 1530–1650 нм изменяется в пределах 5 дБ ($\pm 2,5$ дБ), и можно рассчитывать на получение непрерывной перестройки длины волны генерации в приведенном диапазоне. Как указано в предыдущем разделе, в кольцевой схеме перестраиваемого висмутового лазера при этом необходимо, чтобы усиление превысило уровень потерь (~ 10 дБ), связанных с использованием волоконно-оптических элементов.

На рис.14,б видно, что полоса люминесценции при мощности накачки 100 мВт широкая и достаточно плавная и состоит только из полосы висмутовых активных

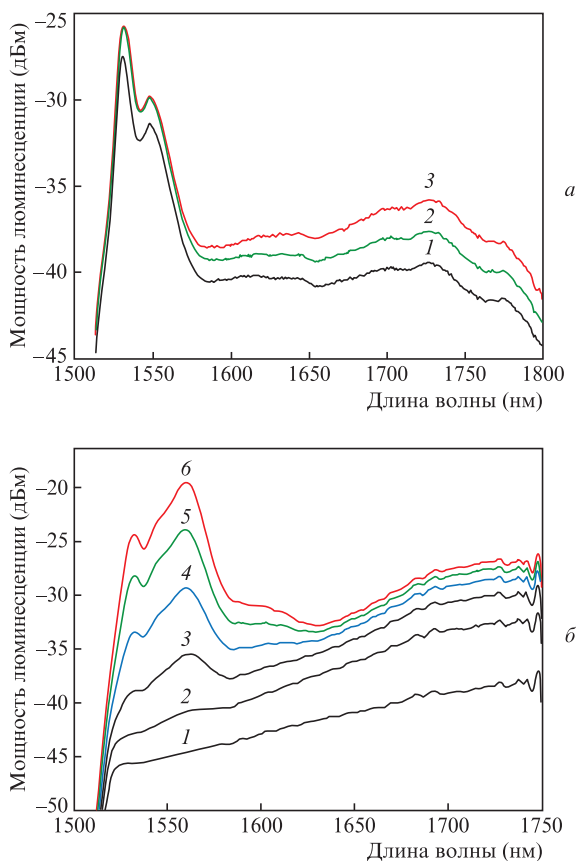


Рис. 14. Спектры люминесценции солегированного Bi и Er^{3+} одномодового волокна № 238 при мощностях излучения накачки 50 (1), 100 (2), 175 мВт (3) (а) и спектры люминесценции активного волокна, составленного последовательно из висмутового (65 м) и эрбиевого (7 м) отрезков одномодового волокна (вариант III) в случае возбуждения и регистрации люминесценции со стороны Bi-световода при мощностях излучения накачки 100 (1), 130 (2), 160 (3), 190 (4), 220 (5) и 250 мВт (6) (б); $\lambda_p = 1480$ нм.

центров, а люминесценция «назад» от отрезка волокна с эрбием не наблюдается. Таким образом в схеме III (рис. 13) при накачке со стороны Bi-волокна, по-видимому, можно не использовать отрезок активного волокна с эрбием и применять только висмутовое активное HGSB-волокно, поскольку люминесценция висмута в этом случае охватывает широкий спектральный диапазон, включающий и полосу люминесценции ионов Er^{3+} . Полоса люминесценции висмута в одномодовом волокне с большим содержанием германия в сердцевине как перспективный вариант для создания перестраиваемых висмутовых лазеров отмечена серым прямоугольником на рис. 1. Коротковолновый край этой полосы находится на $\lambda = 1525$ нм (рис. 14, б), поэтому вариант II (рис. 13) использования для создания перестраиваемого лазера только одномодового HGSB-волокна, легированного висмутом, представляется реальным.

Рисунки 13 и 14 свидетельствуют о том, что главными проблемами при создании гибридных или комбинированных перестраиваемых висмут-эрбиевых лазеров станут подбор и оптимизация составов матриц кварцевого стекла одномодовой сердцевины волокна для сопряжения рабочих спектральных диапазонов, уровня легирова-

ния активными примесями и топологии волоконной схемы лазера с разделением активных участков и направления ввода излучения накачки. Результаты этой работы мы предполагаем изложить в отдельной публикации.

7. Заключение

В настоящей работе проведен анализ достижений в области создания непрерывно перестраиваемых висмутовых волоконных лазеров средней (1–10 мВт) мощности, генерирующих излучение в диапазоне длин волн 1200–1800 нм. Показано, что указанный диапазон может быть перекрыт четырьмя областями основных полос люминесценции висмутовых активных центров вблизи 1300, 1400 и 1700 нм и ионов эрбия Er^{3+} в диапазоне 1500–1600 нм. Оптимальной для реализации широкополосной перестройки длины волны генерации висмутовых волоконных лазеров является кольцевая волоконная схема лазеров с минимальным числом элементов и одним перестраиваемым элементом на основе дифракционной решетки, управляющим спектром. Приведены спектры непрерывной перестройки волны узкополосного лазерного излучения в частично перекрывающихся диапазонах 1270–1370 нм, 1360–1540 нм и 1650–1800 нм. Показано, что четвертый диапазон перестройки, 1500–1650 нм, включающий полосу люминесценции ионов эрбия Er^{3+} , может быть перекрыт с помощью одной из гибридных схем построения волоконного лазера на основе одномодового волокна, солегированного висмутом и эрбием, или одного висмутового HGSB-волокна. Не исключено также использование последовательно включенных в резонатор отрезков висмутового и эрбиевого волокон.

Необходимы дополнительные исследования в области технологии активных волокон, легированных висмутом и эрбием, а также разработка и оптимизация волоконных схем перестраиваемых лазеров, особенно для диапазона длин волн перестройки 1500–1650 нм.

Авторы выражают благодарность С.А.Васильеву за полезные обсуждения и помощь в работе.

1. Bufetov I.A., Dianov E.V. *Laser Phys. Lett.*, **6** (7), 487 (2009).
2. 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** (5), 0903815 (2014).
3. Дианов Е.М., Фирстов С.В., Алышев С.В., Рюмкин К.Е., Шубин А.В., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Медведков О.И., Мелькумов М.А. *Квантовая электроника*, **44** (6), 503 (2014) [*Quantum Electron.*, **44** (6), 503 (2014)].
4. Firstov S.V., Alyshev S.V., Riumkin K.E., Melkumov M.A., Medvedkov O.I., Dianov E.M. *Opt. Lett.*, **40**, 4360 (2015).
5. Парамонов В.М., Беловолов М.И., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Васильев С.А., Медведков О.И., Мелькумов М.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **46**, 1068 (2016) [*Quantum Electron.*, **46**, 1068 (2016)].
6. Парамонов В.М., Васильев С.А., Медведков О.И., Фирстов С.В., Мелькумов М.А., Хопин В.Ф., Гурьянов А.Н., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **47**, 1091 (2017) [*Quantum Electron.*, **47**, 1091 (2017)].
7. Фирстов С.В., Алышев С.В., Рюмкин К.Е., Хопин В.Ф., Мелькумов М.А., Гурьянов М.А., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **45**, 1083 (2015) [*Quantum Electron.*, **45**, 1083 (2015)].
8. Firstov S.V., Riumkin K.E., Khagai A.M., Alyshev S.V., Melkumov M.A., Khopin V.F., Afanasiev F.V., Guryanov A.N., Dianov E.M. *Laser Phys. Lett.*, **14**, 110001 (2017).