

Использование редкоземельных элементов для создания спектрально-селективного поглощения в мощных волоконных лазерах

Т.А.Кочергина, С.С.Алешкина, М.М.Худяков, М.В.Яшков, Д.С.Липатов, А.Н.Абрамов, Л.Д.Исхакова, М.М.Бубнов, А.Н.Гурьянов, М.Е.Лихачев

Исследованы спектры поглощения волоконных световодов, активированных ионами редкоземельных элементов (Sm^{3+} , Tm^{3+} , Tb^{3+} , Pr^{3+} , Ho^{3+}), и показана перспективность их применения для создания спектрально-селективного поглощения в волоконных лазерах. Установлено, что такие световоды могут быть использованы для защиты диодов накачки от обратного излучения на рабочей длине волны для неодимового, эрбиевого, эрбий-иттербиевого или тулиевого лазера. Соответствующий выбор редкоземельного элемента позволяет обеспечить высокое (10–20 дБ) поглощение на рабочей длине волны генерации лазера и в то же время гарантировать высокое пропускание (с потерями менее нескольких десятых дБ) на длинах волн накачки. Для демонстрации перспективности предложенного подхода реализован и исследован волоконный световод, легированный ионами Tm^{3+} , совместимый со световодами, выводящими излучение стандартных полупроводниковых диодов накачки (диаметр сердцевинки 105 мкм, апертура 0.22). Показана возможность эффективного подавления излучения в области 1550 нм на величину более 20 дБ даже в случае мощного (до 10 Вт) нежелательного излучения сигнала. При этом суммарные оптические потери излучения накачки не превышали 0.5 дБ и могут быть уменьшены путем оптимизации состава сердцевинки и конструкции волоконного световода.

Ключевые слова: спектр поглощения, редкоземельный ион, волоконный лазер, защита источника накачки.

1. Введение

Одной из проблем разработки и реализации новых конструкций мощных волоконных лазеров является риск повреждения диодов накачки излучением, генерируемым непосредственно активной средой. Особенно опасным является излучение лазеров, работающих в импульсном режиме, поскольку даже при небольшой средней мощности короткие импульсы могут иметь высокую пиковую мощность, достаточную для вывода диода накачки из строя. В непрерывных лазерах повреждение диодов накачки может быть вызвано, например, прохождением лазерного излучения за волоконную брэгговскую решетку (ВБР) с высоким коэффициентом отражения (близким к 100%) и распространением его в сторону диодов накачки.

В связи с этим при реализации волоконной конструкции лазера/усилителя необходимы, с одной стороны, контроль мощности обратного излучения системы, а с другой стороны, обеспечение дополнительной защиты источников накачки от излучения на длине волны генерации лазера. В маломощных схемах и схемах средней мощности данная проблема решается относительно просто. Так, существуют волоконно-оптические элементы на основе

дихроичных фильтров с одномодовым либо многомодовым входным и выходным световодом, обеспечивающие высокую (от 20 до 50 дБ) степень защиты от излучения сигнала. Коммерчески доступны спектральные фильтры с пропускной мощностью до 30 Вт, апертурой волоконного световода до 0.22 и диаметром сердцевинки до 105 мкм. Также стоит отметить, что многие производители полупроводниковых лазерных диодов заранее устанавливают непосредственно в мощный лазерный модуль дихроичное зеркало, обеспечивающее защиту от излучения наиболее популярных моделей лазеров – иттербиевых (подавление излучения на 30 дБ в диапазоне длин волн 1040–1200 нм). В то же время для источников лазерного излучения мощностью более 30 Вт, используемых для накачки лазеров, с длинами волн генерации, отличными от 1030–1200 нм (например, эрбиевые или тулиевые лазеры), эффективные решения для защиты диодов накачки отсутствуют.

В некоторых случаях исключить попадание нежелательного излучения в диоды накачки можно путем оптимизации конструкции волоконного лазера. В ряде работ предложены и реализованы конструкции специальных объединителей мощности сигнала и накачки, устраняющих обратное отражение за счет соответствующего упорядочивания жил объединителя [1], а также за счет создания дополнительных жил, отводящих обратное излучение из системы [2]. Недостатком такого подхода является то, что при прохождении излучением накачки такого объединителя происходит уменьшение яркости излучения, что неприемлемо для большинства мощных лазерных систем, где максимальная выходная мощность определяется в том числе яркостью источника накачки.

Вследствие этого весьма актуальным является поиск новых способов фильтрации излучения на нежелательных длинах волн. В настоящей работе для этой цели предложено использовать световоды, легированные редкоземельными элементами (РЗЭ). Особенностью РЗЭ являет-

Т.А.Кочергина, С.С.Алешкина, Л.Д.Исхакова, М.М.Бубнов, М.Е.Лихачев. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; e-mail: tatyana@fo.gpi.ru, likhachev@fo.gpi.ru

М.М.Худяков. Научный центр волоконной оптики РАН, Россия, 119333 Москва, ул. Вавилова, 38; Московский физико-технический институт (государственный университет), Россия, Московская обл., 141701 Долгопрудный, Институтский пер., 9

М.В.Яшков, Д.С.Липатов, А.Н.Абрамов, А.Н.Гурьянов. Институт химии высококочистых веществ им. Г.Г.Десятых РАН, Россия, 603950 Н.Новгород, ул. Тропинина, 49

ся присутствие в спектре поглощения относительно узких полос, интенсивность которых может на несколько порядков превышать уровень серых потерь световода. Предотвращение собственной генерации ионов РЗЭ может достигаться за счет низкой эффективности преобразования излучения накачки в сигнал, за счет механизмов безызлучательной релаксации, низкого квантового выхода люминесценции РЗЭ, а также путем создания условий, способствующих увеличению порога генерации, например при использовании световода с достаточно большой сердцевиной. Так, в случае создания защиты для многомодового диода накачки с волоконным выходом, с целью согласования полей мод световода, выводящего излучение полупроводникового диода, и световода защиты, размер сердцевины последнего должен составлять порядка 105 мкм. Порог генерации РЗЭ в этом случае может превышать десятки ватт даже для ионов, имеющих высокий квантовый выход.

Несмотря на простоту предложенной методики, к настоящему моменту использование легированных РЗЭ волоконных световодов в качестве защиты источников накачки было апробировано лишь в крайне ограниченном количестве работ [3–6], что очевидно связано с недостаточным исследованием характеристик РЗЭ в сетке кварцевого стекла. Так, например, в работах [7, 8] приведены спектры РЗЭ в сетке германосиликатного и фосфоросиликатного стекол. Однако для целей подавления нежелательного излучения результаты работ не являются информативными, так как дают лишь качественное представление о положении полос поглощения, но не содержат количественной оценки отношения оптических потерь между положениями максимума поглощения и минимума потерь. Кроме того, в ряде работ (см., напр., [9, 10]) приведены спектры поглощения РЗЭ, измеренные в крайне узкой спектральной области, не захватывающей диапазон генерации наиболее распространенных волоконных лазеров (1000–2000 нм).

В настоящей работе проведено исследование наиболее перспективных РЗЭ для создания полностью волоконной защиты диодов накачки. Исследованы спектры поглощения волоконных световодов, активированных ионами Sm^{3+} , Tm^{3+} , Tb^{3+} , Pr^{3+} и Ho^{3+} , имеющими интенсивные полосы поглощения в ближней ИК области. Показана перспективность ряда РЗЭ для создания защиты источников накачки в конструкциях волоконных лазеров. Для экспериментального подтверждения актуальности предложенной методики подавления нежелательного излучения лазеров реализован тулиевый волоконный световод с диаметром сердцевины/оболочки, равным 105/125 мкм. Способность реализованного световода эффективно подавлять излучение эрбиевого лазера со средней мощностью вплоть до 10 Вт при одновременно низких оптических потерях на длине волны накачки (981 нм) продемонстрирована экспериментально.

2. Исследование спектров поглощения волоконных световодов, легированных РЗЭ

Для обеспечения эффективного спектрально-селективного поглощения необходимо, чтобы оптические потери в световоде на длинах волн сигнала и накачки различались на несколько порядков. Так, для эффективного подавления сигнала необходимо, чтобы уровень его оптических потерь превышал 15–20 дБ, в то время как поте-

ри для излучения накачки желательно иметь на уровне 0.1–0.2 дБ. Для определения наиболее перспективных легирующих добавок были исследованы спектры поглощения световодов, легированных РЗЭ, в широком диапазоне длин волн.

Заготовки волоконных световодов, легированные ионами Sm^{3+} , Tm^{3+} , Tb^{3+} , Pr^{3+} , Ho^{3+} , были изготовлены методом модифицированного осаждения из газовой фазы (MCVD). Введение РЗЭ в сетку кварцевого стекла осуществлено методом пропитки [11]. В качестве опорной трубы использовалась труба марки Heraeus F300. Во всех случаях снижение уровня кластеризации РЗЭ в сетке кварцевого стекла и достижение предельно низких серых потерь на распространение были достигнуты путем легирования сердцевины световода оксидом алюминия (в случае легирования ионами Tm^{3+} , Tb^{3+} , Pr^{3+} , Ho^{3+}) либо оксидом фосфора (в случае легирования ионами Sm^{3+}). Из реализованных заготовок были вытянуты многомодовые волоконные световоды с диаметром сердцевины 18–20 мкм, апертурой 0.16–0.26 и кварцевой оболочкой диаметром 125 мкм. На световоды наносилось полимерное покрытие с показателем преломления выше, чем у кварцевого стекла. Измерение спектров потерь световодов осуществлялось методом последовательного уменьшения их длины. На рис. 1 показаны зарегистрированные спектры оптических потерь созданных световодов. Для простоты сравнения интенсивности поглощения РЗЭ и уровня серых потерь в минимумах оптических потерь спектры приведены в логарифмическом масштабе.

Так как среди существующих волоконных лазерных схем наибольшее распространение к настоящему моменту находят конструкции лазеров/усилителей на основе волоконных световодов, легированных ионами Yb^{3+} , Er^{3+} , Nd^{3+} или Tm^{3+} , нами проведен сравнительный анализ спектров поглощения с целью определения РЗЭ, пригодных для защиты диодов накачки от обратного излучения на характерных длинах волн таких систем. Рассмотрим перспективы применения каждого из исследованных ионов редких земель в качестве элемента защиты диодов накачки отдельно.

Ионы самария (Sm^{3+}). Известно, что ионы Sm^{3+} обладают интенсивными полосами поглощения с максимумами на длинах волн 1070 нм и в диапазоне 1400–1550 нм. Как видно из рис. 1, на длине волны 976 нм (типичная длина волны накачки иттербиевых и эрбиевых волоконных световодов) в результате перекрытия полос поглощения с максимумами на длинах волн 940 и 1070 нм потери остаются сравнительно высокими. По этой причине отношение оптических потерь (в дБ) на длине волны сигнала и накачки составляет около двух порядков для длин волн 1070 и 980 нм и для длин волн 1550 и 980 нм. Таким образом, ионы самария могут быть использованы в качестве поглощающей добавки сердцевины световода защиты в схеме с длиной волны излучения накачки 980 нм и длиной волны излучения сигнала 1070 либо 1550 нм, при условии оправданного уменьшения мощности накачки за счет поглощения в световоде защиты. Единственным исключением является лазерная схема, предложенная в работе [3], где многомодовый световод с относительно небольшой сердцевиной (около 20 мкм) располагается непосредственно за высокоотражающей решеткой. Излучение сигнала в этом случае распространяется (и эффективно поглощается, соответственно) непосредственно в сердцевине, легированной самарием, в то время как потери

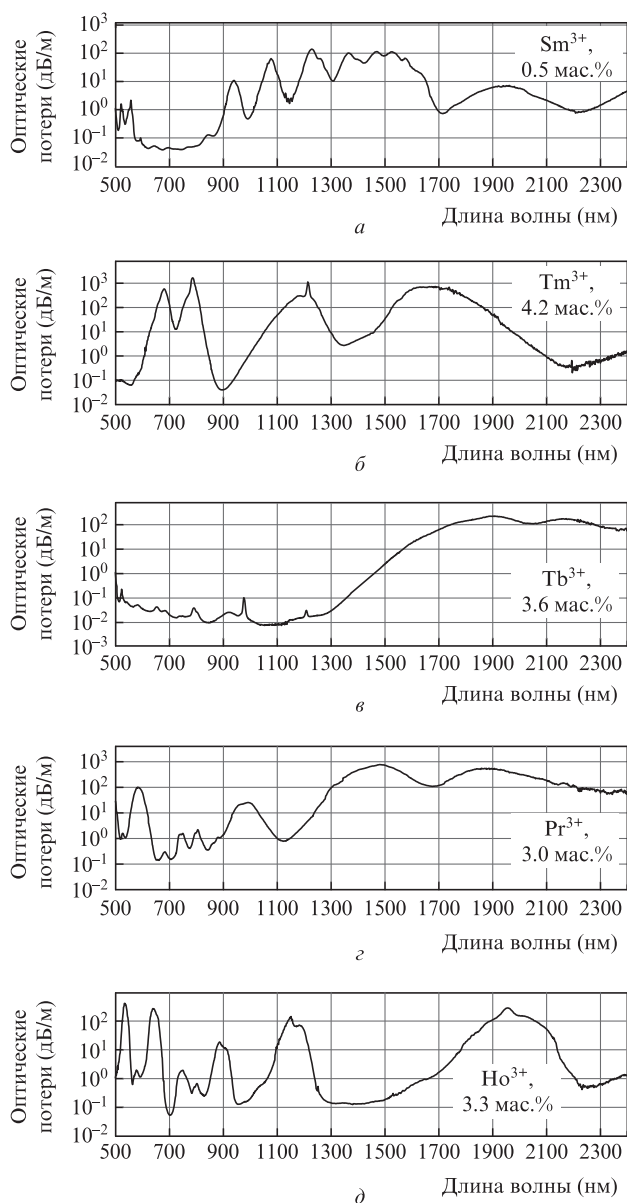


Рис.1. Спектры оптических потерь волоконных световодов, легированных ионами редкоземельных элементов с концентрациями: 0.5 мас.% Sm^{3+} (а), 4.2 мас.% Tm^{3+} (б), 3.6 мас.% Tb^{3+} (в), 3.0 мас.% Pr^{3+} (г) и 3.3 мас.% Ho^{3+} (д).

излучения накачки относительно невысоки, в том числе из-за малого интеграла перекрытия мод оболочки и сердцевинны.

Представляется также перспективным использование ионов самария в лазерах на основе световодов, легированных ионами неодима, и накачиваемых на длине волны ~ 800 нм. Длина волны генерации неодимовых лазеров лежит в области 1064 нм, и нежелательное излучение на этой длине волны может быть эффективно подавлено за счет интенсивной полосы поглощения ионов Sm^{3+} . Соотношение оптических потерь на длинах волн 1064 и 808 нм достигает трех порядков, так что даже подавление мощности сигнала (1064 нм) на 20 дБ не внесет сколь значимых потерь (больших 0.1 дБ) на длине волны накачки (808 нм). Кроме того, ионы самария могут быть эффективно использованы в качестве спектрально-селективных добавок световодов защиты в неодимовых лазерах, гене-

рирующих на нестандартных длинах волн – 1400 и 915 нм [12–14]. В этом случае соотношение потерь на длинах волн 1400 и 808 нм также будет достигать трех порядков, а на длинах волн 915 и 808 нм – двух порядков. Таким образом, легирование ионами самария представляется наиболее перспективным для защиты накачки в неодимовых лазерах.

Ионы тулия (Tm^{3+}). Использование ионов Tm^{3+} в качестве легирующей добавки является наиболее оптимальным решением для защиты источников накачки эрбиевых и эрбий-иттербиевых лазеров с длиной волны накачки 910–981 нм и длиной волны генерации в области 1550 нм [4, 6]. Соотношение потерь на длинах волн 1530–1600 нм и 976 нм (эрбиевый лазер с накачкой по оболочке) достигает почти трех порядков (300–1000), а на длинах волн 1530–1600 нм и 915 нм (эрбий-иттербиевый лазер) – почти четырех порядков (3000–10000).

Ионы тербия (Tb^{3+}). Ионы тербия имеют интенсивную полосу поглощения в спектральном диапазоне около 2 мкм, край которой перекрывает область генерации эрбиевых волоконных световодов. Соотношение оптических потерь на длинах волн 915–981 нм и 1550–1600 нм едва превышает два порядка, однако оно может быть увеличено практически до трех порядков при соответствующей очистке исходных реагентов (пик поглощения на длинах волн 915–976 нм связан с примесью ионов иттербия в исходном соединении тербия). В то же время интенсивность полосы поглощения в области 1550 нм почти на порядок слабее по сравнению с поглощением, достижимым при легировании ионами тулия, и поэтому легирование ионами тербия представляется менее перспективным для защиты лазерных систем на основе эрбиевых световодов.

По всей видимости, волоконные световоды, легированные ионами тербия, могут быть использованы для защиты источников накачки тулиевых лазеров, накачиваемых в полосу поглощения с максимумом на 798 нм. В данном случае соотношение потерь на длинах волн 1900 и 798 нм близко к четырем порядкам (около 5000) и может быть еще улучшено (примерно до 20000) при дальнейшей очистке исходных реагентов (пик на длине волны 798 нм в спектре потерь связан с небольшой примесью ионов тулия в исходном соединении тербия).

Ионы празеодима (Pr^{3+}) и гольмия (Ho^{3+}). Согласно литературным данным ионы празеодима и гольмия имеют полосы поглощения вблизи 1000 нм. Однако детальное исследование их спектров поглощения показало, что полоса поглощения световода, легированного ионами гольмия, находится достаточно далеко от рабочей длины волны сигнала (980–1100 нм), а в случае ионов празеодима, наоборот, перекрывается с длиной волны потенциальной накачки (915–980 нм) (см. рис.1). По всей видимости, световоды, легированные ионами гольмия, могли бы быть полезны для защиты источника накачки в области 976 нм от излучения иттербиевых лазеров, работающих в длинноволновой области (более 1150 нм), однако в этом случае достаточно эффективно должна работать собственная защита в полупроводниковых диодах, отражающая излучение вплоть до 1200 нм. Использование ионов празеодима в качестве легирующей добавки можно применять для защиты источника накачки вблизи 798 нм от излучения тулиевых лазеров в области 1900–2100 нм, где соотношение потерь достигает почти трех порядков (составляет 300).

3. Тулиевый световод для защиты источника накачки

Чтобы экспериментально проверить применимость предложенного подхода для создания защиты источников накачки, нами был реализован тулиевый волоконный световод, согласующийся по параметрам сердцевинки и оболочки с многомодовым световодом, выводящим излучение полупроводникового диода накачки. Диаметры сердцевинки и оболочки реализованного световода были 105 и 125 мкм соответственно, апертура составила 0.22. В качестве матрицы сердцевинки тулиевого световода использовалась германосиликатная матрица стекла, что было продиктовано технологическими особенностями создания световода со ступенчатым профилем показателя преломления и столь большим диаметром сердцевинки относительно диаметра оболочки. Кроме того, более высокий уровень кластеризации в германосиликатной стеклянной матрице способствовал повышению порога собственной генерации ионов тулия. В то же время изменение матрицы сердцевинки привело к увеличению уровня серых потерь световода, вызванному меньшей растворимостью ионов тулия в сетке германосиликатного стекла. В итоге поглощение на длинах волн 1532, 1550 и 1590 нм реализованного световода составило 13, 21 и 40 дБ/м соответственно, а поглощение на длине волны накачки (976–981 нм) было равно 0.19–0.20 дБ/м. Измеренный профиль показателя

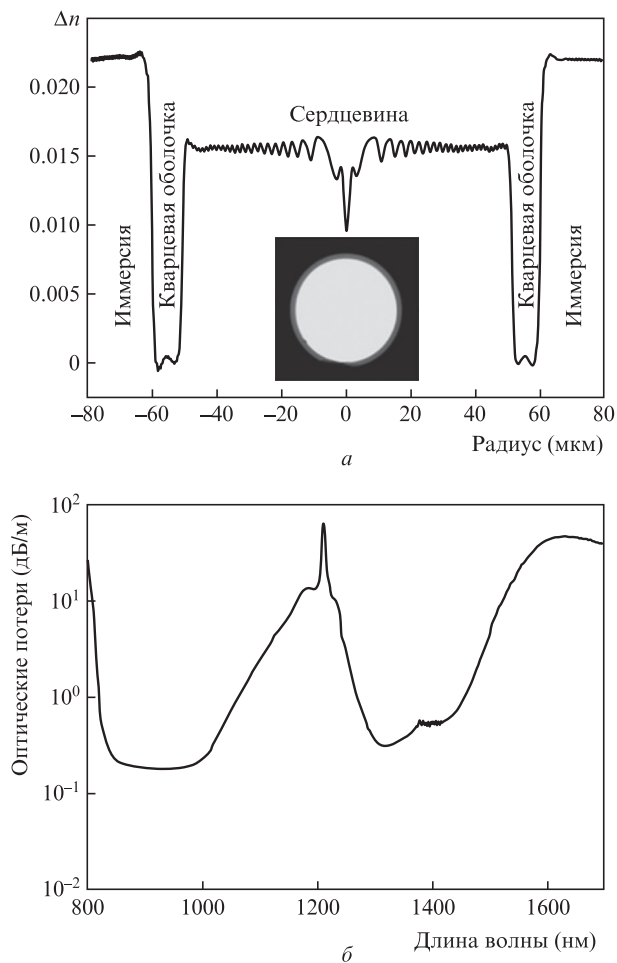


Рис.2. Измеренный профиль показателя преломления реализованного Tm^{3+} -световода и изображение его торца (на вставке) (а) и измеренный спектр оптических потерь Tm^{3+} -световода (б).

преломления световода, изображение торца световода и измеренный спектр поглощения приведены на рис.2.

Реализованный тулиевый световод 105/125 мкм был исследован с точки зрения возможности его применения для защиты источника накачки эрбиевого волоконного лазера с длиной волны накачки 981 нм и длиной волны излучения 1532 нм. Измеренные при слабом сигнале характеристики данного световода достаточны для эффективного подавления нежелательного излучения: поглощение на длине волны 1532 нм превышало 26 дБ при длине защитного световода 2 м, в то время как потери в нем на длине волны накачки были менее 0.4 дБ (менее 10%). Вполне естественно возникает вопрос – до какой средней мощности созданный световод способен эффективно подавлять излучение сигнала, и не происходит ли его просветление, если мощность нежелательного излучения высока. Для того чтобы ответить на этот вопрос, была собрана лазерная схема, в которой излучение источника накачки вводилось в сердцевину тулиевого волоконного световода, выступающего в качестве спектрально-селективного элемента.

Для оценки подавления излучения на длине волны сигнала в качестве источника использовался эрбиевый многомодовый лазер с длиной волны генерации 1532 нм и выходной мощностью 10 Вт [4]. Пропускание световода на длине волны 981 нм (длина волны накачки эрбиевого лазера) было исследовано при помощи стабилизированного по длине волны многомодового полупроводникового диода с выходным волоконным световодом с параметрами сердцевинки и оболочки 105/125 мкм и выходной мощностью 25 Вт.

На рис.3 приведена зависимость вносимых тулиевым световодом потерь от мощности излучения сигнала на 1532 нм. Видно, что при увеличении мощности нежелательного излучения на длине волны 1532 нм до средней мощности 10 Вт его поглощение в исследуемом тулиевом световоде длиной от 0.5 до 1.5 м незначительно уменьшается, что, вероятно, связано с просветлением ионов тулия. Так, при короткой длине световода (0.5 м) потери с ростом мощности сигнала на 1532 нм уменьшаются в полтора раза, однако при больших длинах тулиевого световода его просветление не превышает 20%, что обеспечивает приемлемую для большинства практических применений защиту диодов накачки.

Для оценки уровня потерь, вносимых тулиевым световодом на потенциальной длине волны накачки, в него

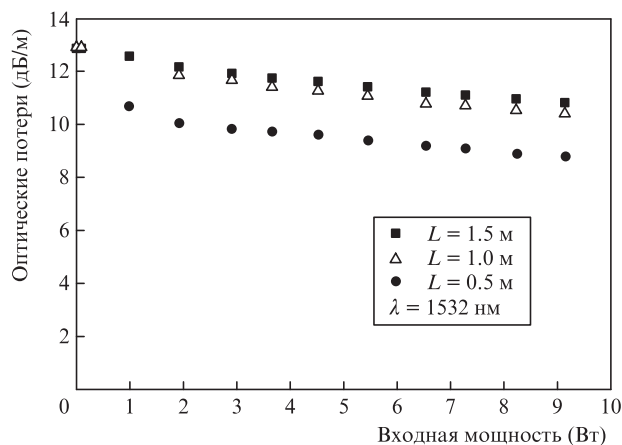


Рис.3. Зависимости оптических потерь от выходной мощности излучения на 1532 нм для тулиевого световода разной длины.

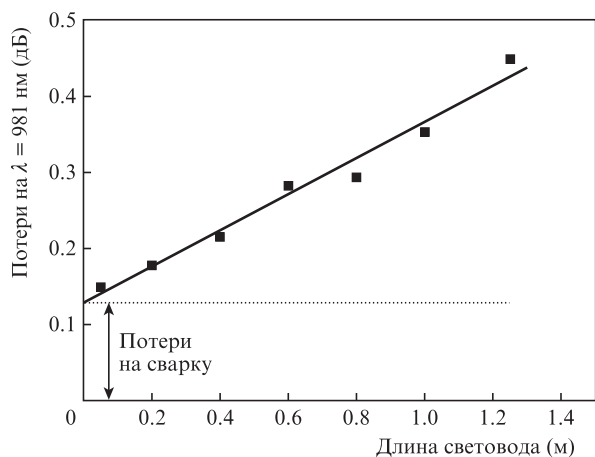


Рис.4. Зависимость внесенных Tm^{3+} -световодом потерь на распространение от его длины, измеренная при максимальной мощности излучения на 981 нм. Точки – эксперимент, сплошная линия – линейная аппроксимация.

вводился сигнал на длине волны 981 нм мощностью 25 Вт. Результаты измерений зависимости вносимых потерь от длины Tm^{3+} -световода приведены на рис.4. Наклон полученной кривой, определяющей общий уровень потерь на длине волны 981 нм, составил 0.24 дБ/м, что коррелировало с результатами измерения потерь для слабого сигнала. Согласно графику потери на сварку выводящего излучения диода световода и реализованного тулиевого световода не превышали 0.15 дБ. Таким образом, можно заключить, что разработанный нами тулиевый световод при длине около 1.5 м может обеспечить эффективное (более 15–40 дБ) поглощение нежелательного излучения на длинах волн 1532–1600 нм при относительно низких (менее 0.5 дБ) потерях на длине волны излучения накачки в области 976–981 нм.

4. Заключение

В работе проведено исследование спектров пропускания РЗЭ (Tm^{3+} , Ho^{3+} , Sm^{3+} , Tb^{3+} , Pr^{3+}). Впервые экспериментально исследовано соотношение между пиками поглощения РЗЭ и минимальным уровнем серых потерь световодов. Рассмотрены перспективы использования ряда РЗЭ-световодов для решения задач, требующих внесения в схему спектрально-селективных оптических потерь в ближней ИК области. В частности, оценена приемлемость РЗЭ-световодов для защиты диодов накачки от излучения на длине волны генерации волоконного лазера. Установлено, что световоды, легированные ионами Sm^{3+} , перспективны для неодимовых лазеров с длиной волны генерации 1064, 915 или 1400 нм при длине волны накачки 808 нм. Световоды, легированные ионами Tm^{3+} , могут обеспечить защиту диодов накачки в случае эрбиевых и

эрбий-иттербиевых лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1530–1600 нм при накачке в области 915–981 нм. Световоды, легированные ионами Tb^{3+} , могут найти применение в тулиевых волоконных лазерах для подавления излучения генерации в области 1900 нм и обеспечения низких оптических потерь на длинах волн накачки (798 либо 1200 нм).

Экспериментально продемонстрировано, что использование Tm^{3+} -световода с диаметрами сердцевины/оболочки 105/125 мкм позволяет эффективно устранить (на 15–40 дБ) нежелательное излучение на длине волны 1530–1600 нм мощностью как минимум до 10 Вт при низких (менее 0.5 дБ) потерях на длине волны накачки (915–981 нм).

Авторы выражают благодарность научному руководителю НЦВО РАН академику Е.М.Дианову за оказанную поддержку и проявленный интерес к работе, а также В.М.Машинскому за предоставленный PbS-фотоприемник, необходимый для проведения измерений потерь в спектральной области до 2.5 мкм.

Работа выполнена при поддержке РФФ (грант №16-12-10553).

1. Nakai M., Shima K., Saito M., Kitabayashi T. *Proc. SPIE*, **6453**, 645319 (2007).
2. Faucher M., Seigny B., Perreault R., Wetter A., Holehouse N. *Proc. CLEO/QELS 2008* (San Jose, California, USA, 2008, CMA5).
3. Грux Д.А., Курков А.С., Раздобреев И.М., Фотиади А.А. *Квантовая электроника*, **32**, 1017 (2002) [*Quantum Electron.*, **32**, 1017 (2002)].
4. Kotov L.V., Aleshkina S.S., Khudyakov M.M., Bubnov M.M., Medvedkov O.I., Lipatov D.S., Guryanov A.N., Likhachev M.M. *J. Lightwave Technol.*, **35**, 4540 (2017).
5. Aleshkina S.S., Levchenko A.E., Medvedkov O.I., Bobkov K.K., Bubnov M.M., Lipatov D.S., Guryanov A.N., Likhachev M.E. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, **30**, 127 (2018).
6. Denker B.I., Egorova O.N., Galagan B.I., Kamynin V.A., Ponosova A.A., Sverchkov S.E., Semjonov S.L., Tsvetkov V.B. *Laser Phys. Lett.*, **14**, 075101 (2017).
7. Ainslie B.J., Craig S.P., Davey S.T. *J. Lightwave Technol.*, **6**, 287 (1988).
8. Farries M.C., Morkel P.R., Townsend J.E. *Electron. Lett.*, **24**, 709 (1988).
9. Suetsugu Y., Isikawa S., Kohgo T., Ishiguro Y., Wakami T., Yokota H., Takana S. *Proc. IOOC 1989* (Kobe, Japan, 1989, 21C3-5).
10. Farries M.C., Townsend J.E., Poole S.B. *Electron. Lett.*, **22**, 1126 (1986).
11. Townsend J.E., Poole S.B., Payne D.N. *Electron. Lett.*, **23**, 329 (1987).
12. Dawson J.W., Pax P.H., Allen G.S., Drachenberg D.R., Khitrov V.V., Schenkel N., Messerly M.J. *Opt. Express*, **24**, 29138 (2016).
13. Pax P.H., Khitrov V.V., Drachenberg D.R., Allen G.S., Ward B., Dubinskii M., Messerly M.J., Dawson J.W. *Opt. Express*, **24**, 28633 (2016).
14. Буфетов И.А., Бубнов М.М., Мелькумов М.А., Дудин В.В., Шубин А.В., Семенов С.Л., Кравцов К.С., Гурьянов А.Н., Яшков М.В., Дианов Е.М. *Квантовая электроника*, **35**, 328 (2005) [*Quantum Electron.*, **35**, 328 (2005)].