Вопросы создания волоконных источников с повышенной стабильностью мощности и систем измерения параметров фотонно-кристаллических волокон

© С.О. Леонов, В.А. Лазарев, Д.А. Дворецкий,
С.Н. Боярская, С.Г. Сазонкин

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены вопросы создания перспективных волоконных источников с повышенной стабильностью выходной мощности и систем измерения параметров фотонно-кристаллических волокон (ФКВ). Разработан метод повышения стабильности выходной мощности за счет использования широких линий поглощения активного волокна. Представлены результаты исследований линий поглощений активных волокон, легированных ионами тулия Tm^{3+} . Проведено математическое моделирование дисперсионных характеристик ФКВ различного вида. Представлены результаты экспериментальных измерений дисперсионных характеристик на разработанном измерительном стенде и проведена верификация полученных результатов.

Ключевые слова: хроматическая дисперсия, фотонно-кристаллические волоконные световоды, волоконные лазеры, тулиевые световоды.

Введение. В последнее десятилетие актуальными направлениями исследований являются задачи повышения точности систем глобального позиционирования и спутниковых навигационных системах, в частности создание компактных бортовых стандартов частоты, основанных на высокостабильных лазерных источниках. К перспективным мобильным хранителям частоты можно отнести систему на основе Cr^{2+} :ZnSe-лазера с CH_4 -ячейкой. Создание таких систем требует специальных волоконных источников с высокой стабильностью выходной мощности и длиной волны генерации 1,8...2,2 мкм для накачки Cr^{2+} :ZnSe-лазера [1] и специальных оптических волокон, позволяющих осуществлять преобразование излучения Cr^{2+} :ZnSe-лазера в другие спектральные диапазоны для создания фемтосекундных делителей частоты [2]. В качестве источника накачки Cr^{2+} :ZnSe-лазера перспективным является волоконный тулиевый лазер, излучение которого попадает в указанный диапазон.

Волоконный тулиевый лазер. Для накачки волоконных тулиевых лазеров применяются различные схемы [3, 4]. Повышенную стабильность выходной мощности для накачки Cr^{2+} :ZnSe-лазера обеспе-

чивает схема накачки в области поглощения Yb^{3+} и Tm^{3+} на длине волны 920 нм. Накачка производится не в максимум поглощения иттербия (980 нм), а в «хвост» максимума на длине волны примерно 920 нм, что позволяет избежать возможного срыва генерации при изменении спектра диода накачки от нагревания элементов. Также для накачки тулиевого лазера можно использовать лазерные диоды с длиной волны генерации 920 нм, которые широко представлены на рынке и имеют выходную мощность до 50 Вт.

Разработан макет лазера (рис. 1) на основе волокна, легированного одновременно ионами Yb^{3+} и Tm^{3+} . Данная схема реализована с использованием только волоконных компонентов, что позволяет уменьшить потери излучения в резонаторе.

Рис. 1. Схема волоконного тулиевого лазера с повышенной стабильностью выходной мощности:

1 — блок диодов накачки; 2 — многомодовый световод для передачи излучения накачки; 3 — одномодовое волокно с нанесенной брэгговской решеткой с высоким коэффициентом отражения (0,98) на длине волны 1,95 мкм; 4 — активное волокно с двойной оболочкой; 5 — места сварки волокон

Для реализации лазера выбран световод с квадратным профилем первой оболочки, легированный одновременно иттербием и тулием. Такой тип оболочки позволяет повысить число проходов излучения накачки через сердцевину волокна. Результаты исследования поглощения этого волокна как по сердцевине (рис. 2, а), так и по оболочке (рис. 2, б) показали, что для полного поглощения излучения накачки на длине волны примерно 920 нм необходима длина активного световода порядка 5 м, с поглощением около 2,9 дБ/м.

Таким образом, возможно создание волоконного лазера с повышенной стабильностью выходной мощности на основе активных волокон, легированных тулием и иттербием при накачке на длине волны 920 нм. Выходная мощность разработанного волоконного лазера со-

Рис. 2. Спектр поглощения волокна:

а — по сердцевине; *б* — по оболочке (стрелкой показана длина волны накачки)

ставила 3,5 Вт в непрерывном одномодовом режиме на длине волны излучения 1,96 мкм со спектральной шириной полосы 0,1...0,2 нм. Долговременная нестабильность выходной мощности при усреднении 60 мин составила 0,1 %, что позволяет использовать данный лазер для накачки $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}$ -лазера в квантовых стандартах частоты нового поколения.

Моделирование дисперсионных характеристик. Фотонно-кристаллические волокна (ФКВ) начинают широко использовать в лазерной технике, поскольку они обладают уникальными дисперсионными свойствами. В частности, при разработке фемтосекундных делителей частоты необходимы волокна с различными дисперсионными характеристиками, поэтому особо актуально применение ФКВ, в которых можно управлять дисперсионными параметрами за счет изменения их геометрических параметров, а именно диаметрами сердцевины и капилляров, расстоянием между капиллярами и структурой компоновки капилляров. В этой связи большую актуальность приобретает задача разработки метода и стенда для измерений дисперсионных характеристик таких световодов.

Рис. 3. Виды моделируемых ФКВ

На первом этапе исследований проводили математическое моделирование процесса распространения излучения в ФКВ с различной геометрией (рис. 3). Затем были выполнены измерения в целях верификации расчетных параметров ФКВ.

В результате математического моделирования рассчитаны дисперсионные характеристики (рис. 4) для представленных образцов ФКВ на основе решение уравнения Максвелла методом конечных элементов:

$$(\nabla^2 + k^2 \epsilon(\mathbf{r}_T) + [\nabla \ln \epsilon(\mathbf{r}_T)] \wedge \Delta \wedge) \mathbf{H}_T = \beta^2 \mathbf{H}_T,$$

где $\epsilon(\mathbf{r}_T)$ — диэлектрическая проницаемость; $\mathbf{r}_T = (x, y)$ — координаты в поперечной плоскости; k — волновое число; $\mathbf{H}$ — вектор напряженности магнитного поля.

Рис. 4. Зависимости удельной хроматической дисперсии D от длины волны для двух видов ФКВ:

a — первый образец; b — второй образец

Для измерения хроматической дисперсии разработана экспериментальная установка [5], на которой проведены измерения удельной хроматической дисперсии (рис. 5) двух образцов ФКВ. Разность между значениями рассчитанной и экспериментально измеренной удельной хроматической дисперсий составляет не больше 5...7 %, что может быть обусловлено следующими причинами:

- при теоретическом расчете контуры капилляров волокна аппроксимированы окружностями, которые в реальном образце имеют более сложную форму;
- при расчетах рассматривалась только линейно поляризованная мода, для которой отсутствует анизотропия волокна, вызванная механическими воздействиями при его закреплении;
- при вытягивании волокна может существовать неравномерность скорости, которая приводит к изменению диаметра сердцевинки волокна.

Рис. 5. Графики удельной хроматической теоретически рассчитанной (1) и экспериментально измеренной (2) дисперсии для двух образцов ФКВ: а — первый образец; б — второй образец

Полученные результаты позволяют разработать ФКВ с требуемыми значениями хроматической дисперсии для их применения в фемтосекундных делителях частоты.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Бакланов Е.В., Покасов П.В. Оптические стандарты частоты и фемтосекундные лазеры. *Квантовая электроника*, 2003, т. 33, № 5, с. 383–400.
- [2] Губин М.А., Киреев А.Н., Козловский В.И., Коростелин Ю.В., Лазарев В.А., Пнев А.Б., Подмарьков Ю.П., Тюриков Д.А., Фролов М.П. Наблюдение резонансов насыщенной дисперсии метана в двухмодовом $\text{Cr}^{2+}:\text{ZnSe}/\text{CH}_4$ -лазере. *Квантовая электроника*, 2012, т. 42, № 7, с. 565–566.
- [3] Clarkson W.A., Shen D.Y., Jander P.J., Sahu J.K. *Tm Doped Fiber Laser Pumped by a Cladding-Pumped Er/Yb Fiber Laser*. Optoelectronics Research Centre University of Southampton, report, 2005, pp. 15–25.
- [4] Peter F. Moulton, Glen A. Rines, Evgueni V. Slobodtchikov, Kevin F. Wall, Tm-doped fiber Lasers: Fundamentals and power Scaling. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 15, no. 1, 2009, pp. 85–92.
- [5] Боярская С.Н., Леонов С.О., Лазарев В.А., Пнев А.Б. Метод измерения хроматической дисперсии в фотонно-кристаллическом волоконном световоде. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение, Спецвыпуск № 8 «Современные проблемы оптотехники»*, 2012, с. 125–130.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Леонов С.О., Лазарев В.А., Дворецкий Д.А., Боярская С.Н., Сазонкин С.Г. Вопросы создания волоконных источников с повышенной стабильностью мощности и систем измерения параметров фотонно-кристаллических волокон. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/930.html>

Леонов Станислав Олегович родился в 1986 г. Младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области оптико-электронных и лазерных приборов. e-mail: Leonov-St@yandex.ru

Лазарев Владимир Алексеевич родился в 1986 г. Младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 12 научных работ и 2 патентов на изобретение в области волоконно-оптических приборов и лазерной физики. e-mail: sintetaza@mail.ru

Дворецкий Дмитрий Алексеевич родился в 1986 г. Младший научный сотрудник НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 10 научных работ в области волоконно-оптических приборов и лазерной физики. e-mail: ddvoretzkiy@gmail.com

Боярская Светлана Николаевна родилась в 1990 г. Инженер НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: snboyarskaya@gmail.com

Сазонкин Станислав Григорьевич родился в 1990 г. Инженер НОЦ «Фотоника и ИК-техника» МГТУ им. Н.Э. Баумана. e-mail: sazstas@gmail.com