

# Одночастотный волоконный лазер с коротким резонатором, изготовленный на основе фоточувствительного Er/Yb фосфоросиликатного световода

А.А. Рыбалтовский<sup>1</sup>, Д.С. Липатов<sup>2</sup>, М.Е. Белкин<sup>3</sup>, О.В. Бутов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН

<sup>2</sup>Институт химии высокочистых веществ им. Г.Г. Девятовых РАН

<sup>3</sup>МИРЭА – Российский технологический университет

\*E-mail: [obutov@mail.ru](mailto:obutov@mail.ru)

DOI: 10.31868/RFL2020.65-66

Одночастотные волоконные лазеры представляют большой интерес для применения в телекоммуникационном диапазоне длин волн (1500–1600 нм) в качестве компактных, мал шумящих и помехоустойчивых источников эталонного сигнала. Длина резонатора одночастотных волоконных лазеров составляет обычно несколько сантиметров, а в качестве основы для их изготовления чаще всего применяются высоколегированные эрбиевые световоды. Однако из-за высокой вероятности ап-конверсионных процессов в таких лазерах нередко возникает самопроизвольный импульсный режим генерации, являющийся существенным ограничением для их практического использования [1]. Таким образом, решение проблемы создания непрерывных одночастотных лазеров во многом зависит от успехов в области разработки активных световодов с оптимальным составом стекла сердцевин.

Заготовка (преформа) экспериментального световода была изготовлена методом модифицированного химического осаждения из газовой фазы (MCVD), с осаждением всех составляющих стекло компонентов из газовой фазы. В качестве прекурсоров использовались легкокипящие  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{POCl}_3$ ,  $\text{CCl}_4$ ,  $\text{C}_2\text{F}_3\text{Cl}_3$ , а также мало-летучие хелаты -  $\text{Er}(\text{thd})_3$  и  $\text{Yb}(\text{thd})_3$ . Изготовление стекла сердцевин путем последовательного осаждения тонких слоев фосфоросиликатной матрицы, каждый из которых дополнительно пропитывался оксидами эрбия и иттербия, обеспечило итоговую высокую концентрацию активных ионов. При концентрации оксида фосфора 11 мол. % значения концентраций оксидов эрбия и иттербия в сердцевине заготовки составили 0.1 и 0.8 мол. % соответственно.

Из заготовки был вытянут одномодовый световод с внешним диаметром кварцевой оболочки 125 мкм, длиной волны отсечки высшей моды сердцевин  $\sim 950$  нм и разностью показателей преломления сердцевин и оболочки  $\sim 0.014$ . Интенсивность поглощения на длине волны 976 нм в световоде составила  $\sim 1500$  дБ/м, а интенсивность поглощения ионов эрбия в пике на длине волны 1535 нм - 60 дБ/м. Уровень «серых» оптических потерь в световоде не превышал 0.04 дБ/м.

Резонатор волоконного лазера типа Фабри-Перо был сформирован целиком на отрезке активного световода общей длиной  $\sim 3$  см. На расстоянии  $\sim 9$  мм друг от друга были записаны две волоконные брэгговские решетки показателя преломления длиной 10 мм каждая с коэффициентами отражения 99.9 и 94.3 %, выполняющие функцию «глухого» и выходного зеркал резонатора соответственно. Запись решёток осуществлялась с помощью прошедшего через фазовую маску с периодом 1072 нм фокусированного лазерного импульсного УФ-излучения с плотностью энергии в импульсе 150 мДж/см<sup>2</sup>. В качестве

источника такого излучения использовался эксимерный ArF лазер Coherent COMPro, генерирующий на длине волны 193 нм импульсы длительностью ~ 20 нс с частотой повторения 10 Гц. Для повышения фоточувствительности к УФ-облучению образец активного световода предварительно выдерживался в атмосфере молекулярного водорода при температуре 373К и давлении 12 МПа в течение 24 часов до полного насыщения сердцевины водородом.

Для накачки лазерного резонатора использовалась волоконная схема, описанная в [1]. Излучение накачки вводилось через волоконный фильтр-мультиплексор 976/1550 навстречу распространению излучения волоконного лазера. Источником ИК-излучения с длиной волны 976 нм в настоящей работе являлся лазерный диод Gooch & Housego D500-0976-SM с максимальной выходной мощностью 600 мВт. Пороговое значение мощности накачки, при котором возникала лазерная генерация, составило ~ 100 мВт. Регистрация оптического спектра излучения лазера проводилась с высоким спектральным разрешением 0,016 нм при помощи оптического анализатора спектра Yokogawa AQ6370D. Спектр излучения лазера, измеренный вблизи порога генерации, приведён на рис. 1(а). В отличие от лазеров, являвшихся предметом исследований предыдущих работ [1] и [2], данный лазер генерировал непрерывное излучение начиная с пороговых значений мощности накачки и при комнатной температуре (295 К). В течение 2 часов был зафиксирован строго непрерывный характер излучения лазера на длине волны 1551,6 нм, при отсутствии признаков паразитной генерации ионов иттербия в диапазоне длин волн 1000–1100 нм.

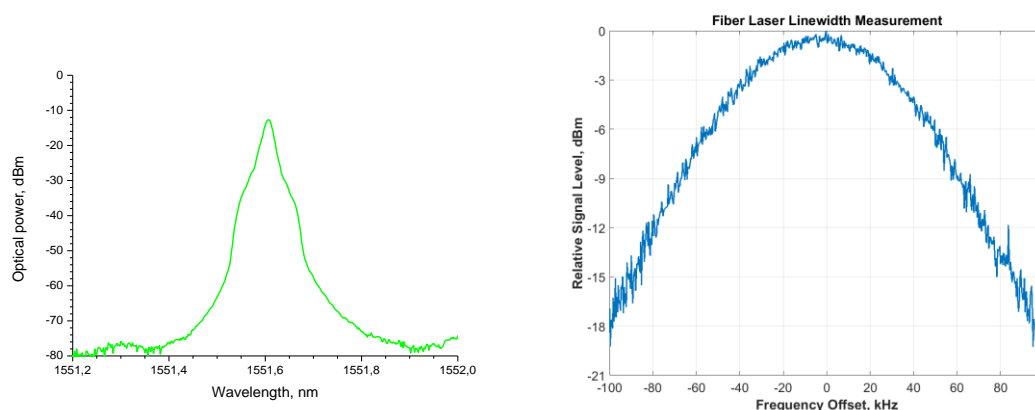


Рис. 1. Спектральные характеристики лазера, изготовленного на отрезке Er/Yb фосфоросиликатного световода: оптический спектр излучения лазера (а); результат измерения ширины спектральной линии (б).

Измерения ширины спектральной линии лазера были проведены с помощью гетеродинной схемы и методики, описанной в работе [3]. Основными элементами экспериментальной установки для измерения ширины линии в настоящей работе являлись: акустооптический модулятор Brimrose AMF-100-1550-2FP+, радиочастотный генератор Keysight N5181B и анализатор спектра Agilent E4448A. В качестве линии задержки использовалась катушка со стандартным телекоммуникационным световодом длиной 25 км. Результаты измерения РЧ-спектра сигнала с фотодетектора представлены на рис. 1(б). Собственная ширина спектральной линии, определённая с помощью аппроксимации данного спектра функцией Фойгта, составила ~35 кГц.

## Литература

- [1] A. M. Smirnov, A. P. Bazakutsa et al. *ACS Photonics* **5**, 5038-5046 (2018)
- [2] A.A. Rybaltovsky, O.V. Butov et al. *Results in Physics* **16**, 102832 (2020)
- [3] М.Е. Белкин, Л.И. Жуков: Фотоника и радиопотоника в радиоэлектронных системах сверхвысокочастотного диапазона: учебно-методическое пособие, Московский технологический университет (МИРЭА), 2017. –64 с