

УДК 681.7.068/.069

В.А. Акулов^{1,2}, А.А. Власов²¹ ООО «Инверсия – Файбер», Новосибирск, Россия² Институт автоматизации и электротехники СО РАН, Новосибирск, Россия

ЭФФЕКТИВНАЯ СХЕМА НАКАЧКИ ЭРБИЕВОГО ВОЛОКОННОГО ЛАЗЕРА С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ПОДАВЛЕНИЯ РЕЛАКСАЦИОННЫХ КОЛЕБАНИЙ

Разработана конфигурация задающего эрбиевого лазера с распределенной обратной связью, объединенного со схемой усилителя оптического сигнала, обеспечивающего максимальный КПД использования накачки при минимизации влияния релаксационных колебаний на выходные параметры излучения. В данной схеме получено одночастотное излучение волоконного лазера мощностью до 30 мВт при уровне накачки 600 мВт. Усиленное спонтанное излучение находится на уровне 0,08 %. Величина относительного шума интенсивности – на уровне –140 дБ/Гц на частотах более 10 МГц и –100 дБ/Гц на пике релаксационных колебаний. Ширина спектра генерации – менее 1 кГц.

Ключевые слова: волоконный лазер с распределенной обратной связью, эрбиевый лазер, схема лазера, релаксационные колебания, шум, ширина спектра.

V.A. Akulov^{1,2}, A.A. Vlasov²¹ Inversion Fiber Co. Ltd., Novosibirsk, Russian Federation² Institute of Automation and Electrometry, Novosibirsk, Russian Federation

EFFICIENT PUMPING SCHEME OF ER-DOPED DFB FIBER LASER WITH SUPPRESSED RELAXATION OSCILLATIONS

The scheme of erbium-doped distributed feedback fiber laser is proposed. The scheme combines the pumping schemes of the single frequency oscillator and optical signal amplifier. The scheme provides maximum efficiency of pump to signal conversion while minimizing the effect of relaxation oscillations on the output radiation parameters. In this scheme single-frequency fiber laser radiation power up to 30 mW achieved at the pump power of 600 mW at 980 nm. Amplified spontaneous emission was at the level of 0.08 %. The magnitude of the relative intensity noise is –140 dB/Hz at frequencies more than 10 MHz and –100 dB/Hz at the peak of relaxation oscillations. The linewidth of the laser radiation is less than 1 kHz.

Keywords: distributed feedback fiber laser, Er-doped, scheme of laser, relaxation oscillations, RIN, spectral width.

Волоконный лазер с распределенной обратной связью (РОС-лазер) представляет собой отрезок активного волокна длиной несколько сантиметров с записанной специальной структурой показателя преломления – волоконной брэгговской решеткой со сдвигом фазы на полпериода, что позволяет генерировать одну продольную моду [1]. В настоящей работе исследуются волоконные РОС-лазеры, записанные в волокне с сохранением поляризации [2], генерирующие линейно-поляризованное излучение. К основным характеристикам лазерного излучения, помимо прочих, относятся ширина линии генерации и стабильность выходной мощности (относительный шум интенсивности). Одним из физических механизмов, влияющих на стабильность мощности волоконных лазеров, является развитие релаксационных колебаний в активном волокне, приводящих к появлению в спектре шума интенсивности ярко выраженных пиков в килогерцовом диапазоне. Выявлено, что наиболее важным фактором, влияющим на величину релаксационных колебаний, является величина мощности накачки РОС-лазера [3, 4]. Типичная выходная мощность собственно РОС-лазера составляет порядка милливатта. Предусилитель позволяет усилить слабый сигнал задающего лазера до уровня нескольких десятков милливатт.

В данной работе предложена и реализована конфигурация задающего РОС-лазера, объединенного со схемой усилителя оптического сигнала, обеспечивающего максимальный КПД использования накачки при минимизации влияния релаксационных колебаний на выходные параметры излучения.

В эксперименте для определения шумовых характеристик РОС-лазера его излучение направлялось на фотодиод с полосой пропускания до 1 ГГц. Сигнал данного фотодиода подавался на радиочастотный анализатор спектра AGILENT EXA N9010A, измеряющий спектральный состав сигнала. Результат измерения радиочастотного спектра представлен на рис. 1.

Как видно на графике (см. рис. 1, *a*), в спектре шума присутствуют ярко выраженный пик на частоте порядка 300 кГц и его высшие гармоники, связанный с развитием релаксационных колебаний в активном волокне лазера из-за внешних воздействий. Наиболее важным из них является уровень накачки РОС-лазера. При низких уровнях накачки лазер работает нестабильно, вплоть до кратковременного срыва непрерывной генерации, фактически в импульсно-периодическом ре-

жиге. При увеличении уровня накачки интенсивность наблюдаемых колебаний минимизируется (см. рис. 1, б). На основе полученного результата авторами была предложена и реализована схема накачки РОС-лазера и предусилителя (рис. 2).

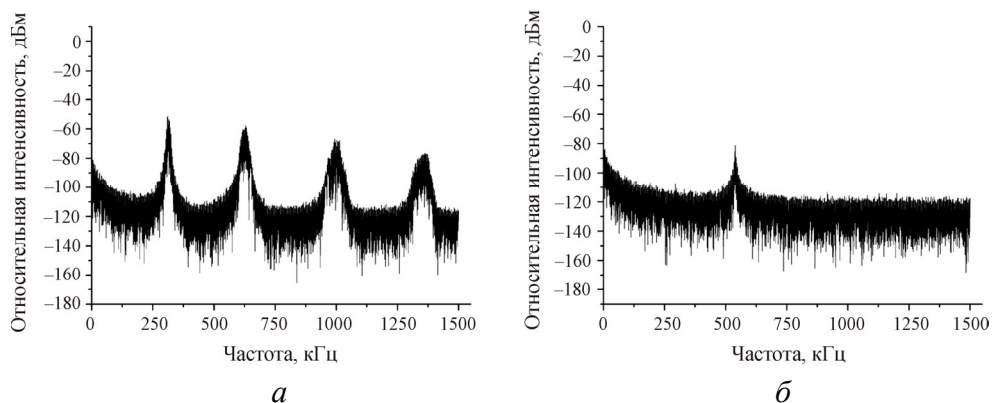


Рис. 1. Спектральный состав шума излучения эрбиевого РОС-лазера, длина волны генерации – 1550 нм: а – при токе накачки 0,5 А (мощность накачки 300 мВт); б – при токе накачки 1 А (мощность накачки 600 мВт)

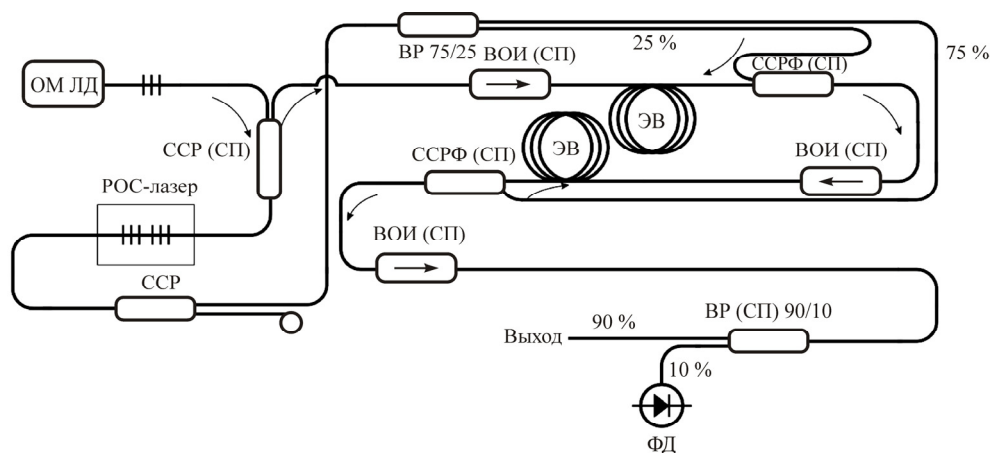


Рис. 2. Схема одночастотного волоконного лазера: ВОИ – волоконно-оптический изолятор (СП – с сохранением поляризации); ВР – волоконный разветвитель; ОМ ЛД – одномодовый лазерный диод; РОС-лазер – лазер с распределенной обратной связью; ССР – спектрально-селективный разветвитель; ССРФ – фильтрующий спектрально-селективный разветвитель; ЭВ – эрбиевое волокно; ФД – фотодиод

Построение данной схемы подразумевает подачу максимального уровня накачки на РОС-лазер, что приводит к его стабильной работе за счет минимизации релаксационных колебаний, а также дальнейшее использование непоглощенного излучения накачки для обеспечения работы предусилителя. Данная конфигурация обеспечила максимальный КПД использования накачки при минимизации влияния релаксационных колебаний на выходные параметры излучения. Получено одностотное излучение волоконного эрбиевого лазера (длина волны генерации – 1550 нм) мощностью до 30 мВт при уровне накачки 600 мВт. Величина относительного шума интенсивности находится на уровне –140 дБ/Гц на частотах более 10 МГц и –100 дБ/Гц на пике релаксационных колебаний. Относительная величина усиленного спонтанного излучения – 0,08 %.

Одной из важных характеристик разрабатываемого лазера является узкая ширина линии генерации. Ожидаемые ширины линий генерации составляют малую величину, вплоть до нескольких герц, для эрбиевых лазеров [5]. Для измерения ширины спектра генерации в настоящей работе используется гетеродинная схема измерений. В данном методе используются два практически идентичных РОС-лазера, отстройка частот генерации которых не превышает нескольких сотен мегагерц. Излучение данных лазеров совмещается с помощью волоконного объединителя и направляется на фотодиод с шириной полосы пропускания до гигагерца. Сигнал данного фотодиода подается на радиочастотный анализатор спектра AGILENT EXA N9010A. В радиочастотном спектре присутствует пик, возникающий за счет биений частот двух лазеров. Ширина данного пика характеризует измеряемую ширину линии генерации лазера. Стоит отметить, что за счет внешних воздействий отстройка частот лазеров может меняться, соответственно этому меняется и положение пика биений, что затрудняет выполнение измерений с максимально возможной разрешающей способностью. На рис. 3 представлен измеренный спектр биений двух эрбиевых РОС-лазеров.

Как видно на рис. 3, зарегистрированная ширина пика биений составляет порядка одного килогерца, что соответствует установленному разрешению регистрирующего прибора. Соответственно, измеряемая ширина линии генерации меньше данного значения.

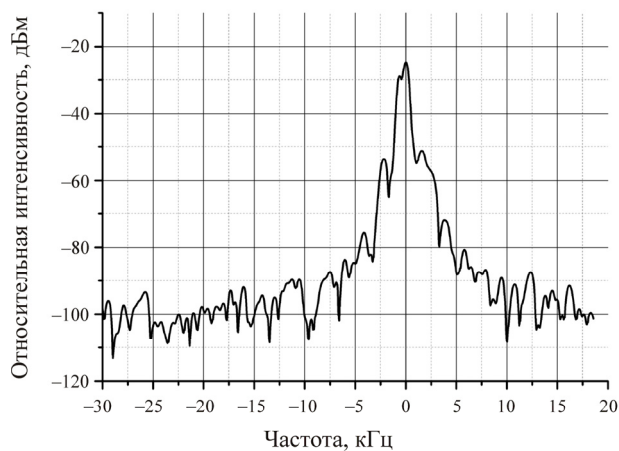


Рис. 3. Спектр биений двух эрбиевых РОС-лазеров (длина волны генерации – 1550 нм)

Таким образом, разработана схема накачки задающего РОС-лазера и усилителя оптического сигнала, обеспечивающая эффективное подавление уровня релаксационных колебаний и обеспечивающая максимальный КПД использования накачки. Экспериментальные исследования выходных параметров одночастотного волоконного эрбиевого лазера показали, что в предложенной схеме обеспечивается стабильная генерация узкополосного излучения (<1 кГц).

На основе полученных результатов был создан прототип модуля одночастотного лазера мощностью 30 мВт. Габариты модуля составляют $222 \times 119 \times 24$ мм³, а выходные характеристики не уступают зарубежным аналогам (NKT Photonics, NP Photonics).

Список литературы

1. Er³⁺:Yb³⁺-codoped fiber distributed-feedback laser / J.T. Kringlebotn, J.L. Archambault, L. Reekie, D.N. Payne // Opt. Lett. – 1994. – Vol. 19, № 24. – P. 2101–2103.
2. Vlasov A.A., Churin D.E., Babin S.A. The features of characterization of the fiber Bragg gratings with phase shift for the distributed-feedback lasers written in the polarization-maintaining Ytterbium-doped fiber // Laser Physics. – 2010. – Vol. 20, № 12. – P. 2045–2049.
3. Foster S. Dynamical noise in single-mode distributed feedback fiber lasers // IEEE J. Quantum Electron. – 2004. – Vol. 40, № 9. – P. 1283–1293.

4. The relative intensity noise and relaxation oscillation characteristics of a distributed-feedback fiber laser / P.P. Wang, J. Chang [et al.] // *Laser Physics*. – 2013. – Vol. 23, № 9. – P. 1–5.

5. Cliché J.-F., Allard M., Tetu M. Ultra-narrow linewidth and high frequency stability laser sources // *Optical Amplifiers and Their Applications/Coherent Optical Technologies and Applications (OAA/COTA 2006)*, Whistler, Canada, 25–30 June, 2006. – Optical Society of America, 2006. – Paper CFC5.

References

1. Er³⁺:Yb³⁺-codoped fiber distributed-feedback laser / J.T. Kringlebotn, J.L. Archambault, L. Reekie, D. N. Payne // *Opt. Lett.* 1994. Vol. 19. No. 24. P. 2101-2103.

2. The features of characterization of the fiber Bragg gratings with phase shift for the distributed-feedback lasers written in the polarization-maintaining Ytterbium-doped fiber / A.A. Vlasov, D.E. Churin, S.A. Babin // *Laser Physics*. 2010. Vol. 20, No. 12. P. 2045-2049.

3. Dynamical noise in single-mode distributed feedback fiber lasers / S. Foster // *IEEE J. Quantum Electron.* 2004. Vol. 40, No. 9. P. 1283-1293.

4. The relative intensity noise and relaxation oscillation characteristics of a distributed-feedback fiber laser / P.P. Wang, J. Chang et al. // *Laser Physics* – 2013. Vol. 23, No. 9. P. 1-5.

5. Ultra-narrow linewidth and high frequency stability laser sources / J.-F. Cliche, M. Allard, M. Tetu // *Optical Amplifiers and Their Applications / Coherent Optical Technologies and Applications (OAA/COTA 2006)*, 25–30 Jun., 2006, Whistler, Canada. Technical Digest (CD). Optical Society of America, 2006. Paper CFC5.

Получено 20.03.2017