



Высокочастотная гармоническая синхронизация мод в волоконном кольцевом лазере со сдвигом частоты при помощи акустооптического модулятора

П. А. Итрин¹, Д. И. Семенов¹, А. Б. Петров²,
М. С. Козляков², В. А. Рибенек¹

¹ Ульяновский государственный университет,
Ульяновск, Россия

² ООО «Нордлэйз», г. Санкт-Петербург, Россия

Продемонстрирована возможность создания солитонного кольцевого лазера с гибридной гармонической синхронизацией мод, обеспечивающего генерацию мульти-ГГц импульсной последовательности в сочетании с высоким уровнем подавления межмодового шума и малым временным джиттером. Синхронизация мод осуществлена на основе эффекта внутрирезонаторного сдвига частоты. В основе разработки лежит предположение о том, что в определенных условиях акустооптический сдвиг частоты, дополненный спектральной фильтрацией, может приводить к стабилизации и повышению качества высокочастотной импульсной последовательности.

Ключевые слова: волоконный кольцевой лазер, синхронизация мод, акустооптический модулятор, генерация ультракоротких импульсов, временной джиттер

Статья получена: 20.04.2023

Статья принята: 05.05.2023

High-frequency Harmonic Mode Locking in a Frequency-Shifted Fiber Ring Laser With an Acousto-Optic Modulator

P. A. Itrin¹, D. I. Sementsov¹, A. B. Petrov², M. A. Kozlyakov²,
V. A. Ribenek¹

¹ Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

² Nordlase Ltd., Saint-Petersburg, Russia

The possible development of a soliton ring laser with the hybrid harmonic mode locking that provides the generation of a multi-GHz pulse sequence in combination with a high level of supermode noise suppression and low time jitter, is demonstrated. The mode locking is based on the effect of intracavity frequency shift. The development is based on the assumption that, under certain conditions, an acousto-optic frequency shift, supplemented by the spectral filtration, can lead to stabilization and an increase in the quality of a high-frequency pulse sequence.

Keywords: fiber ring laser, mode locking, acousto-optic modulator, ultrashort pulse generation, time jitter

Article received on: 20.04.2023

Article accepted on: 05.05.2023

INTRODUCTION

It is well-known that the laser sources of high-frequency pulse sequences are required in a wide range of applications of modern photonics, in particular, in the problems of optical communications, spectroscopy, metrology, etc. [1, 2]. One of the most popular designs of such sources in recent decades are the soliton fiber lasers with harmonic mode locking (HML), in the cavity of which many pulses are located periodically [3]. This approach to the implementation of high-frequency pulse generators combines the pos-

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что лазерные источники высокочастотных импульсных последовательностей необходимы в широком ряду приложений современной фотоники, в частности в задачах оптической связи, спектроскопии, метрологии и т.д. [1, 2]. Одним из наиболее востребованных в последние десятилетия вариантов исполнения подобных источников являются солитонные волоконные лазеры с гармонической синхронизацией мод (ГСМ), в резонаторе которых множество импульсов располагается периодически [3]. Этот подход к реализации высокочастотных импульсных генераторов соединяет возможность достижения мульти-ГГц частоты следования импульсов с принципиальными преимуществами волоконных лазеров: компактностью, совместимой с высоким (до 30 дБ и выше) коэффициентом усиления, высоким качеством выходного пучка, гибким волоконным выводом, надежностью и простотой в эксплуатации [4].

Существует несколько вариантов классификации волоконных лазеров с ГСМ. Наиболее очевидный в качестве основного признака использует способ достижения синхронизации мод – при помощи нелинейного вращения поляризации (НВП) [5, 6] либо специальных насыщающихся поглотителей на основе углеродных нанотрубок, графена и т.п. [7, 8]. По способу имплементации ГСМ-источники могут быть разделены на две большие группы. В первой из них ГСМ происходит за счет встраивания в резонатор дополнительного высокодобротного фильтра со свободным спектральным параметром, кратным свободному спектральному параметру основного резонатора [9], причем селективность этого фильтра должна быть достаточной для выделения отдельных мод резонатора [10, 11]. Лазеры второй группы привлекательны тем, что необходимое периодическое расположение импульсов достигается в них автоматически за счет взаимного отталкивания [12]. Механизм взаимодействия импульсов в каждом конкретном случае не всегда очевиден, в таком качестве могут выступать взаимодействие через насыщающиеся и релаксирующие диссипативные параметры [13, 14], взаимодействие посредством дисперсионных волн или непрерывной компоненты [15], через акустические волны, посредством электрострикции [16] и т.д. Общим свойством всех указанных взаимодействий является их весьма небольшая интенсивность, во многих случаях лишь немного превышающая уровень шумовых воздействий (связанных, например, с шумами в активной среде, тепловыми эффектами, вибрациями и т.п.) на импульсы. Эти шумовые воздействия

способны обеспечить достижение мульти-ГГц частоты следования импульсов с фундаментальными преимуществами волоконных лазеров, а именно компактностью, совместимой с высоким (до 30 дБ и выше) коэффициентом усиления, высоким качеством выходного пучка, гибким волоконным выводом, надежностью и простотой в эксплуатации [4].

Существует несколько вариантов классификации волоконных лазеров с ГСМ. Наиболее очевидный в качестве основного признака использует способ достижения синхронизации мод – при помощи нелинейного вращения поляризации (НВП) [5, 6] либо специальных насыщающихся поглотителей на основе углеродных нанотрубок, графена, и т.п. [7, 8]. По способу имплементации ГСМ-источники могут быть разделены на две большие группы. В первой из них, ГСМ происходит за счет встраивания в резонатор дополнительного высокодобротного фильтра со свободным спектральным параметром, кратным свободному спектральному параметру основного резонатора [9], причем селективность этого фильтра должна быть достаточной для выделения отдельных мод резонатора [10, 11]. Лазеры второй группы отличаются тем, что требуемое периодическое расположение импульсов достигается автоматически за счет взаимного отталкивания [12]. Механизм взаимодействия импульсов в каждом конкретном случае не всегда очевиден; это может быть взаимодействие через насыщающиеся и релаксирующие диссипативные параметры [13, 14], взаимодействие через дисперсионные волны или непрерывную компоненту [15], через акустические волны, через электростриксию [16], и т.д. А общим свойством всех этих взаимодействий является их очень низкая интенсивность, во многих случаях лишь слегка превышающая уровень шумового воздействия (например, связанного с шумами в активной среде, тепловыми эффектами, вибрациями, и т.д.) на импульсы. Эти шумовые воздействия вызывают флуктуации в положении импульсов, а именно время джиттера, и его значение намного выше, чем у лазеров, работающих на основной частоте [17]. Сокращение времени джиттера и улучшение стабильности импульсных последовательностей, генерируемых лазерами с ГСМ, значительно повысит их привлекательность в приложениях, в частности, в задачах генерации спектров гребенки, что особенно важно в настоящее время.

В последнее время, лазеры с гибридной гармонической синхронизацией мод, где эффект насыщающегося поглощения сопровождается сдвигом частоты, выполняемым оптическим модулятором [18–20], вызывают большой интерес, поскольку частота модулятора намного ниже частоты повторения импульсов, т.е., не активная, а пассивная синхронизация с частотным сдвигом импульса солитона. Результаты показывают, что этот подход имеет не только локальный эффект, приводящий к генерации одиночного импульса, но также влияет на всю импульсную последовательность, изменяя интервалы

вызывают флуктуации положения импульса – временной джиттер, причем его величина существенно выше, чем у лазеров, оперирующих на фундаментальной частоте [17]. Снижение временного джиттера и повышение стабильности импульсных последовательностей, генерируемых ГСМ-лазерами, значительно повысит их привлекательность в приложениях, в частности в особо важных в настоящий момент задачах генерации гребенчатого спектра.

Значительный интерес в последнее время вызывают волоконные лазеры с гибридной гармонической синхронизацией мод, в которых эффект насыщающего поглощения сопровождается сдвигом частоты, осуществляемым при помощи оптического модулятора [18–20], причем частота модулятора значительно ниже частоты следования импульсов, т. е. происходит не активная, а именно пассивная синхронизация мод со сдвигом частоты солитонного импульса. Ряд результатов показывает, что такой подход оказывает не только локальное действие, приводя к формированию отдельного импульса, но и воздействует на всю последовательность импульсов, изменяя интенсивность межимпульсного взаимодействия [21–25]. Эти результаты послужили мотивацией для настоящей работы – разработки солитонного кольцевого лазера с гибридной гармонической синхронизацией мод, использующей эффект внутрирезонаторного сдвига частоты. Опираясь на предположение о том, что в определенных случаях акустооптический сдвиг частоты, дополненный спектральной фильтрацией, может приводить к стабилизации и повышению качества высокочастотной импульсной последовательности, была поставлена задача разработки и демонстрации волоконного лазера с гармонической синхронизацией мод, обеспечивающего генерацию мульти-ГГц импульсной последовательности в сочетании с высоким уровнем подавления межмодового шума и малым временным джиттером.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Рассматриваемая схема волоконного лазера представлена на рис. 1. Кольцевой резонатор включает в себя Er-легированное волокно (EDF – EY-305) с дисперсией $D=+9$ пс/(нм км) длиной 5,75 м, накачиваемого двумя лазерными диодами с максимальной мощностью 550 мВт с длиной волны 1480 нм, через два WDM 1480/1550. Общая длина резонатора составляла $L=64,92$ м, что соответствует фундаментальной частоте повторения 3,19 МГц. Все волоконные элементы выполнены из стандартного волокна SMF-28 ($D=+17$ пс/(нм км) для 1550 нм). Однонаправленный режим распростра-

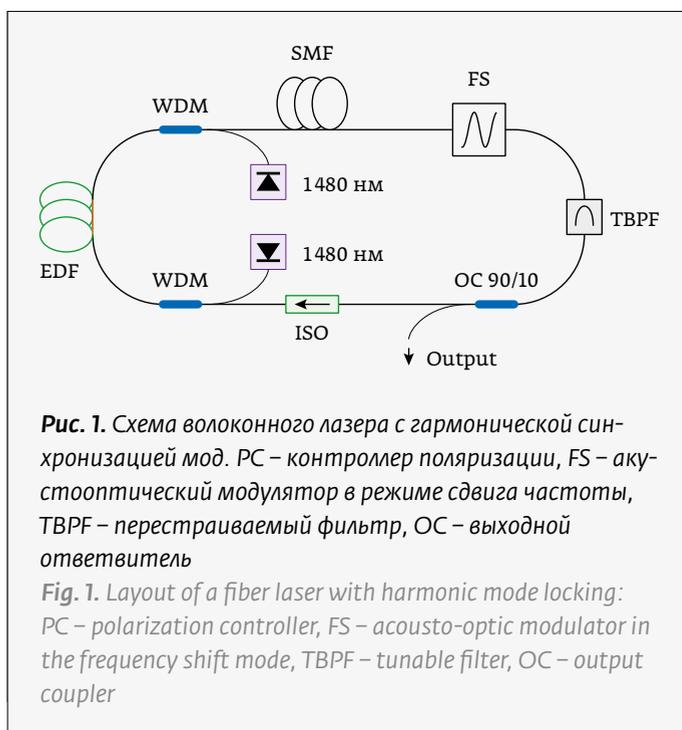


Рис. 1. Схема волоконного лазера с гармонической синхронизацией мод. PC – контроллер поляризации, FS – акустооптический модулятор в режиме сдвига частоты, TBPf – перестраиваемый фильтр, OC – выходной ответвитель

Fig. 1. Layout of a fiber laser with harmonic mode locking: PC – polarization controller, FS – acousto-optic modulator in the frequency shift mode, TBPf – tunable filter, OC – output coupler

interaction intensity [21–25]. These results have motivated the present paper, namely the development of a soliton ring laser with the hybrid harmonic mode locking using the intracavity frequency shift effect. Based on the assumption that, in certain cases, an acousto-optic frequency shift, supplemented by the spectral filtration, can lead to the stabilization and increase in the quality of high-frequency pulse sequence, the task was set to develop and demonstrate a harmonic mode-locked fiber laser capable of generating a multi-GHz pulse sequence in combination with a high level of supermode noise suppression and low time jitter.

EXPERIMENTAL SETUP

The considered layout of the fiber laser is shown in Fig. 1. The ring cavity includes an Er-doped fiber (EDF – EY-305) with a dispersion of $D=+9$ ps/(nm km) and a length of 5.75 m, pumped by two laser diodes with a maximum power of 550 mW at a wavelength of 1480 nm, through two WDM 1480/1550. The total cavity length is $L=64.92$ m that corresponds to a fundamental repetition frequency of 3.19 MHz. All fiber elements are made of standard SMF-28 fiber ($D=+17$ ps/(nm km) for 1550 nm). The unidirectional propagation mode is provided by an optical insulator; a 90/10 coupler is used to output the radiation. The cavity includes an acousto-optic modulator (MT80-IIR30-Fio-SM0) operating in the frequency shift mode $\Delta\nu=80$ MHz. This cavity element is sensitive to the polarization of

нения обеспечивался оптическим изолятором, для вывода излучения использован 90/10 ответвитель. В резонатор включен акустооптический модулятор (MT80-IR30-Fio-SM0), работающий в режиме сдвига частоты $\Delta\nu=80$ МГц. Данный элемент резонатора чувствителен к поляризации излучения – поляризационный коэффициент экстинкции составляет ~ -20 дБ. Также в стандартную схему резонатора кольцевого волоконного лазера включен дополнительный элемент управления – перестраиваемый фильтр OZ Optics (BTF-11-11-1525/1570), позволяющий осуществлять фильтрацию сигнала с перестройкой ширины полосы пропускания и центральной частоты в полосе 1525–1570 нм. В ходе экспериментов ширина фильтра была установлена на значении, близком к минимальному (чуть более 1 нм). Особенностью фильтра является отсутствие чувствительности к поляризации.

Для измерений спектра использовался оптический анализатор спектра Ando AQ6317B, разрешением 0,02 нм. Для индикации ВЧ сигнала использовались анализатор ВЧ-спектра Tektronix RSA607A с фотодетектором на 15 ГГц UPD-15-IR2-FC (для частот следования импульсов до 7,5 ГГц) и 20 ГГц осциллограф Keysight UXR0204A с фотодетектором Keysight на 33 ГГц (для частот следования свыше 7,5 ГГц).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Результаты эксперимента фиксировались в полосе перестройки фильтра от 1528 до 1548 нм. Во всей полосе перестройки синхронизация мод на фундаментальной частоте резонатора (3,19 МГц), соответствующая одноимпульсному режиму генерации, происходила при достижении мощности накачки ~ 200 мВт. При увеличении мощности накачки лазер переходит в многоимпульсный режим генерации с однородным распределением отдельных импульсов по резонатору, т.е. в режим гармонической синхронизации мод.

Рассматриваемый диапазон перестройки может быть разделен на две полосы: коротко- и длинноволновую (рис. 2). В первой (1528–1535 нм) синхронизация мод характеризуется высокой устойчивостью. Синхронизация мод, полученная в этой полосе при помощи подстройки контроллера поляризации на малой частоте следования, сохраняется при повышении уровня накачки. В этом случае частота следования, импульсов, так же, как и выходная мощность, возрастает пропорционально накачке (рис. 3), при этом важно заметить, что дополнительная подстройка поляризации не производится.

Изменения оптических спектров при увеличении накачки и соответствующем росте частоты сле-

radiation, and the polarization extinction coefficient is ~ -20 dB. Moreover, the standard layout of the ring fiber laser resonator includes an additional control element, namely a tunable filter OZ Optics (BTF-11-11-1525/1570) that allows the signal filtration with tuning of the bandwidth and center frequency in the band of 1525–1570 nm. During the experiments, the filter width is set to a value close to the minimum one (slightly more than 1 nm). A feature of the filter is the lack of sensitivity to polarization.

For spectrum measurements, an Ando AQ6317B optical spectrum analyzer with a resolution of 0.02 nm is used. To indicate the RF signal, a Tektronix RSA607A RF spectrum analyzer with a 15 GHz UPD-15-IR2-FC photodetector (for the pulse repetition rates up to 7.5 GHz) and a 20 GHz Keysight UXR0204A oscilloscope with a Keysight 33 GHz photodetector (for the repetition rates over 7.5 GHz) are used.

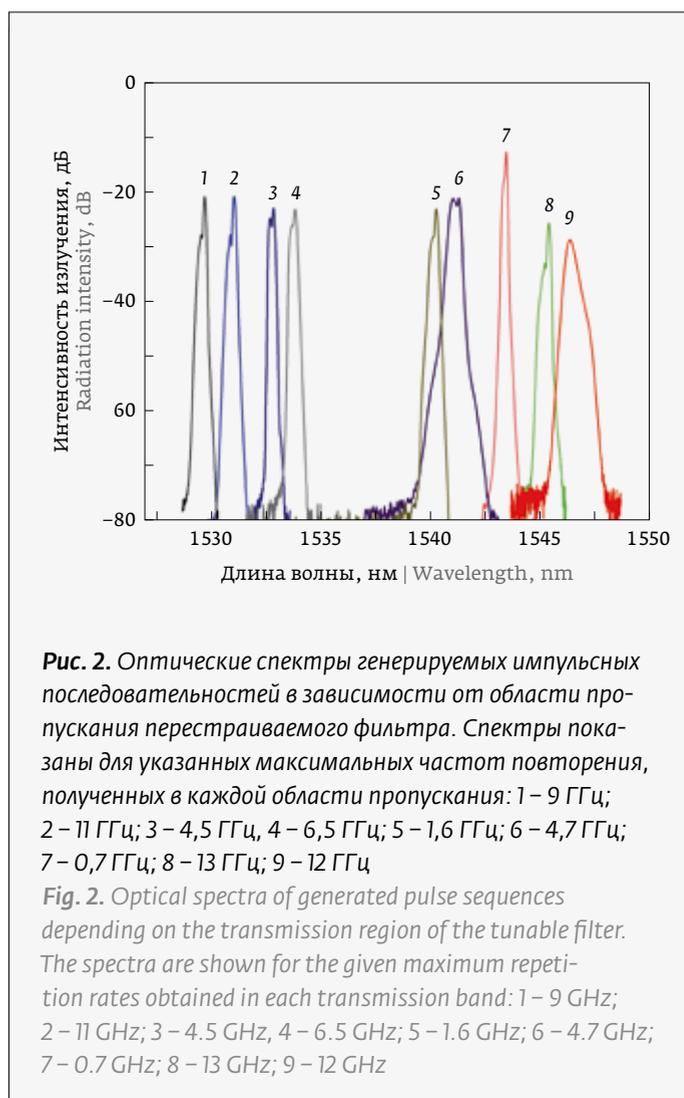
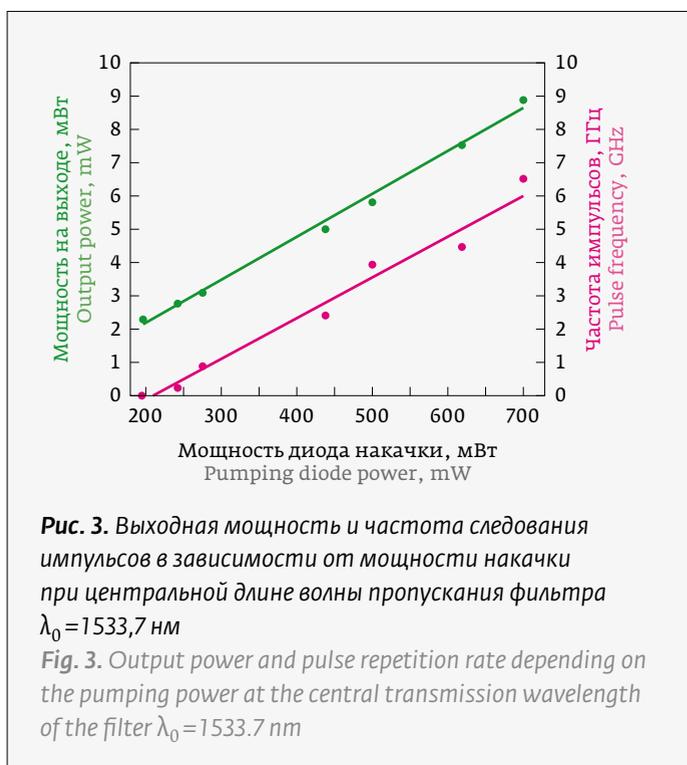


Рис. 2. Оптические спектры генерируемых импульсных последовательностей в зависимости от области пропускания перестраиваемого фильтра. Спектры показаны для указанных максимальных частот повторения, полученных в каждой области пропускания: 1 – 9 ГГц; 2 – 11 ГГц; 3 – 4,5 ГГц, 4 – 6,5 ГГц; 5 – 1,6 ГГц; 6 – 4,7 ГГц; 7 – 0,7 ГГц; 8 – 13 ГГц; 9 – 12 ГГц

Fig. 2. Optical spectra of generated pulse sequences depending on the transmission region of the tunable filter. The spectra are shown for the given maximum repetition rates obtained in each transmission band: 1 – 9 GHz; 2 – 11 GHz; 3 – 4.5 GHz, 4 – 6.5 GHz; 5 – 1.6 GHz; 6 – 4.7 GHz; 7 – 0.7 GHz; 8 – 13 GHz; 9 – 12 GHz



дования для двух различных значений центральной длины волны перестраиваемого фильтра λ_0 показаны на рис. 4.

Устойчивость генерируемых импульсных последовательностей может быть охарактеризована при помощи радиочастотных спектров. На рис. 5 показаны радиочастотные (РЧ) спектры, полученные для последовательности с частотой следования 4,5 ГГц при центральной длине волны пропускания фильтра $\lambda_0 = 1532,7$ нм.

Последовательность имеет достаточно высокий уровень подавления межмодового шума (>35 дБ). На РЧ-спектре высокого разрешения в диапазоне десятков килогерц также можно отметить высокий уровень (>60 дБ) отношения сигнал/шум. Изменение уровня подавления супермодового шума и отношения сигнал/шум при росте накачки и соответственном повышении частоты следования показано на рис. 6. Как можно видеть, во всем диапазоне перестройки шумовые характеристики импульсной последовательности остаются приблизительно на одном уровне, при этом еще раз отмечаем, что при перестройке варьировалась только величина накачки, а дополнительная подстройка поляризации не производилась.

Последовательности, генерируемые в длинноволновой (1535–1548 нм) области перестройки фильтра, в общем случае характеризуются меньшей устойчивостью. При некоторых значениях централь-

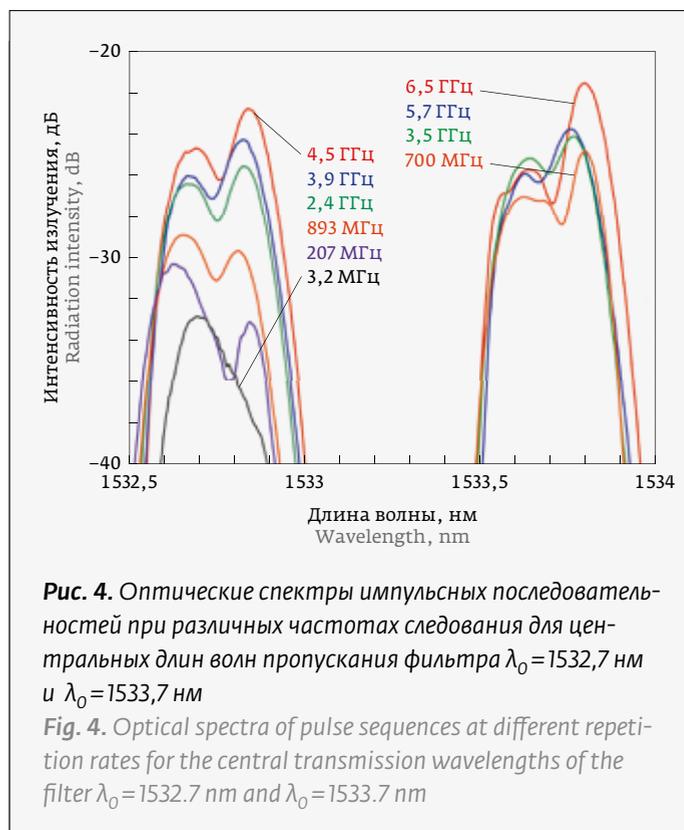
EXPERIMENTAL RESULTS

The experimental results are recorded in the filter tuning band from 1528 to 1548 nm. In the entire tuning band, the mode locking at the fundamental capacity frequency (3.19 MHz) relevant to the single-pulse generation regime, occurs when the pumping power reaches ~200 mW. As the pump power increases, the laser switches to the multipulse generation mode with a uniform distribution of individual pulses over the cavity, i. e. to the harmonic mode locking regime.

The tuning range under consideration can be divided into two bands: short-wave and long-wave (Fig. 2). In the first one (1528–1535 nm), the mode locking is specified by high stability. The mode locking obtained in this band by adjusting the polarization controller at a low repetition rate is retained as the pumping level is increased. In this case, the pulse repetition rate, as well as the output power, are increased proportionally to the pumping (Fig. 3), while it is important to note that no additional polarization adjustment is performed.

Any changes in the optical spectra with an increase in pumping and a relevant growth of the repetition rate for two different values of the central wavelength of the tunable filter λ_0 are shown in Fig. 4.

The stability of the generated pulse sequences can be characterized using the RF spectra. Fig. 5 shows the radio frequency (RF) spectra obtained for the sequence



ной длины волны пропускания удается достичь импульсной генерации с высокой (>1 ГГц) частотой следования (правая часть рис. 4), однако эти режимы не являются устойчивыми по отношению к изменению уровня накачки. В отличие от предыдущего случая на изменение накачки лазер реагирует не подстройкой частоты следования импульсов, а срывом синхронизации мод. Для восстановления генерации импульсной последовательности для каждого уровня накачки необходимо осуществлять дополнительную подстройку поляризации. Тем не менее именно в этом диапазоне перестройки удалось достичь высоких частот следования, превышающих 10 ГГц (рис. 7). На центральной длине волны пропускания фильтра $\lambda_0=1546,5$ нм получена импульсная последовательность с частотой следования 12 ГГц с высоким уровнем подавления межмодового шума >40 дБ. На длине волны пропускания фильтра $\lambda_0=1545,5$ нм была достигнута частота следования 13 ГГц, однако вид РЧ-спектра этой импульсной последовательности и значительно меньший уровень подавления межмодового шума свидетельствуют о ее слабой устойчивости (рис. 7, верхний ряд). Для сравнения на рис. 7 показаны также осциллограмма и РЧ-спектр импульсной последовательности с частотой следования 9 ГГц, полученной в коротковолновой области пропускания фильтра ($\lambda_0=1529$ нм) (рис. 7, нижний ряд).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Важнейшей особенностью рассматриваемого лазера является устойчивая реализация гармонической синхронизации мод в многоимпульсном режиме генерации. Данный факт означает наличие стабильной межимпульсной силы отталкивания, обеспечивающей равномерное распределение импульсов по кольцевому резонатору. Исходя из того, что резонатор обладает существенной аномальной дисперсией, т.е. генерирует импульсы солитонного типа без существенной частотной модуляции, по ширине спектра можно оценить длительность отдельного импульса. Длительность на половине высоты составляет около $\tau_{FWHM} \approx 12,5$ пс, что соответствует длительности sech -импульса $\tau \approx 7$ пс. Таким образом, среднее межимпульсное расстояние для последовательности с частотой следования ~ 10 ГГц многократно превышает длительность импульса. Это исключает прямое межимпульсное взаимодействие из возможных причин отталкивания. Смещение частоты с последующей фильтрацией должно подавлять возможную генерацию узкополосной непрерывной компоненты излучения в резонаторе. Вид оптического спектра подтверждает это предполо-

with a repetition rate of 4.5 GHz at the filter's central transmission wavelength $\lambda_0 = 1532.7$ nm.

The sequence has a fairly high level of supermode noise suppression (>35 dB). In the high-resolution RF spectrum in the range of tens of kHz, a high level (>60 dB) of the signal-to-noise ratio can also be noted. The change in the supermode noise suppression level and the signal-to-noise ratio with the increased pump-

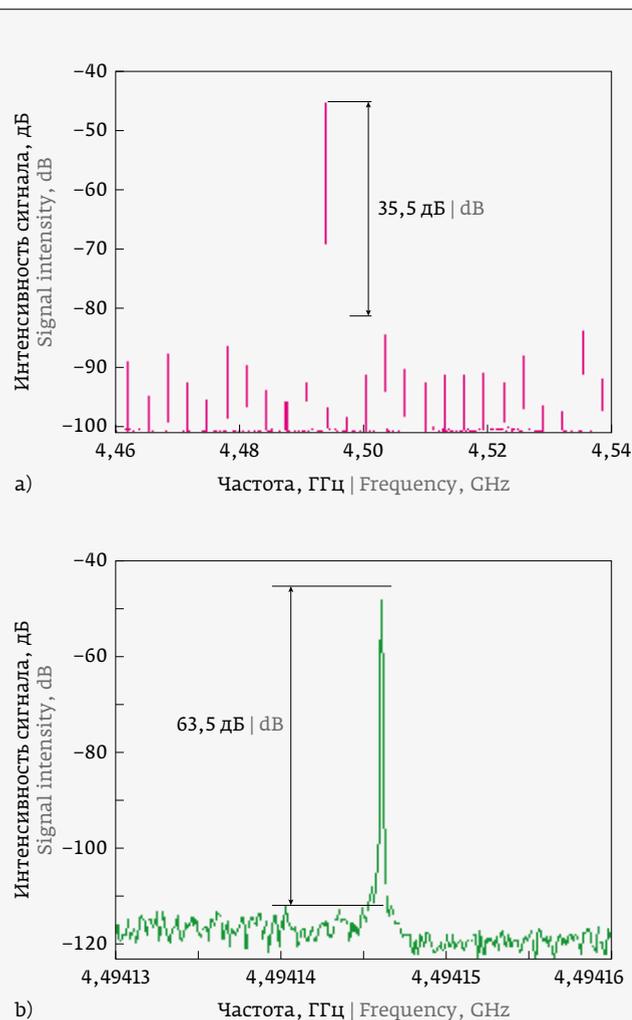


Рис. 5. Характеристики радиочастотного спектра импульсных последовательностей, полученных при центральной длине волны пропускания фильтра $\lambda_0=1532,7$ нм: а) РЧ-спектр последовательности с частотой следования 4.49 ГГц. Разрешение – 1 кГц; б) RF-спектр с разрешением 30 Гц

Fig. 5. Specifications of the radio frequency spectrum of pulse sequences obtained at the central transmission wavelength of the filter $\lambda_0=1532.7$ nm: а) RF spectrum of the sequence with a repetition rate of 4.49 GHz (resolution – 1 kHz); б) RF spectrum with 30 Hz resolution

ложение. Таким образом, из причин отталкивания импульсов может быть исключено и взаимодействие через непрерывную компоненту и дисперсионные волны. В результате наиболее вероятным кандидатом на роль переносчика межимпульсного взаимодействия остается насыщающееся и релаксирующее усиление [8, 9].

По характеру синхронизации мод лазер может быть отнесен к гибриднему типу. Необходимым для синхронизации мод механизмом насыщающегося поглощения может быть как НВП, так и смещение частоты излучения с последующей фильтрацией, которое лежит в основе синхронизации мод так называемых лазеров с частотно-смещенной обратной связью [20, 26]. Анализируя изменение выходной мощности и частоты следования импульсов в коротковолновой области перестройки фильтра (рис. 3), можно прийти к выводу, что рост накачки приводит к генерации дополнительных импульсов, при этом энергия каждого отдельного импульса $E_p = W_{out} / \nu_{rep}$ остается постоянной. В этом случае в достаточно широком диапазоне частот следования ширина спектра импульса изменяется незначительно (рис. 4), что говорит о том, что при изменении накачки основные характеристики импульса (длительность, пиковая мощность) также остаются практически постоянными. Таким образом, можно утверждать, что в данном случае происходит стандартный процесс многосолитонной генерации, где в качестве механизма синхронизации мод выступает НВП [27]. Насыщающееся и релаксирующее усиление при этом обеспечивает взаимное отталкивание импульсов и реализацию гармонической синхронизации мод [28]. Учитывая низкий уровень шума и высокую стабильность последовательности, можно предположить, что сдвиг и фильтрация частоты служат в этом случае дополнительным механизмом стабилизации, обеспечивающим высокий уровень подавления межмодового шума [21]. Необходимым условием подобной стабилизации является малость смещения частоты $\Delta\nu$ по отношению к несущей частоте ν_0 .

Проводя анализ синхронизации мод при смещении фильтра в длинноволновую сторону (1535–1548 нм – спектры 5–9 на рис. 2), мы, в общем случае, отмечаем меньшую устойчивость импульсных последовательностей. Как мы полагаем, это может быть связано с ростом величины отношения $\Delta\nu/\nu_0$. При достижении им некоторого порогового значения диссипативный баланс в системе существенно усложняется. Сдвиг и фильтрация частоты из малого возмущения в схеме НВП, обеспечивающего выравнивание энергий и унификацию

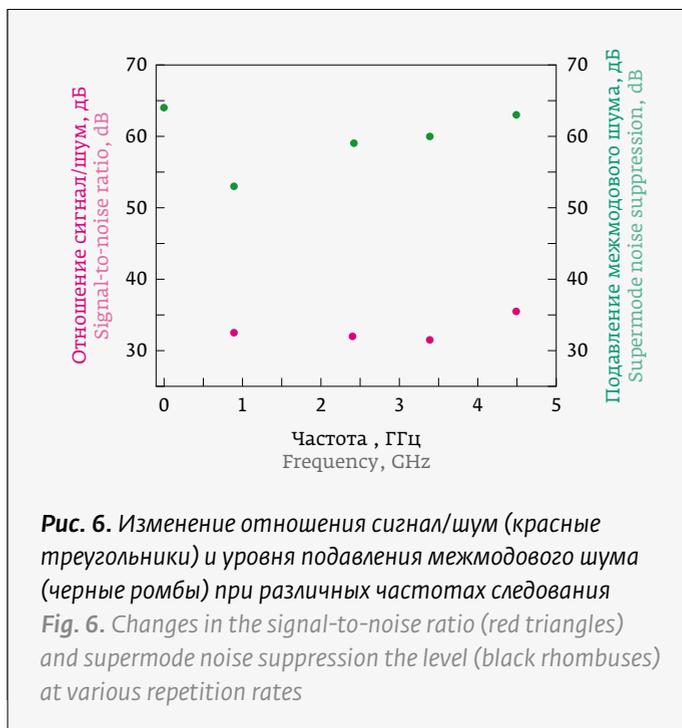
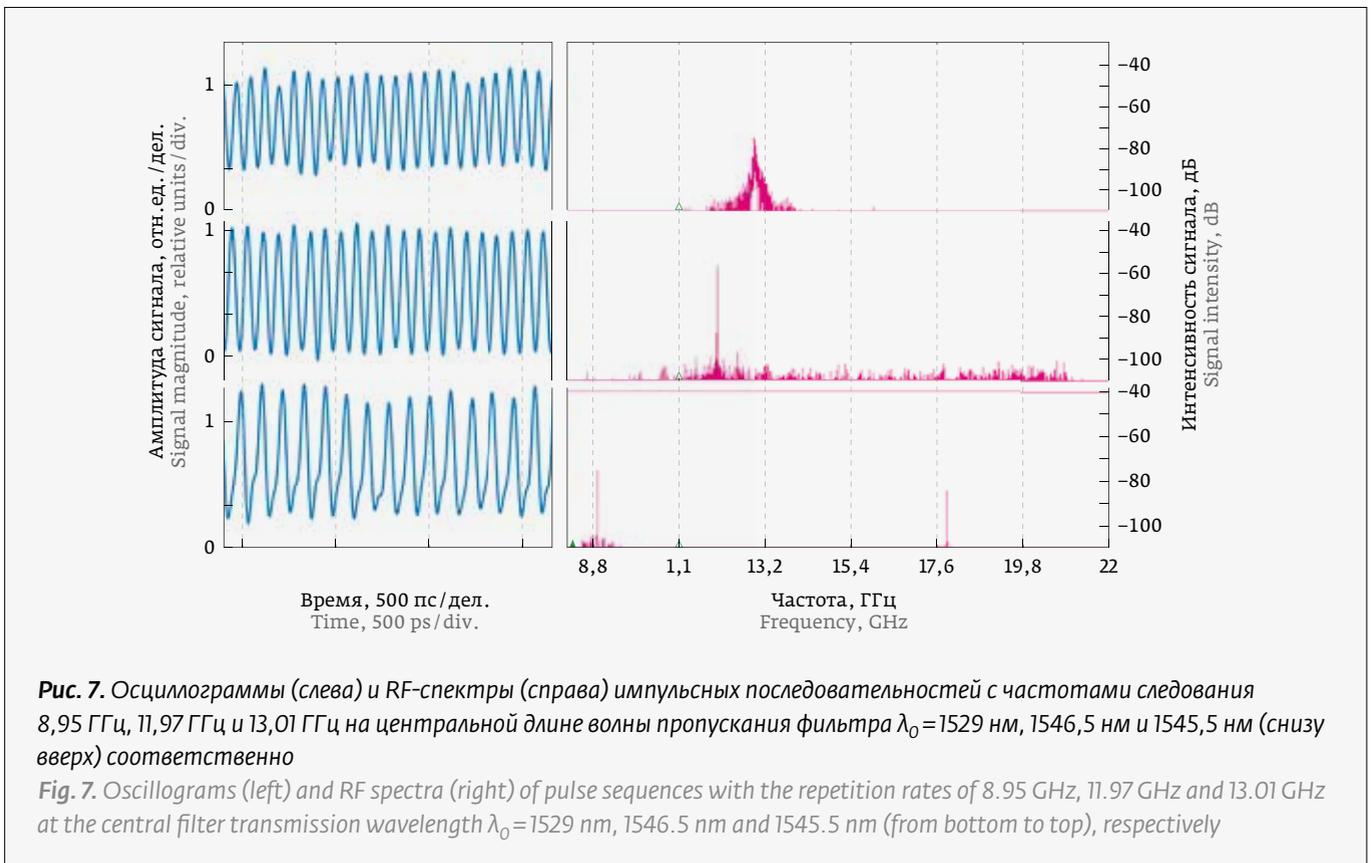


Рис. 6. Изменение отношения сигнал/шум (красные треугольники) и уровня подавления межмодового шума (черные ромбы) при различных частотах следования
Fig. 6. Changes in the signal-to-noise ratio (red triangles) and supermode noise suppression the level (black rhombuses) at various repetition rates

ing and a relevant growth of the repetition rate is shown in Fig.4(b). As can be seen, over the entire tuning range, the noise specifications of the pulse sequence remain approximately at the same level. We should note once again that only the pumping value is varied during tuning, and no additional polarization adjustment is performed.

The sequences generated in the long-wave (1535–1548 nm) region of the filter tuning are generally less stable. For some values of the central transmission wavelength, it is possible to obtain the pulsed oscillation with a high (> 1 GHz) repetition rate (the right part of Fig. 4), however, these regimes are not stable in relation to changes in the pumping level. In contrast to the previous case, the laser reacts to the changes in pumping not by adjustment of the pulse repetition rate, but by failure of the mode locking. To restore the pulse sequence generation for each pumping level, it is necessary to perform an additional polarization adjustment. However, it is in this tuning range where it is possible to achieve the high repetition rates exceeding 10 GHz (Fig. 7). At the central transmission wavelength of the filter $\lambda_0=1546.5$ nm, a pulse sequence with a repetition rate of 12 GHz is obtained with a high level of supermode noise suppression >40 dB. At the filter transmission wavelength $\lambda_0=1545.5$ nm, a repetition rate of 13 GHz is achieved, however, the RF spectrum type of this pulse sequence and a significantly lower level of supermode noise suppression indicate its weak stability (Fig. 7 – top row). For comparison, Fig. 7 also shows the



импульсов [26], становится самостоятельным независимым механизмом синхронизации мод [19]. При различных значениях параметров системы (вариации накачки, ориентации контроллеров поляризации, центральной длины волны фильтра и т.д.) доминирует тот или иной механизм синхронизации мод, обеспечивая генерацию импульсных последовательностей с различными характеристиками (длительностью и энергией отдельного импульса, частотой следования и т.д.). Указанные условия приводят к возможности резких перестроек свойств генерации при переходе из области доминирования одного механизма синхронизации мод к области, где главную роль играет другой механизм, а также к возможным срывам синхронизации мод при некоторых промежуточных значениях параметров. Тем не менее, сохранение режима гармонической синхронизации мод, поддерживаемого насыщающимся и релаксирующим усилением, и стабилизируемого сдвигом частоты, позволяет именно в этой области при определенном уровне накачки и некоторых настройках поляризации достичь частоты следования ~12 ГГц при уровне подавления межмодового шума >40 дБ.

В заключение, отметим, что предположение о том, что акустооптический сдвиг частоты, осу-

осциллограм и RF spectrum of a 9 GHz pulse sequence obtained in the short-wave region of the filter ($\lambda_0 = 1529$ nm) (Fig. 7 – bottom row).

DISCUSSION OF RESULTS AND CONCLUSIONS

The most important feature of the laser under consideration is the stable implementation of harmonic mode locking in the multipulse generation mode. This fact means availability of a stable interpulse repulsive force that ensures a uniform pulse distribution over the ring cavity. Based on the fact that the cavity has a significant abnormal dispersion, i. e. it generates the soliton-type pulses without any significant frequency modulation, the spectrum width can be used to estimate the duration of an individual pulse. The duration at half maximum is about $\tau_{FWHM} \approx 12.5$ ps that corresponds to the sech pulse duration of $\tau \approx 7$ ps. Thus, the average interpulse distance for a sequence with a repetition rate of ~1-10 GHz is many times greater than the pulse duration. It excludes the direct interpulse interaction from the possible repulsion causes. The frequency shift followed by filtration should suppress the possible generation of a narrow-band continuous component of the cavity radiation. The optical spectrum type confirms this assumption. Thus, the interaction through the



ществляемый в резонаторе кольцевого волоконного лазера совместно со спектральной фильтрацией, может приводить к стабилизации и повышению качества высокочастотной импульсной последовательности, экспериментально подтверждено. В частности, результаты эксперимента показывают, что предложенная схема перспективна для генерации стабильных (с низким уровнем межмодового шума) высокочастотных последовательностей импульсов с широкими возможностями перестройки частоты следования и локальной подстройки длины волны. Применение перестраиваемого фильтра с небольшой (~1 нм) полосой пропускания позволяет осуществлять гармоническую синхронизацию мод с частотой следования 10 ГГц и более, при этом генерация непрерывной компоненты и дисперсионных волн оказывается полностью подавленной. К недостаткам метода можно отнести сравнительно большую длительность (~10 пс) и малую энергию (~1,5 пДж) генерируемых импульсов, однако предложенный источник легко может быть включен в каскадные усилительные схемы, на порядки повышающие энергию импульсов [22, 29].

БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа поддержана Российским научным фондом (грант 23-79-30017).

REFERENCES

1. Haus H.A., & Wong W.S. Solitons in optical communications. *Reviews of modern physics*. 1996;68(2): 423.
2. Schliesser A., Picqué N., Hänsch T.W. Mid-infrared frequency combs. *Nature Photonics*. 2012;6: 440–449.
3. Fermann M. E., & Hartl I. Ultrafast fibre lasers. *Nature photonics*. 2013;7(11): 868.
4. Chernysheva M., Rozhin A., Fedotov Y., Mou C., Arif R., Kobtsev S. M., & Turitsyn S. Carbon nanotubes for ultrafast fibre lasers. *Nanophotonics*. 2017;6(1): 1–30.
5. Lecaplain C. & Grelu P. Multi-gigahertz repetition-rate-selectable passive harmonic mode locking of a fiber laser. *Optics express*. 2013;21(9):10897–10902.
6. Trikshev A. I., Kamylin V. A., Tsvetkov V. B., & Itrin P. A. Passive harmonic mode-locking in an erbium-doped fibre laser. *Quantum Electronics*. 2018; 48(12):1109.
7. Huang Q., Huang Z., Al Araimi M., Rozhin A. & Mou C. 2.4 GHz L-band passively harmonic mode locked Er-doped fiber laser based on carbon nanotubes film. *IEEE Photonics Technology Letters*. 2019.
8. Sobon G., Sotor J., & Abramski K. M. Passive harmonic mode-locking in Er-doped fiber laser based on graphene saturable absorber with repetition rates scalable to 2.22 GHz. *Applied Physics Letters*. 2012; 100(16): 161109.
9. Fodil R. S., Amrani F., Yang C., Kellou A. & Grelu P. Adjustable high-repetition-rate pulse trains in a passively-mode-locked fiber laser. *Physical Review A*. 2016; 94(1): 013813.
10. Mao D., Liu X., Sun Z., Lu H., Han D., Wang G. & Wang F. Flexible high-repetition-rate ultrafast fiber laser. *Scientific reports*. 2013;3:3223.
11. Korobko D. A., Fotiadi A. A. & Zolotovskii I. O. Mode-locking evolution in ring fiber lasers with tunable repetition rate. *Optics express*. 2017; 25(18): 21180–21190.
12. Grudinin A. B. & Gray S. Passive harmonic mode locking in soliton fiber lasers. *JOSA B*. 1997;14(1): 144–154.
13. Liu X. & Pang M. Revealing the Buildup Dynamics of Harmonic Mode-Locking States in Ultrafast Lasers. *Laser & Photonics Reviews*. 2019;13(9), 1800333.
14. Korobko D. A., Okhotnikov O. G., Zolotovskii I. O. Long-range soliton interactions through gain-absorption depletion and recovery. *Optics letters*. 2015; 40(12): 2862–2865.
15. Semaan G., Komarov A., Salhi M. & Sanchez F. Study of a harmonic mode lock stability under external continuous-wave injection. *Optics Communications*. 2017; 387:65–69.
16. Dianov E. M., Luchnikov A. V., Pilipetskii A. N., & Starodumov A. N. (1990).

continuous component and dispersive waves can also be excluded from the causes of pulse repulsion. As a result, the saturable and relaxing amplification remains the most probable candidate for the role of the interpulse interaction carrier [8, 9].

In terms of the mode locking type, the laser can be referred to the hybrid type. The saturable absorption mechanism required for mode locking can be either HML or shifting the radiation frequency followed by the filtration that underlies the mode locking of so-called frequency-shifted feedback lasers [20, 26]. While analyzing any changes in the output power and pulse repetition rate in the short-wave region of the filter tuning (Fig. 3), it is possible to conclude that an increase in pumping leads to the generation of additional pulses, while the energy of each individual pulse $E_p = W_{out} / \nu_{rep}$ remains constant. In this case, in a fairly wide repetition frequency range, the pulse spectrum width is changed insignificantly (Fig. 4) indicating that the main pulse specifications (duration, peak power) also remain almost constant with any changes in pumping. Thus, it can be argued that in this case, a standard multisoliton generation process is developed, where the HML is used as a mode locking mechanism [27]. In this case, the saturable and relaxing amplification ensures the mutual pulse repulsion and implementation of harmonic mode locking [28]. Having considered the low noise level and high sequence stability, it can be assumed that in this case the frequency shift and filtration are applied as an additional stabilization mechanism that provides a high level of supermode noise suppression [21]. A necessary condition for such stabilization is the low frequency shift $\Delta\nu$ in relation to the carrier frequency ν_0 .

While analyzing the mode locking when the filter is shifted to the long-wave side (1535–1548 nm – spectra No.5–9 in Fig. 2), in the general case, it is possible to note the lower stability of the pulse sequences. We believe that this may be due to an increase in the ratio $\Delta\nu/\nu_0$. When it reaches a certain threshold value, the dissipative balance in the system becomes much more complicated. The frequency shift and filtration from a small perturbation in the HML scheme that provides energy equalization and pulse unification [26], becomes an independent mode locking mechanism [19]. For various values of the system parameters (pumping variations, polarization controller orientations, central filter wavelength, etc.), one mode locking mechanism or another is dominated, providing the generation of pulse sequences with various specifications (duration and energy of an individual pulse, repetition rate, etc.). These conditions lead to the possible sudden rearrangements of the generation properties upon transition from the region dominated by one mode-locking mechanism to the region where another



ИЛИСТ
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

СЕМЕЙСТВО РОБОТИЗИРОВАННЫХ УСТАНОВОК ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ «ИЛИСТ»



ИЛИСТ-M



ИЛИСТ-L



ИЛИСТ-XL



ИЛИСТ-2XL



РОБОТИЗИРОВАННАЯ УСТАНОВКА ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ «ИЛИСТ-2XL»

- размер выращиваемого изделия до – $\varnothing 2200$ мм, h – 1000 мм
- максимальный вес изделия – 8000 кг
- два волоконных лазера мощностью 2 кВт
- два робота Fanuc M20iB/25
- производительность – до 250 см³/ч
- контролируемая атмосфера чистого аргона – 20 м³
- тринадцать синхронно управляемых осей
- порошок питатель на четыре колбы
- набор сопел подачи порошка с быстрой заменой
- вакуумируемый шлюз

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ:

- нержавеющие и высокопрочные стали
- жаропрочные никелевые сплавы
- титановые сплавы
- сплавы на основе кобальта и меди

Проводим теоретическую и практическую переподготовку персонала промышленных предприятий для работы на аддитивных установках прямого лазерного выращивания.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ МОРСКОЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНСТИТУТ ЛАЗЕРНЫХ И СВАРОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Санкт-Петербург, пр. Маршала Жукова, 38-а

Тел. +7 (812) 757-22-22, e-mail: ilwt@ilwt.smtu.ru www.smtu.ru www.ilwt-stu.ru





- Electrostriction mechanism of soliton interaction in optical fibers. *Optics letters*. 1990; 15(6), 314–316.
17. Gray S., Grudinin A. B., Loh W. H. & Payne D. N. Femtosecond harmonically mode-locked fiber laser with time jitter below 1 ps. *Optics letters*. 1995; 20(2):189–191.
 18. Noronen T., Okhotnikov O., & Gumenyuk R. Electronically tunable thulium-holmium mode-locked fiber laser for the 1700–1800 nm wavelength band. *Optics express*. 2016; 24(13): 14703–14708.
 19. Sousa J. M. & Okhotnikov O. G. Short pulse generation and control in Er-doped frequency-shifted-feedback fibre lasers. *Optics communications*. 2000;183(1–4): 227–241.
 20. Gumenyuk R., Korobko D. A., Zolotovskiy I. O. & Okhotnikov O. G. Role of cavity dispersion on soliton grouping in a fiber lasers. *Optics express*. 2014;22(2): 1896–1905.
 21. Gumenyuk R. V., Korobko D. A. & Zolotovskii I. O. Stabilization of passive harmonic mode locking in a fiber ring laser. *Optics Letters*. 2020; 45(1):184–187.
 22. Kotov L., Likhachev M., Bubnov M., Medvedkov O., Lipatov D., Guryanov A. & Février S. Millijoule pulse energy 100-nanosecond Er-doped fiber laser. *Optics Letters*. 2015; 40(7): 1189–1192.
 23. Korobko D. A., Stoliarov D., Itrin P., Odnoblyudov M. A., Petrov A. A. & Gumenyuk R. Harmonic mode-locking fiber ring laser with a pulse repetition rate up to 12 GHz. *Optics and Laser Technology*. 2021;133: 106526.
 24. Korobko D. A., Stoliarov D., Itrin P., Ribenek V. A., Odnoblyudov M. A., Petrov A. & Gumenyuk R. Stabilization of a Harmonic Mode-Locking by Shifting the Carrier Frequency. *Journal of Lightwave Technology*. 2021;39(9): 2980–2987.
 25. Korobko D. A., Stoliarov D. A., Itrin P., Ribenek V. A., Fotiadi A. A. & Gumenyuk R. Stable harmonic mode locking in soliton fiber laser with frequency shift: theory and experiment. In *Nonlinear Optics and Applications XII*. 2021.
 26. Wabnitz S., Kodama Y. & Aceves A. B. Control of optical soliton interactions. *Optical Fiber Technology*. 1995;1(3):187–217.
 27. Tang D. Y., Zhao L. M., Zhao B., & Liu A. Q. Mechanism of multisoliton formation and soliton energy quantization in passively mode-locked fiber lasers. *Physical Review A*. 2005; 72(4): 043816.
 28. Kutz J. N., Collings B. C., Bergman K., Knox H. Stabilized pulse spacing in soliton lasers due to gain depletion and recovery. *IEEE Journal of Quantum Electronics*. 1998; 34(9): 1749–1757.
 29. Stolyarov D. A., Korobko D. A., Zolotovskii I. O., & Sysolyatin A. A. A Laser Complex with a Central Wavelength of 1.55 μm for Generation of Pulses with Energy Exceeding 1 μJ and a Supercontinuum Spanning a Nearly Two-Octave Range. *Optics and Spectroscopy*. 2019;126(6): 638–644.

АВТОРЫ

Итрин Павел Аркадьевич, младший научный сотрудник, e-mail: itrin@mail.ru, аспирант, Лаборатория нелинейной и микроволновой фотоники НИТИ им. С. П. Капицы, Ульяновский государственный университет (УлГУ), Ульяновск, Россия.

ORCID: 0000-0002-7198-0646

Семенцов Дмитрий Игоревич, д. ф. - м. н., профессор, Ульяновский государственный университет, Ульяновск, Россия.

ORCID: 0000-0001-6760-0156

Петров Андрей Борисович, к. т. н., инженер, e-mail: a.petrov@nordlase.ru, ООО «Нордлэйз», г. Санкт-Петербург, Россия.

ORCID: 0000-0001-9219-1040

Козляков Михаил Сергеевич, инженер, e-mail: m.kozliakov@nordlase.ru, ООО «Нордлэйз», г. Санкт-Петербург, Россия.

ORCID: 0000-0003-2616-4532

Рибенек Валерия Александровна, младший научный сотрудник, аспирант, Лаборатория нелинейной и микроволновой фотоники НИТИ им. С. П. Капицы, Ульяновский государственный университет (УлГУ), Ульяновск, Россия.

ORCID: 0000-0002-9233-5339

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Все авторы приняли участие в подготовке рукописи в своей части, обсуждении результатов, внесении предложений.

mechanism plays the main role, as well as to possible mode locking failures at some intermediate parameter values. However, maintenance of the harmonic mode locking supported by the saturable and relaxing gains and stabilized by a frequency shift, allows in this region at a certain pumping level and certain polarization settings to achieve a repetition rate of ~12 GHz with a supermode noise suppression level of >40 dB.

In conclusion, it should be noted that the acousto-optical frequency shift implemented in the cavity of a ring fiber laser together with the spectral filtration can lead to the stabilization and increase in the quality of a high-frequency pulse sequence, and this assumption has been experimentally confirmed. In particular, the experimental results show that the proposed layout is promising for generating the stable (with a low supermode noise level) high-frequency pulse sequences with the wide capabilities of repetition frequency tuning and local wavelength tuning. The use of a tunable filter with a narrow (~ 1 nm) band width makes it possible to implement the harmonic mode locking with a repetition rate of 10 GHz or more, while generation of the continuous component and dispersive waves is completely suppressed. The disadvantages of this method include a relatively long duration (~ 10 ps) and low energy (~1.5 pJ) of the generated pulses. However, the proposed source can easily be included in the cascade amplification circuits that increase the pulse energy by orders of magnitude [22, 29].

ACKNOWLEDGEMENT

The paper is supported by the Russian Science Foundation (project No. 23-79-30017).

AUTHORS

Itrin Pavel A., Junior Researcher, e-mail: itrin@mail.ru, Post-graduate student, S. P. Kapitsa Nonlinear and Microwave Photonics Laboratory, Ulyanovsk State University (UISU), Ulyanovsk, Russia

ORCID: 0000-0002-7198-0646

Sementsov Dmitry I., Dr. of Sciences (Phyth.&Math.), Professor, Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia.

ORCID: 0000-0001-6760-0156

Petrov Andrey B., Cand. of Sciences (Engin.), engineer, a.petrov@nordlase.ru, Nordlase LLC, St. Petersburg, Russia.

ORCID: 0000-0001-9219-1040

Kozlyakov Mikhail S., m.kozliakov@nordlase.ru, Nordlase LLC, St. Petersburg, Russia.

ORCID: 0000-0003-2616-4532

Ribenek Valeria A., Junior Researcher, Post-graduate student, S. P. Kapitsa Nonlinear and Microwave Photonics Laboratory, Ulyanovsk State University (UISU), Ulyanovsk, Russia.

ORCID: 0000-0002-9233-5339

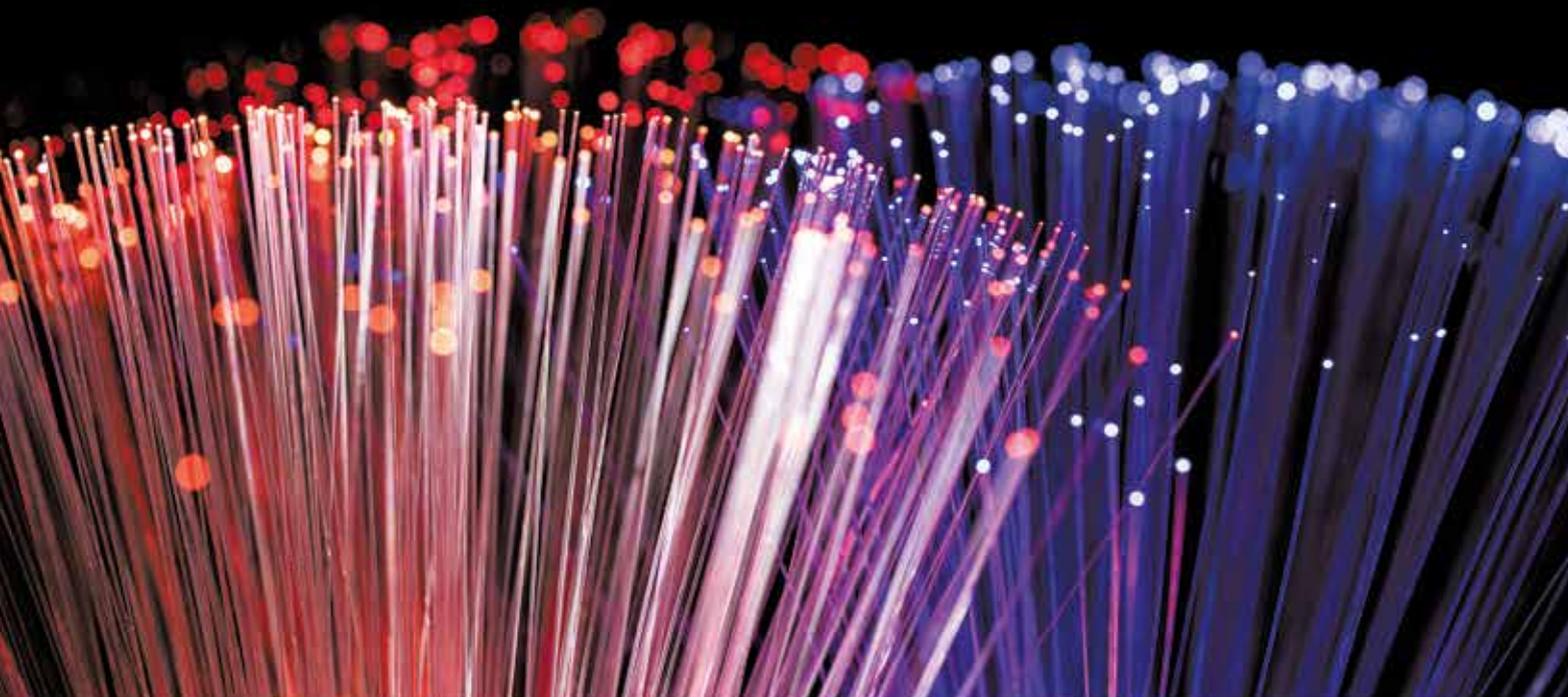
CONFLICT OF INTEREST

The authors declare no conflicts of interest. All the authors took part in the manuscript preparation, each in his own part, discussing the results, making suggestions.

ВСЕРОССИЙСКАЯ ДИАНОВСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВОЛОКОННОЙ ОПТИКЕ

ВКВО-2023

10-13 октября 2023 года
г. Пермь



<https://vkvo.tilda.ws/2023>
vkvo@kvvoperm.ru



Уважаемые участники, оргкомитетом принято решение о снижении на 50% оргвзноса авторам, предоставившим до 31.08.2023 г. расширенную версию доклада в виде статьи в журнал «Прикладная фотоника»: <http://applied.photonics.pstu.ru>

Генеральный спонсор:



Спонсоры:

