00

Гольмиевый волоконный лазер, перестраиваемый по частоте следования импульсов до 3.26 GHz за счет гармонической синхронизации мод

© Э.М. Гафуров[1], С.А. Филатова[1], В.А. Камынин[1], Ю.Г. Гладуш[2], Д.В. Красников[2], А.Г. Насибулин[2], В.Б. Цветков[1]

[1] Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия
[2] Сколковский институт науки и технологий, Москва, Россия

e-mail: eldar.gafurov88@gmail.com

Поступила в редакцию 15.01.2026 г.
В окончательной редакции 28.01.2026 г.
Принята к публикации 03.06.2026 г.

Продемонстрирован полностью волоконный гольмиевый лазер, работающий в режиме пассивной гармонической синхронизации мод, с использованием в резонаторе лазера насыщающегося поглотителя на основе одностенных углеродных нанотрубок и волокна с высоким значением числовой апертуры (UHNA4), что обеспечило смещение суммарной дисперсии резонатора в область нормальных значений. Лазер работал в режиме генерации ультракоротких импульсов на длине волны 2.04 μm с возможностью перестройки частоты следования импульсов от 15.52 до 1071 MHz (от 1-й до 69-й гармоники) за счет изменения уровня мощности накачки. Длительность генерируемых импульсов находилась в диапазоне от 3.9 до 4.8 ps, а энергия импульсов в диапазоне от 12.6 до 16 pJ при фиксированной конфигурации резонатора (без подстройки состояния поляризации). Максимально достигнутое значение частоты следования импульсов 3259 MHz (210-я гармоника) было получено при дополнительной подстройке состояния поляризации, что позволило достичь следующих характеристик: длительность импульсов 3.9 ps, длина волны 2.04 μm и энергия импульсов 11 pJ.

Ключевые слова: гольмиевый волоконный лазер, гармоническая синхронизация мод, ультракороткие импульсы, фазовая самомодуляция, одностенные углеродные нанотрубки, акустооптический эффект, высокая частота следования импульсов.

DOI: 10.61011/OS.2026.08.63711.23-26

Введение

Волоконные лазерные источники ультракоротких импульсов (УКИ) 2 μm спектрального диапазона находят множество применений в области медицины: спектроскопия биологических тканей [1], лазерная абляция [2] и др. В ближнем ИК-диапазоне генерация УКИ с частотой следования импульсов (ЧСИ) от 1 GHz и более остается перспективным направлением для возможного применения в области обработки полимерных материалов [3], а также для воздействия на биологические ткани в режиме абляционного охлаждения [4].

Для увеличения ЧСИ в системах с пассивной синхронизацией мод применяют следующие методы: сокращение длины резонатора, умножители частоты или гармоническую синхронизацию мод (ГСМ) [5–8]. Для сокращения длины резонатора в качестве активной среды зачастую используют волокна на основе альтернативной матрицы стекла с высокой концентрацией активных ионов [9], поскольку в кварцевых волокнах имеется ограничение по уровню легирования для избежания кластеризации активных ионов. Недостатком использования умножителей частоты на основе волоконных ответвителей с коэффициентом деления 50/50 является значительная амплитудная модуляция импульсов и вариация временного интервала между ними, что связано с неточным подбором длины линии задержки и с неточностью коэффициента деления, связанной со спектральной селективностью ответвителей. Метод ГСМ технически менее сложен и позволяет достичь высокочастотных режимов работы благодаря самостабилизации и равномерному распределению импульсов в резонаторе при повышении мощности накачки [10]. В отличие от хорошо изученных тулиевых лазеров [11] гольмиевые лазеры с пассивной ГСМ исследованы недостаточно: в литературе представлены системы с ЧСИ до 603 MHz [12,13], тогда как активная синхронизация мод позволяет достичь 10 GHz, но способствует генерации более длинных импульсов (более 10 ps) [14].

В работе [15] в тулиевом волоконном лазере с синхронизацией мод для повышения частоты следования импульсов до 14.5 GHz за счет гармонической синхронизации мод в резонатор лазера было добавлено волокно с нормальным значением дисперсии (DCF) и высоким нелинейным коэффициентом. Авторы предположили, что эффективный способ генерации высокочастотных

гармоник заключается в снижении порога расщепления солитонов внутри резонатора лазера путем уменьшения суммарной аномальной дисперсии резонатора или путем повышения нелинейности в соответствии с теоремой о площади солитона [15,16].

В настоящей работе был исследован гольмиевый волоконный лазер, работающий в режиме гармонической синхронизации мод. В резонатор лазера было добавлено волокно с высоким значением числовой апертуры (UHNA4) и высоким значением коэффициента нелинейности, а также с положительным значением дисперсии, что способствовало снижению энергетического порога расщепления солитона. Уникальность представленного лазерного источника заключается в рекордном диапазоне перестройки ЧСИ от 15.52 MHz (фундаментальная частота) до 3.26 GHz (210-я гармоника) при длине волны 2.04 μm, длительности импульсов от 3.9 до 4.8 ps и энергии от 11 до 16 pJ.

Экспериментальная установка

В настоящей работе реализован полностью волоконный гольмиевый лазер с пассивной ГСМ на основе реального насыщающегося поглотителя, выполненный по кольцевой схеме, аналогичной описанным в предыдущих исследованиях [17], с добавлением волокна с высоким значением числовой апертуры. Кольцевой резонатор лазера (рис. 1) состоял из 1 m кварцевого волокна, легированного ионами гольмия (Ho^{3+}), с концентрацией активных ионов 4×10^{19} cm^{-3}. Геометрические параметры волокна: диаметр сердцевины 11 μm, числовая апертура NA ~ 0.145. Дисперсия групповых скоростей гольмиевого волокна на длине волны 2040 nm равна $\beta_2 \approx -0.103$ ps^2/m. Длина стандартного кварцевого одномодового волокна составила 2.7 m, дисперсия групповых скоростей на длине волны 2040 nm равна $\beta_2 \approx -0.094$ ps^2/m [18]. Накачка гольмиевого лазера осуществлялась непрерывным иттербиевым (Yb) волоконным лазером на длине волны $\lambda = 1130$ nm по направлению против обхода резонатора. Максимальная мощность накачки достигала 2 W. Ввод накачки осуществлялся через мультиплексор (WDM) с разделением длин волн 1125/2100 nm. Также резонатор включал в себя изолятор с потерями в прямом направлении 0.75 dB, и в обратном 48 dB, на длине волны 2000 nm. Вывод излучения из резонатора осуществлялся через ответвитель с коэффициентом деления 30/70, где 30% излучения выводилось из резонатора.

Для реализации режима пассивной синхронизации мод был использован насыщающийся поглотитель, в качестве которого выступала бесполимерная пленка, содержащая одностенные углеродные нанотрубки (ОУНТ), синтезированные аэрозольным методом [19], аналогичные использованным в работе [17]. Пленка ОУНТ была интегрирована в резонатор посредством фиксации между ферулами оптических волоконных коннекторов FC/APC (рис. 1), на торец которых пленку ОУНТ наносили простым методом сухого переноса [20]. Использование такого типа поглотителя продемонстрировало более высокую стабильность по сравнению с композитными образцами ОУНТ [21]. В случае данной работы и исследования гармонической синхронизации мод за счет повышения мощности накачки, данный тип насыщающегося поглотителя перспективен и интересен тем, что он сохраняет свои свойства и не деградирует в течение продолжительного времени при прохождении через него относительно высоких мощностей (средние мощности накачки от 1 до 2 W).

Для достижения высокочастотного режима ГСМ в резонатор лазера было добавлено 10 m волокна UHNA4 (Coherent) с высоким значением числовой апертуры NA $= 0.35$, что обеспечило смещение суммарной дисперсии в область нормальных значений. Диаметр сердцевины волокна UHNA4 был равен 2.2 μm, диаметр оболочки — 125 μm, а дисперсия групповых скоростей на длине волны 2040 nm составила $\beta_2 \approx +0.086$ ps^2/m [22]. По предварительной оценке, в двухмикронном спектральном диапазоне значение эффективной площади моды A_{eff} такого волокна находится в диапазоне $5-7\,\mu$m^2, а значение коэффициента нелинейности γ находится в диапазоне $10-20\,(\text{W}\cdot\text{km})^{-1}$. Полная длина резонатора составила 13.7 m, что соответствовало фундаментальной ЧСИ 15.52 MHz. Суммарная дисперсия групповой скорости резонатора при этом составила $+0.5$ ps^2 [18]. Потери на сварках SMF-UHNA4 составили 0.66 dB, внутренние потери UHNA4 менее 0.07 dB/m. В ходе эксперимента было установлено, что при использовании волокна UHNA4 с длиной более 15 m суммарная дисперсия групповой скорости резонатора становилась чрезмерно положительной, что подавляло формирование коротких импульсов и ограничивало ЧСИ на уровне ~ 0.5 GHz.

Для контроля выходного оптического излучения к 30% выходу был добавлен оптический изолятор (аналогичный установленному в резонатор), затем волоконный делитель 90/10. К 10% выходу, в свою очередь, был добавлен волоконный делитель 50/50. Итоговое соотношение мощностей на оптических выходах: выход 1 — 90%, выход 2 — 5%, выход 3 — 5%. Выход 1 направлялся поочередно в измеритель мощности (Ophir 3A-FS) и автокоррелятор (Avesta AA-10DD-30ps). На выходе 2 контролировали оптический спектр с помощью анализатора спектра (Yokogawa AQ6375B, разрешение 0.1 nm). Сигнал с выхода 3 поочередно направлялся на фотодиод (EOT ET-5000, полоса пропускания 12.5 GHz) подключенный к анализатору радиочастотного (РЧ) спектра (Keysight 9020B, разрешение 10 Hz) и на фотодиод (IBSG PD24-005-HS, полоса пропускания 5 GHz), подключенный к цифровому осциллографу (Tektronix MSO 64, 4 GHz). Стоит отметить, что в ходе описания экспериментальных результатов и полученных характеристик излучения указаны значения мощности излучения, измеренные на выходе 1. С учетом потерь на

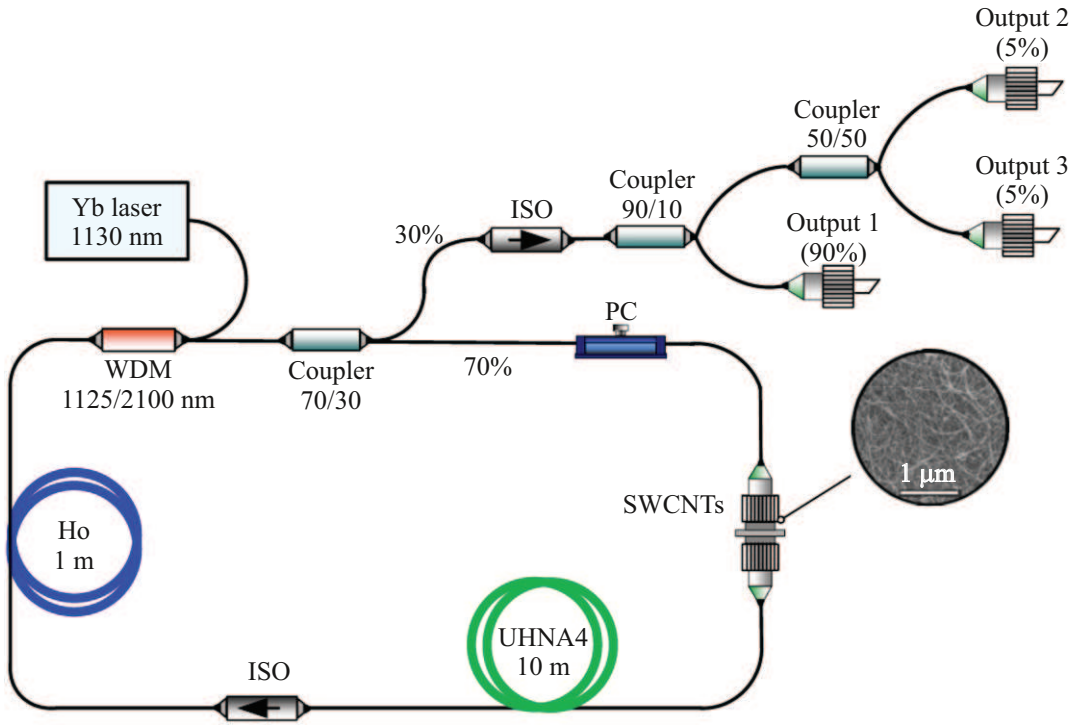


Рис. 1. Схема экспериментальной установки гольмиевого волоконного лазера. Основные элементы схемы: Yb лазер накачки (1130 nm), SWCNTs — одностенные углеродные нанотрубки, PC — контроллер поляризации, ISO — оптический изолятор, UHNA4 — волокно с высоким значением числовой апертуры, Ho — активное волокно, легированное ионами Ho^{3+}. На вставке показано изображение бесполимерной пленки ОУНТ, полученное с помощью сканирующей электронной микроскопии; масштабная линейка соответствует 1 μm.

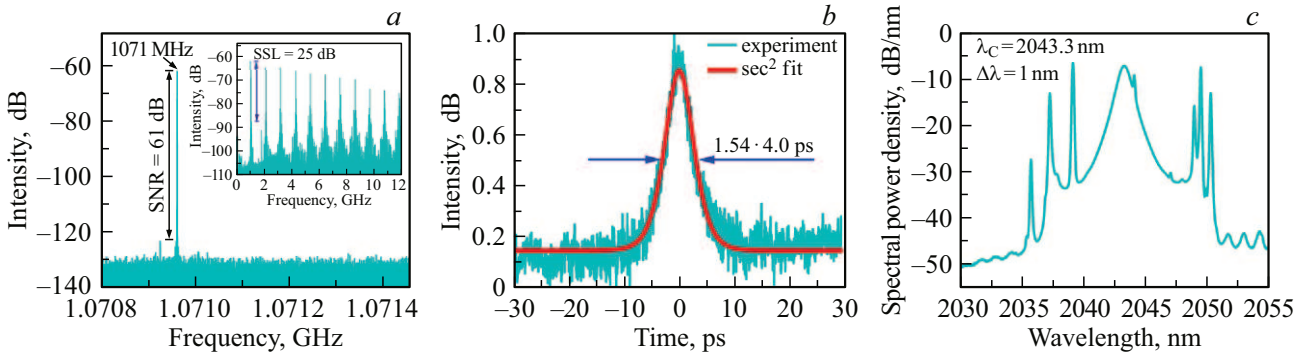


Рис. 2. Характеристики излучения гольмиевого лазера, работающего на ЧСИ 1071 MHz (69-я гармоника). (*a*) РЧ-спектр в диапазоне 0.7 MHz с разрешением 10 Hz и на вставке в диапазоне 12 GHz с разрешением 1 kHz, (*b*) автокорреляционная функция импульса с аппроксимацией sec^2, (*c*) оптический спектр (разрешение 0.1 nm).

изоляторе и делителе (90/10) мощность непосредственно на выходе гольмиевого лазера (30% выход делителя) увеличится в среднем на 48%.

Результаты и обсуждение

Порог генерации гольмиевого волоконного лазера наблюдался при мощности накачки Yb лазера 1.1 W. При повышении мощности накачки до 1.2 W достигнут порог генерации в режиме синхронизации мод на фундаментальной частоте следования импульсов 15.52 MHz. Мощность излучения, измеренная на выходе 1, составила 5.3 mW, центральная длина волны 2042.2 nm, ширина оптического спектра на полувысоте 1.2 nm, энергия импульса 16 pJ. При повышении мощности накачки наблюдалось повышение частоты следования импульсов за счет гармонической синхронизации мод. Исследование режимов ГСМ было проведено по частотам, начиная с 1071 MHz (69 гармоника) до фундаментальной, путем

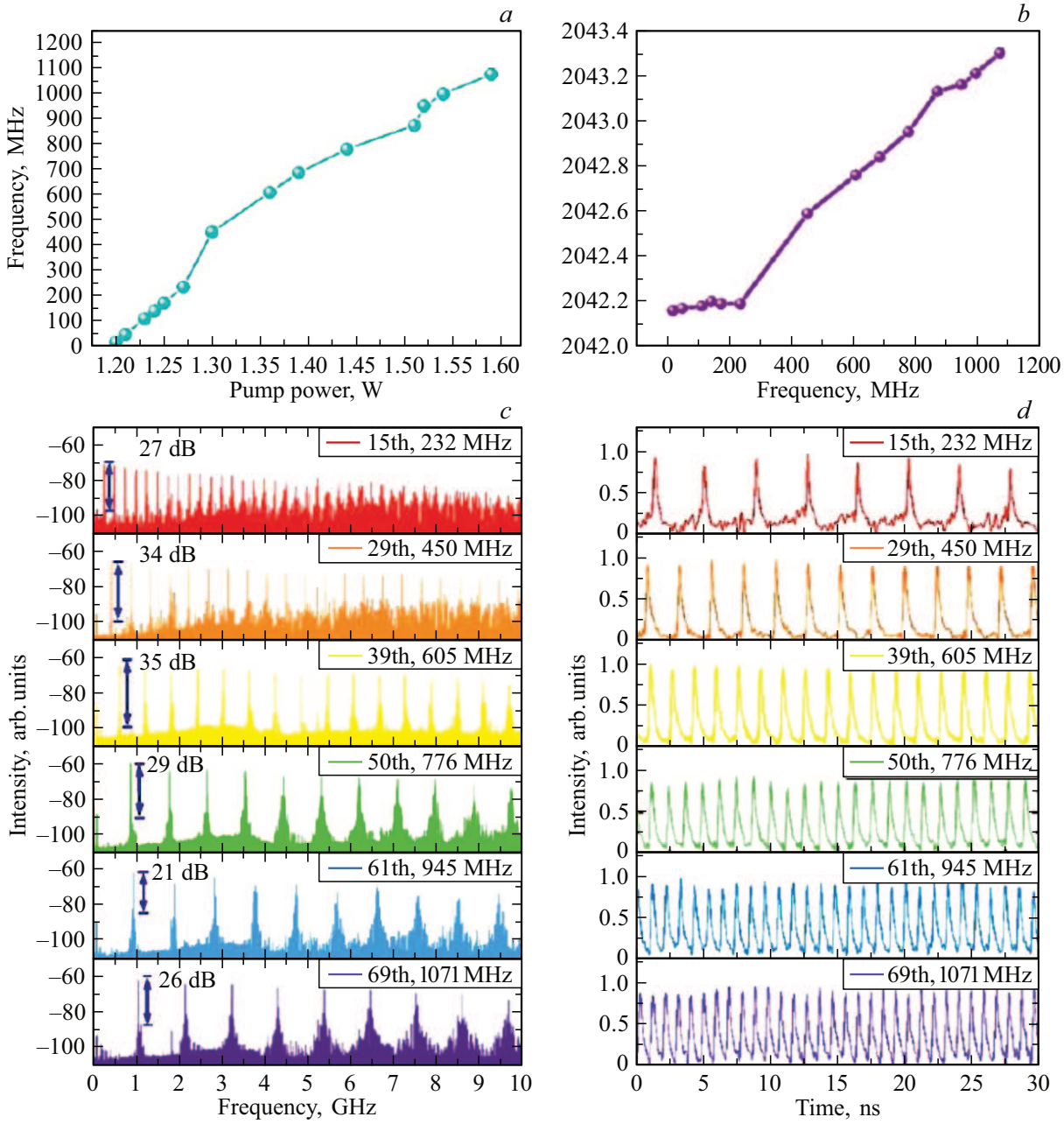


Рис. 3. (*a*) Зависимость ЧСИ от мощности накачки Yb лазера, (*b*) зависимость центральной длины волны оптического спектра от ЧСИ, (*c*) эволюция РЧ-спектра диапазона ЧСИ от 232 MHz до 1071 MHz в диапазоне 10 GHz с разрешением 1 kHz, (*d*) эволюция осциллограммы последовательности импульсов диапазона ЧСИ от 232 MHz до 1071 MHz в диапазоне 30 ns.

понижения мощности накачки с 1.59 W до 1.2 W. В этом режиме подстройка состояния поляризации с помощью контроллера поляризации не осуществлялась. Среднее время переключения между гармониками (с момента изменения мощности накачки до момента установления стабильного режима ГСМ) составило около 2 min. В ходе эксперимента можно отметить, что перестройка частот с понижением мощности лазера накачки осуществлялась сразу на несколько гармоник, что может быть связано с частотами акустооптических резонансов в волокнах резонатора лазера [23]. При перестройке частот состояние поляризации с помощью контроллера поляризации не корректировалось. На рис. 2 представлены оптические характеристики наиболее высокочастотной 69 гармоники с ЧСИ 1071 MHz при мощности накачки 1.59 W ((*a*) РЧ-спектр (на вставке диапазон 12 GHz), (*b*) автокорреляционная функция импульса (диапазон 60 ps), (*c*) оптический спектр (диапазон 25 nm)). Выходная мощность при этом составила 17.3 mW, центральная длина волны 2043.3 nm, ширина оптического спектра

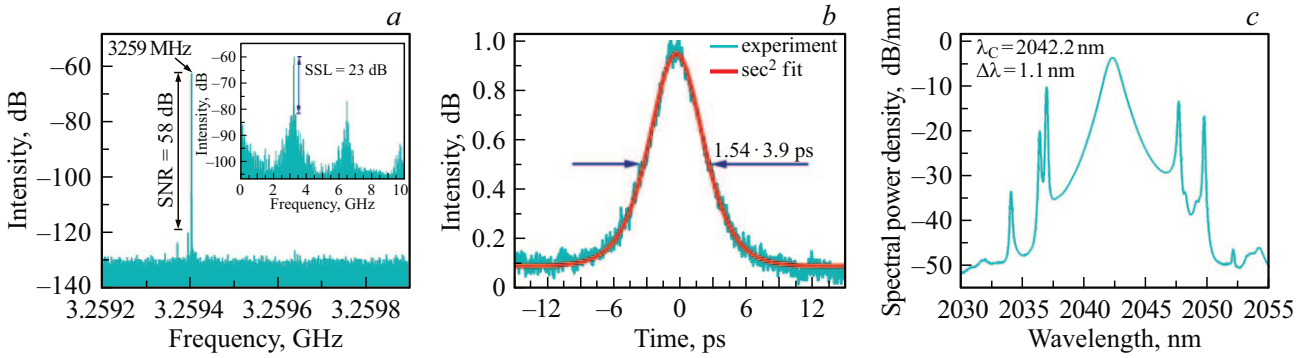


Рис. 4. Выходные оптические характеристики режима с ЧСИ 3259 MHz (210-я гармоника). (*a*) РЧ-спектр в диапазоне 0.7 MHz с разрешением 10 Hz и в диапазоне 10 GHz с разрешением 1 kHz, (*b*) автокорреляционная функция импульса с аппроксимацией $\sec^2$, (*c*) оптический спектр (разрешение 0.1 nm).

на полувысоте 1 nm, энергия импульса 14.7 pJ, пиковая мощность 4 W, длительность импульса 4 ps. Отношение уровня сигнала к супермодовому шуму SSL = 25 dB. Отношение уровня сигнала к шуму SNR = 61 dB.

На рис. 3, *a* представлена измеренная ЧСИ, перестраиваемая от 15.52 до 1071 MHz в зависимости от мощности накачки Yb лазера. Энергия единичного солитоноподобного импульса, без вклада непрерывной компоненты, для всех ЧСИ находилась в диапазоне от 12.6 до 16 pJ. Длительность импульсов при этом изменялась от 3.9 до 4.8 ps. С ростом ЧСИ наблюдалась тенденция к смещению центральной длины волны в более длинноволновую область (рис. 3, *b*). На рис. 3, *c* представлена эволюция РЧ-спектра с ростом ЧСИ (режимы: 232, 450, 605, 776, 945 и 1071 MHz). На рис. 3, *d* представлена эволюция осциллограммы последовательности импульсов с ростом ЧСИ для аналогичных режимов.

Дополнительно был исследован режим ГСМ с максимальным значением ЧСИ, которая была достигнута в представленной конфигурации гольмиевого волоконного лазера с помощью подстройки состояния поляризации. Максимально достигнутая ЧСИ составила 3259 MHz (210-я гармоника) при мощности накачки Yb лазера 2 W. На рис. 4 представлены оптические характеристики данного режима: *a*) РЧ-спектр (на вставке диапазон 10 GHz), *b*) автокорреляционная функция импульса (диапазон 30 ps), *c*) оптический спектр (диапазон 25 nm). Выходная мощность составила 34.5 mW, центральная длина волны 2042.2 nm, ширина оптического спектра на полувысоте 1.1 nm, энергия импульса 11 pJ, пиковая мощность 2.7 W, длительность импульса 3.9 ps. Отношение уровня сигнала к супермодовому шуму составило SSL = 23 dB, а отношение уровня сигнала к шуму SNR = 58 dB.

На основе полученных результатов можно сказать, что добавление в резонатор волокна (UHNA4) с высоким значением числовой апертуры способствовало достижению относительно высоких значений ЧСИ. Данное волокно обладает двумя критически важными свойствами (на рабочей длине волны 2.04 μm): значительной положительной дисперсией групповых скоростей и малой эффективной площадью моды. Малая эффективная площадь моды способствует повышению значения коэффициента нелинейности, который значительно больше, чем у стандартного одномодового волокна. Волокно UHNA4 способствовало усилению фазовой самомодуляции за счет увеличения интенсивности света в сердцевине волокна из-за уменьшения эффективной площади моды, что привело к снижению энергетического порога расщепления солитона. Данный эффект привел к эффективному умножению ЧСИ в резонаторе при увеличении мощности накачки.

Механизм пассивной ГСМ в резонаторе лазера определяется рядом быстропротекающих процессов на всем протяжении установления стабильного режима: эффект дисперсионной волны, истощение и восстановление усиления, нестабильность, вызванная фазовой самомодуляцией и долгодействующее взаимодействие импульсов через акустооптическую волну [10,24]. Взаимодействие импульсов с периодической структурой в резонаторе (акустооптическая волна) обеспечивает долгоживущее взаимодействие между импульсами, равномерно распределяя их и подавляя влияние дисперсионной волны.

Как отмечено в работе [13], при попытках достичь ЧСИ свыше 600 MHz, увеличение мощности накачки ведет к усилению диссипативных процессов и нестабильности импульсов, вызванной фазовой самомодуляцией, что в конечном итоге приводит к режиму непрерывной генерации. В нашей работе удалось достичь более высоких частот следования импульсов при повышении мощности накачки благодаря использованию волокна UHNA4 и одномодового волокна, сформировав резонатор с заданной положительной дисперсией. Такая конфигурация резонатора способствует подавлению конкуренции со стороны дисперсионной волны и при этом усиливает влияние акустооптической волны.

Основными факторами, ограничивающими ЧСИ, вероятно, стали накопление нелинейных эффектов, приведшее к росту неустойчивости при максимальной мощности накачки, а также тепловые эффекты в активном

волокне. Предполагается, что в дальнейших экспериментах получится достичь более высоких ЧСИ за счет более точного контроля дисперсии групповых скоростей резонатора и термостабилизации активного волокна, так как полученная ЧСИ не является предельной для данной конфигурации.

Заключение

В настоящей работе продемонстрирован гольмиевый волоконный лазер, работающий в режиме пассивной синхронизации мод с использованием насыщающегося поглотителя на основе ОУНТ. За счет гармонической синхронизации мод получена перестройка частоты следования ультракоротких импульсов от 15.52 до 1071 MHz (от 1-й до 69-й гармоники) на длине волны 2.04 μm. Длительность и энергия импульсов варьировались в диапазоне от 3.9 до 4.8 ps и от 12.6 до 16 pJ соответственно. Данная перестройка частоты следования импульсов осуществлялась исключительно за счет изменения уровня мощности накачки Yb лазера без подстройки состояния поляризации. Важной особенностью представленного источника является возможность перестройки частоты следования импульсов в широком диапазоне (более 1 GHz) без подстройки состояния поляризации за счет контроллера поляризации, а только за счет контроля мощности накачки. Максимально достигнутая частота следования импульсов в данной конфигурации резонатора после подстройки состояния поляризации составила 3259 MHz (210-я гармоника) на длине волны 2.04 μm. При этом длительность импульсов составила 3.9 ps, а энергия импульсов 11 pJ.

Добавление в резонатор гольмиевого лазера волокна с высоким значением числовой апертуры способствовало достижению высокочастотной ГСМ. Смещение дисперсии в нормальную область и усиление нелинейных эффектов (фазовая самомодуляция, акустооптическое взаимодействие) позволили преодолеть ограничение в $\sim$ 600 MHz, ранее наблюдавшееся для гольмиевых волоконных лазеров. Уникальность представленного источника заключается в рекордном для гольмиевых волоконных лазеров диапазоне перестраиваемых ЧСИ. Полученные результаты открывают путь к созданию компактных и перестраиваемых источников ультракоротких импульсов в спектральном диапазоне 2 μm для широкого круга применений.

Финансирование работы

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-72-10120.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

[1] A.B. Seddon, B. Napier, I. Lindsay, S. Lamrini, P.M. Moselund, N. Stone, O. Bangg, M. Farrieset. Analyst, **143** (24), 5874 (2018). DOI: 10.1039/C8AN01396A
[2] M.S. Kopyeva, S.A. Filatova, V.A. Kamynin, A.I. Trikshev, E.I. Kozlikina, V.V. Astashov, V.B. Loschenov, V.B. Tsvetkov. Applied Sciences., **12** (8), 3825 (2022). DOI: 10.3390/app12083825
[3] B. Voisiat, D. Gaponov, P. Gečys, L. Lavoute, M. Silva, A. Hideur, N. Ducros, G. Račiukaitis. Laser Applications in Microelectronic and Optoelectronic Manufacturing (LAMOM) XX., **9350**, 120 (2015). DOI: 10.1117/12.2078651
[4] C. Kerse, H. Kalaycoığlu, P. Elahi, B. Çetin, D.K. Kesim, Ö. Akçaalan, S. Yavaş, M.D. Aşık, B. Öktem, H. Hoogland, R. Holzwarth, F.Ö. Ilday. Nature., **537** (7618), 84 (2016). DOI: 10.1038/nature18619
[5] A. Martinez, S. Yamashita. Optics express., **19** (7), 6155 (2011). DOI: 10.1364/OE.19.006155
[6] C. Kerse, H. Kalaycıoğlu, P. Elahi, Ö. Akčaalan, F.Ö. Ilday. Optics Communications., **366**, 404 (2016). DOI: 10.1016/j.optcom.2015.12.064
[7] A.B. Grudinin, D.J. Richardson, D.N. Payne. Electron. Lett., **29**, 1860 (1993). DOI: 10.1049/el:19931238
[8] H. Cheng, W. Lin, Z. Luo, Z. Yang. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., **24** (3), 1100206 (2017). DOI: 10.1109/JSTQE.2017.2657489
[9] A. Zverev, V. Kamynin, D. Korobko, S. Filatova, V. Tsvetkov, B. Galagan, S. Sverchkov, B. Denker, V. Vel'miskin, Y. Gladush, D. Krasnikov, A. Nasibulin, M. Belkin. Optics Express, **33** (11), 23334–23341 (2025). DOI: 10.1364/OE.561404
[10] X. Liu, M. Pang. Laser & Photonics Reviews, **13** (9), 1800333 (2019). DOI: 10.1002/lpor.201800333
[11] J. Shang, S. Zhao, Y. Liu, K. Yang, C. Wang, Y. Zhao, Y. Song, P. Hu, J. Mao, T. Li, T. Feng. Optics & Laser Technology., **153**, 108206 (2022). DOI: 10.1016/j.optlastec.2022.108206
[12] C. Yang, B. Yao, Y. Chen, G. Liu, S. Mi, K. Yang, T. Dai, X. Duan. Optics Express., **28** (22), 33034 (2020). DOI: 10.1364/OE.403518
[13] P. Hu, J. Mao, X. Zhou, T. Feng, H. Nie, B. Zhang, T. Li, J. He, K. Yang. Journal of Lightwave Technology, **42** (10), 3862 (2024). DOI: 10.1109/JLT.2024.3367741
[14] W. Ma, T. Wang, F. Wang, D. Zhao, R. Liu, J. Zhang, H. Jiang. IEEE photonics technology letters., **31** (3), 242 (2018). DOI: 10.1109/LPT.2018.2889876
[15] Y. Wang, J. Li, K. Mo, Y. Wang, F. Liu, Y. Liu. Scientific Reports, **7** (1), 7779 (2017). DOI: 10.1038/s41598-017-06326-5
[16] R.I. Woodward. Journal of Optics, **20**(3), 033002 (2018).
[17] S. Filatova, V. Kamynin, D. Korobko, A. Fotiadi, A. Lobanov, A. Zverev, P. Balakin, Y. Gladush, D. Krasnikov, A. Nasibulin, V. Tsvetkov. Optics Express., **32** (13), 22233 (2024). DOI: 10.1364/OE.523902
[18] M. Pawliszewska, T. Martynkien, A. Przewłoka, J. Sotor. Optics Letters., **43** (1), 38 (2017). DOI: 10.1364/OL.43.000038
[19] I.V. Novikov, D.V. Krasnikov, I.H. Lee, E.E. Agafonova, S.I. Serebrennikova, Y. Lee, S. Kim, J.-S. Nam, V.A. Kondrashov, J. Han, I.I. Rakov, A.G. Nasibulin, I. Jeon. Advanced Materials, **37**, 2413777 (2025). DOI: 10.1002/adma.202413777

[20] A. Kaskela, A.G. Nasibulin, M.Y. Timmermans, B. Aitchison, A. Papadimitratos, Y. Tian, Z. Zhu, H. Jiang, D.P. Brown, A. Zakhidov, E.I. Kauppinen. Nano Lett., **10**(11), 4349–4355 (2010). DOI: 10.1021/nl101680s
[21] D. Galiakhmetova, Y. Gladush, A. Mkrtchyan, F.S. Fedorov, E.M. Khabushev, D.V. Krasnikov, R. Chinnambedu-Murugesan, E. Manuylovich, V.Dvoyrin, A. Rozhin, M. Rümmeli, S. Alyatkin, P. Lagoudakis, A.G. Nasibulin. Carbon **184**, 941–948 (2021). DOI: 10.1016/j.carbon.2021.08.032
[22] P. Ci aćka, A. Rampur, A. Heidt, T. Feurer, M. Klimczak. Journal of the Optical Society of America B., **35** (6), 1301 (2018). DOI: 10.1364/JOSAB.35.001301
[23] V. Ribenek, P. Itrin, D. Korobko, A. Fotiadi. APL Photonics, **9** (5), 056105 (2024). DOI: 10.1063/5.0195623
[24] D. Korobko, V. Ribenek, A. Fotiadi. Journal of Lightwave Technology, **42** (17), 6049–6056 (2024). DOI: 10.1109/JLT.2024.3405072