

На правах рукописи



Итрин Павел Аркадьевич

Кольцевые волоконные лазеры с гармонической синхронизацией мод и  
сдвигом частоты

1.3.6. Оптика

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Ульяновск 2023 г.

Работа выполнена на кафедре радиофизики и электроники и в Научно-исследовательском технологическом институте имени С.П. Капицы Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ульяновский государственный университет» Министерства науки и высшего образования

Научный руководитель: Семенцов Дмитрий Игоревич, доктор физико-математических наук, профессор

Официальные оппоненты: Шамрай Александр Валерьевич - доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией квантовой электроники ФГБУН Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе Российской академии наук

Попов Сергей Михайлович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории волоконных световодов и элементов на их основе Фрязинского филиала ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Пермский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук

Защита состоится 15 декабря 2023 г. в «11» час. «00» мин. на заседании диссертационного совета 24.2.422.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск, ул. Набережная реки Свияги, 106, корп. 1, ауд. 703.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в научной библиотеке Ульяновского государственного университета и на сайте <https://www.ulsu.ru>, с авторефератом – на сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации <https://vak.minobrnauki.gov.ru>

Отзывы на автореферат просим высылать по адресу: 432017, г. Ульяновск, ул. Л. Толстого, д. 42, УлГУ, Отдел подготовки кадров высшей квалификации.

Автореферат разослан \_\_\_\_\_ г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета 24.2.422.01,  
кандидат физико-математических наук

Вострецова  
Любовь Николаевна

## **Общая характеристика работы**

**Актуальность темы.** Волоконные лазерные генераторы ультракоротких импульсов остаются одним из наиболее активно развивающихся направлений лазерной физики на протяжении последних 30 лет. Телекоммуникационный бум 1990 годов способствовал внедрению ряда волоконных компонентов, разработанных для требовательных приложений оптической связи, и обеспечил преимущества волоконных лазеров по сравнению с конкурирующими технологиями [1,2]. К числу этих основных преимуществ следует отнести компактность, совместимую с возможностью достижения высокого (до 30 дБ и выше) коэффициента усиления, что позволяет использовать большие допуски оптической юстировки и значительно упростить оптическую схему лазера. Кроме этого, волоконные лазеры естественным образом сочетают в себе высокое качество выходного пучка, гибкий волоконный вывод, надежность и простоту в эксплуатации, находя свое применение в широком ряду приложений, в числе которых помимо оптической связи находятся медицина, микрообработка, микроскопия и метрология [3, 4].

Крайне важной задачей физики волоконных импульсных лазеров является достижение высокой (1 ГГц и выше) частоты следования импульсов (ЧСИ), что позволит расширить круг их приложений, включив в него ряд актуальных разработок, таких как, генератор оптических гребенок для задач телекоммуникации и спектроскопии, задающий высокочастотный генератор для задач метрологии, оптических вычислений, генерации излучения терагерцевого диапазона и т.д. [5,6]. Вследствие того, что для эффективной генерации резонатор импульсного волоконного лазера должен обладать длиной порядка 10 м и, соответственно, фундаментальной частотой порядка десятков МГц, то излучение ГГц импульсных последовательностей возможно только в многоимпульсном режиме, так называемой, гармонической синхронизации мод (ГСМ), при котором множество импульсов равномерно распределяются по волоконному резонатору, обеспечивая генерацию на

высокой гармонике (максимальный порядок  $\sim 10^3$ ) от фундаментальной частоты [7].

Наиболее широкое распространение в настоящее время получили импульсные волоконные лазеры с пассивной синхронизацией мод на основе нелинейного вращения плоскости поляризации (НВП) или содержащие специальный насыщающийся поглотитель, например, на основе углеродных нанотрубок [8]. Необходимое для гармонической синхронизации мод периодическое распределение импульсов по резонатору достигается в лазерах такого типа автоматически, за счет взаимного отталкивания. Механизм взаимодействия импульсов в каждом конкретном случае не всегда очевиден, в его качестве могут выступать взаимодействие через насыщающееся и релаксирующее усиление [9], взаимодействие посредством непрерывной компоненты или дисперсионных волн [10], через электрострикцию, посредством акустических волны [11]. Все указанные взаимодействия обладают весьма небольшой интенсивностью, во многих случаях лишь немного превышающая уровень шумовых воздействий (связанных, например, с тепловыми эффектами, вибрациями и шумами в активной среде и т.п.) на импульсы. Эти шумовые воздействия вызывают изменение положения импульса – временную флуктуацию, причем её величина существенно выше, чем у лазеров, работающих на фундаментальной частоте [12]. Данный факт представляет основной недостаток волоконных лазеров с гармонической синхронизацией мод, препятствующий их более широкому использованию. О величине джиттера и устойчивости гармонической синхронизацией мод можно судить по параметрам радиочастотного спектра лазера – отношению сигнал/шум и специфической характеристике лазеров в этом режиме – уровню межмодового шума [13,14]. Снижение межмодового шума, приводящее к уменьшению временного джиттера и стабилизации импульсной последовательности, излучаемой волоконным лазером в режиме гармонической синхронизации мод, является крайне актуальной задачей,

решение которой значительно повышает привлекательность подобных лазеров для указанных выше приложений [12].

При теоретическом и экспериментальном изучении вопросов стабилизации волоконного лазера в режиме гармонической синхронизации мод значительный интерес вызвал эффект сдвига несущей частоты лазерного импульса, который физически может осуществляться при помощи оптического модулятора. Известно, что сдвиг несущей частоты, непосредственно реализуемый в резонаторе волоконного лазера, может приводить к синхронизации мод, основанной на отделении солитонных импульсов от низкоамплитудного спектрально-узкополосного фона. Более углубленное рассмотрение воздействия эффекта внутрирезонаторного сдвига частоты на взаимодействие импульсов в кольцевом резонаторе, показало его перспективу для задач стабилизации гармонической синхронизации мод в волоконном лазере.

Таким образом, задачи, посвященные исследованию стабильной генерации пикосекундных оптических импульсов с высокой частотой следования, реализуемые на базе волоконных кольцевых лазеров со сдвигом частоты, являются важными и представляют значительный научный интерес для современной оптики и нелинейной фотоники.

**Цель диссертационной работы:** изучить воздействие внутрирезонаторного сдвига частоты на стабильность волоконного лазера, работающего в режиме гармонической синхронизации мод и продемонстрировать волоконный лазер, отличающийся сочетанием высокой частоты следования импульсов (более 1 ГГц) и низким уровнем межмодового шума (уровень подавления более 40 дБ).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Экспериментальное исследование стабильности двух конфигураций волоконных лазеров, работающих в режиме гармонической синхронизации мод без внутрирезонаторного сдвига частоты, с целью выявления наиболее перспективной схемы. В первой, линейной конфигурации синхронизация мод

осуществляется при помощи полупроводникового насыщающегося зеркала, во второй конфигурации используется кольцевой резонатор, при этом синхронизация мод происходит при помощи нелинейного вращения плоскости поляризации.

2. Теоретическое исследование воздействия сдвига несущей частоты на интенсивность взаимодействия импульсов в резонаторе волоконного лазера. Разработка численной модели волоконного лазера с гармонической синхронизацией мод и сдвигом частоты. Численное моделирование лазера со стабилизацией гармонической синхронизации мод при помощи сдвига несущей частоты.

3. Экспериментальное исследование конфигурации кольцевого волоконного лазера с гармонической синхронизацией мод и внутрирезонаторным сдвигом несущей частоты. Сравнение уровня межмодового шума в экспериментальном волоконном лазере с внутрирезонаторным сдвигом несущей частоты и аналогичном лазере без сдвига частоты.

4. Исследование экспериментального образца волоконного лазера с гармонической синхронизацией мод, генерирующего высокочастотную последовательность импульсов ( $> 10$  ГГц) и использующего для стабилизации межимпульсного расстояния предложенный метод внутрирезонаторного сдвига несущей частоты.

#### **Научная новизна полученных результатов:**

1. Показано, что в волоконном лазере с линейным резонатором несовпадение центральной длины волны выходного отражателя с пиком усиления приводит к фильтрации излучения и генерации достаточно узкополосного импульса, но одновременно способствует полному подавлению дисперсионных волн и непрерывной составляющей излучения, что улучшает гармоническую синхронизацию мод и дает широкий диапазон перестройки частоты следования импульсов (от десятков МГц до 1 ГГц)

регулируемым только мощностью излучения диодов накачки. В кольцевом волоконном лазере с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации установлены диапазоны стабильной работы и сопоставлены с шумовыми характеристиками лазера – уровнем межмодового шума и временной флуктуацией межпульсного расстояния.

2. Получены уравнения, описывающие динамическую систему взаимодействующих импульсов в резонаторе волоконного лазера, с учетом сдвига частоты. Анализ показал, что динамическая система отталкивающихся солитонных импульсов внутри кольцевого лазерного резонатора, приходит к стационарной точке, соответствующей однородному расположению импульсов, при включении частотного сдвига значительно быстрее, чем в его отсутствии.

3. Показано, что эффект сдвига частоты в дополнении к нелинейному вращению плоскости поляризации за счет более высоких нелинейных потерь способен расширить рабочий диапазон генерируемого излучения в режиме гармонической синхронизации мод.

4. В экспериментальном образце кольцевого волоконного лазера, работающем в режиме гармонической синхронизации мод со стабилизацией при помощи сдвига частоты достигнута частота следования импульсов  $\sim 12$  ГГц, что в сочетании с высоким (более 40 дБ) уровнем подавления межмодового шума является рекордным показателем для волоконных лазеров, использующих для синхронизации мод механизм нелинейного вращения поляризации.

**Практическая значимость полученных результатов.** При работе над диссертацией были получены следующие практически важные результаты:

1. Разработана экспериментальная схема волоконного лазера с гармонической синхронизацией мод с линейным резонатором. В предложенной конфигурации исключено влияние эффектов нелинейного вращения поляризации, поэтому она перспективна для разработки лазерных

импульсных генераторов с устойчивым самозапуском и перестраиваемой частотой следования импульсов до 1 ГГц.

2. Предложенный метод сдвига частоты позволяет на порядок снизить флуктуации межимпульсного расстояния в волоконных лазерах с гармонической синхронизацией мод, что можно интерпретировать как повышение устойчивости однородного гармонического распределения импульсов в резонаторе. Данное улучшение характеристик выходного излучения значительно расширяет область практических приложений для подобных лазеров.

3. Продемонстрирована работа кольцевого волоконного лазера с акустооптическим модулятором, обеспечивающим сдвиг частоты. Проведено сравнение шумовой характеристики сконструированного лазера с образцом без сдвига частоты, показавшее на 10 дБ большее значение подавления межмодового шума. Включение частото-сдвигающего элемента может улучшить стабильность работы гибридных лазеров в режиме гармонической синхронизации мод с насыщающимися поглотителями на основе полупроводникового насыщающегося зеркала или углеродных нанотрубок.

4. Предложенный метод стабилизации был применен при разработке экспериментальной схемы волоконного лазера с высокой частотой следования импульсов и возможностью перестройки длины волны. В разработанной лазерной схеме достигнута частота следования импульсов свыше 10 ГГц в сочетании с высоким уровнем подавления межмодового шума более 40 дБ. Режим гармонической синхронизации мод с частотой следования импульсов более 5 ГГц был получен в широкой полосе перестройки длины волны 1530-1580 нм. Волоконные лазеры с подобными характеристиками весьма перспективны для использования в области оптической телекоммуникации и спектроскопии.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Волоконные лазеры с гармонической синхронизацией мод за счет насыщающегося поглощения (в линейной) или нелинейного вращения



плоскости поляризации (в кольцевой конфигурации) при частотах следования импульсов более 1 ГГц обладают уровнем подавления межмодового шума, в среднем, не более 25-30 дБ, что свидетельствует об относительно невысокой стабильности импульсной последовательности. Кольцевая схема с синхронизацией мод на основе нелинейного вращения плоскости поляризации характеризуется меньшей длительностью и более высокой пиковой мощностью импульса, что обеспечивает рост силы межимпульсного отталкивания и делает данную схему более перспективной для дальнейшего улучшения характеристик гармонической синхронизации мод.

2. Динамическая система взаимодействующих взаимно отталкивающихся солитонных импульсов приходит к стационарной точке, соответствующей однородному расположению импульсов, при включении частотного сдвига значительно быстрее, чем в его отсутствие. Физически, ускорение выравнивания межимпульсных расстояний соответствует повышению устойчивости однородного гармонического распределения импульсов в резонаторе при включении сдвига частоты. Численное моделирование волоконного лазера с учетом эффектов взаимного межимпульсного отталкивания и сдвига частоты подтверждает теоретически полученный результат.

3. Излучение, генерируемое волоконным лазером в режиме гармонической синхронизации мод при помощи сдвига частоты, обладает повышенным подавлением уровнем межмодового шума и лучшей устойчивостью импульсной последовательности, чем в конфигурации без сдвига частоты.

4. Использование предложенного метода стабилизации гармонической синхронизации мод при помощи сдвига частоты в экспериментальном образце волоконного лазера с синхронизацией мод при помощи нелинейного вращения поляризации позволяет добиться генерации импульсной

последовательности с уровнем подавления межмодового шума более 40 дБ при частоте следования импульсов равной 12 ГГц.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается взаимным соответствием между результатами, полученными при теоретических расчетах, численном моделировании и в ходе экспериментов; применением отработанных методик проведения экспериментов; использованием современного сертифицированного и поверенного измерительного оборудования; сопоставлением данных, полученных различными методами; современными методами анализа и интерпретации экспериментальных результатов.

**Личный вклад автора.** Диссертация представляет собой обобщение работ автора, выполненных совместно с сотрудниками Научно-исследовательского технологического института им. С.П. Капицы. Коллективный характер экспериментальных работ обусловил публикацию полученных результатов в соавторстве с коллегами. Цели и задачи исследования определялись либо лично автором, либо при его непосредственном участии. Автор настоящей работы принимал участие в разработке методов исследования, проведении экспериментов и обработке полученных результатов. Анализ, обобщение результатов и формулирование выводов работы проводились лично автором.

**Апробация результатов исследования.** Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и семинарах:

- XXIII Всероссийская молодежная научная школа-семинар «Актуальные проблемы физической и функциональной электроники», Ульяновск, 2020;
- XXVIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», Москва, 2021;

- V международная школа молодых учёных «Нелинейная фотоника», Новосибирск, 2021;
- VI международная школа молодых учёных «Нелинейная фотоника», Новосибирск, 2022;
- Международный семинар по волоконным лазерам, г. Новосибирск 2022.

**Публикации.** Всего опубликовано 19 научных работ. Из них 6 работ в рецензируемых журналах из списка ВАК и 13 работ, включенных в международную базу цитирования Scopus. Список работ помещен в конце автореферата.

**Структура и объем научно-квалификационной работы.** Работа состоит из пяти глав. Общий объем работы 108 страниц, содержит 38 рисунков и список из 125 библиографических наименований.

#### **Содержание работы**

Во **введении** обоснована актуальность исследований, выполненных в рамках представленной диссертационной работы, сформулирована цель, определены научная новизна и задачи, приведены положения, выносимые на защиту.

**Первая глава** содержит обзор литературных данных по теме диссертационной работы. Приводятся основные исследования и достигнутые параметры излучения волоконных лазеров. Дается описание режимов работы в волоконных лазерах. Кратко описаны основные механизмы генерации постоянного излучения, режима модуляции добротности и особое внимание уделено режиму синхронизации мод. В заключительном разделе главы сформулированы и перечислены основные задачи, которые были поставлены при выполнении диссертационной работы.

**Вторая глава** содержит экспериментальные результаты по генерации ультракоротких импульсов (УКИ) в волоконных лазерах. В представленных работах исследованы схемы с линейным и кольцевым резонатором, генерирующие УКИ высокой частоты на основе эффекта насыщающего

поглощения и нелинейного вращения плоскости поляризации соответственно.

В первом разделе рассмотрен волоконный лазер с линейным резонатором, показана на рис. 1.

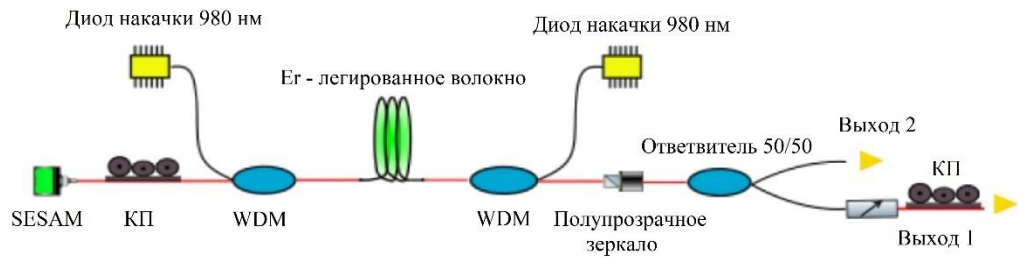


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. КП – контроллер поляризации, WDM – волоконный мультиплексор, SESAM – полупроводниковое насыщающееся зеркало.

При мощности накачки более 22 мВт происходит самозапуск лазера в режиме синхронизации основных мод на центральной длине волны  $\lambda_0 \sim 1553$  нм.

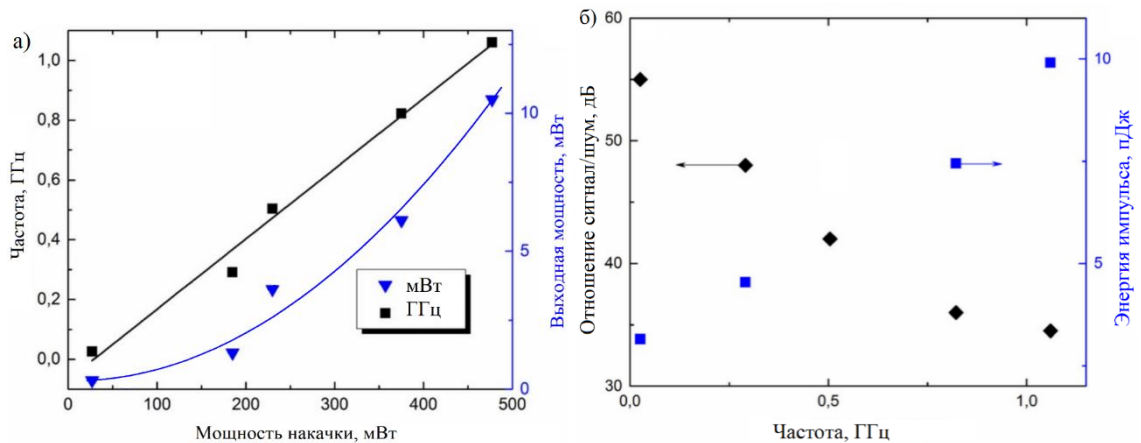


Рис. 2. Зависимость частоты следования импульсов и выходной мощности от мощности накачки (а). Зависимость ОСШ и энергии одиночного импульса от частоты следования импульсов (б).

С увеличением мощности накачки лазер переходит в режим многократной генерации импульсов с периодической подачей импульсов в резонатор, т. е. демонстрирует гармоническую синхронизацию мод.

Увеличивая мощность накачки до 480 мВт при определенной ориентации КП, наблюдается генерация импульсов с частотой повторения 1060,9 МГц, что соответствует сороковой гармонике резонатора. Полученные настройки лазера обеспечивают синхронизацию гармонических мод в

широком диапазоне частот следования (от основной частоты 26,5 МГц до максимальной частоты повторения 1060,9 МГц) за счет изменения мощности накачки без дополнительной настройки КП. На рис. 2 показано изменение выходного излучения лазера в зависимости от мощности накачки.

Во втором разделе продемонстрирован импульсный кольцевой волоконный лазер, работающий в режиме пассивной гармонической синхронизации мод на основе эффекта нелинейного вращения плоскости поляризации. Схема экспериментальной установки приведена на рис.3.

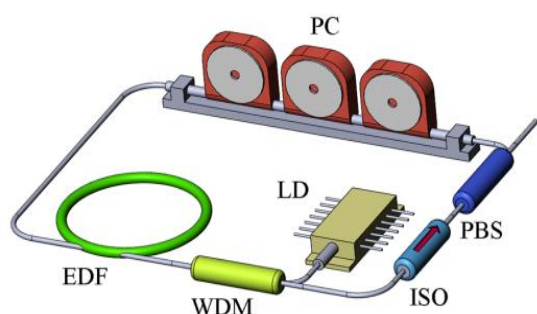


Рис. 3. Схема экспериментальной установки. PC – контроллер поляризации, EDF – активное волокно, WDM – волоконный мультиплексор, LD – диод накачки, ISO – волоконный изолятор, PBS – волоконный поляризационный делитель.

В результате экспериментов были получены несколько рабочих точек, в которых наблюдался стабильный режим работы лазера (рис. 4.). Причем эти режимы можно было объединить в серии по длинам волн генерации.

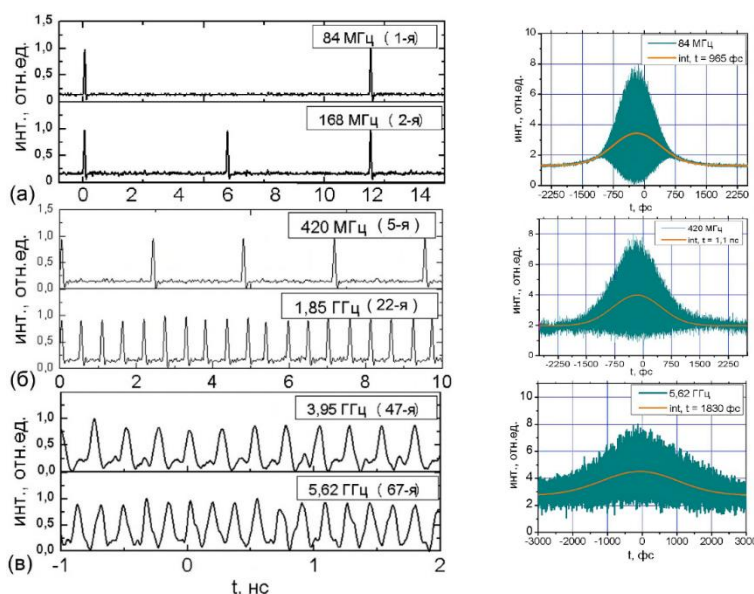


Рис. 4. Осциллограммы и соответствующие серии автокорреляционные функции выходных импульсов для длин волн генерации: а) 1558 нм, б) 1555 нм, в) 1560 нм.

Показано, что с увеличением номера гармоники резко возрастает уровень шумов, что связано с отсутствием сильных эффектов стабилизации периода следования импульсов в резонаторе в схеме с пассивной

гармонической синхронизацией. Установлено, что на высоких гармониках фазовый шум худшается в среднем на 25-30 дБ. Увеличение номера гармоники приводит к искажению частотной модуляции на высоких гармониках.

**В третьей главе** описаны теоретические основы для стабилизации ГСМ в солитонном лазере при помощи сдвига частоты, а также численное моделирование работы волоконного лазера с акустооптическим модулятором – элементом, обеспечивающим частотный сдвиг. Основное внимание было уделено динамике импульсов, в предположении, что их устойчивость обеспечивается механизмами синхронизации мод, естественно необходимыми при запуске лазера. Приведен краткий обзор практических результатов, достигнутых при введении в резонатор различных частотно-смещающих элементов.

Приведен теоретический анализ работы лазера с сдвигом частоты. Рассмотрено распространение импульса в кольцевом лазере в присутствии смещения частоты и фильтра, описываемого усредненным нелинейным уравнением Шредингера (НУШ) с возмущением. В солитонных единицах его можно записать следующим образом:

$$\frac{\partial u}{\partial Z} - \frac{i}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - i|u|^2 u = \delta u + \beta \left( \frac{\partial}{\partial \tau} + i\omega_{АОМ} \right)^2 u \quad (1.1)$$

где  $\delta = (g-l)Z_d$  – параметр избыточного (превышающего потери) усиления,  $\beta = 2 / (|\beta_{2r}| \Omega_f^2)$  – дисперсия фильтра,  $\omega_{АОМ} = 2\pi \Delta \nu t_0^3 / \beta_{2r}$  – безразмерная скорость сдвига частоты ( $\Delta \nu$  – частотный сдвиг акустооптического модулятора в Гц).

Показано, что при сдвиге частоты, не превышающем критической величины, частота и амплитуда солитона стремятся к стационарным значениям, при которых действие сдвига балансируется возвращающим эффектом фильтра, растущего с увеличением уклона фильтра (рис. 5(а)).

Далее были рассмотрены "коллективные" эффекты, возникающие вследствие импульсного взаимодействия, на примере двух импульсов, находящихся в кольцевом лазерном резонаторе с фундаментальным

периодом  $T_R$ . Было показано, что сила взаимодействия импульсов зависит от временных межимпульсных расстояний, при этом импульсы сближаются до тех пор, пока их притяжение не будет уравновешено отталкиванием.

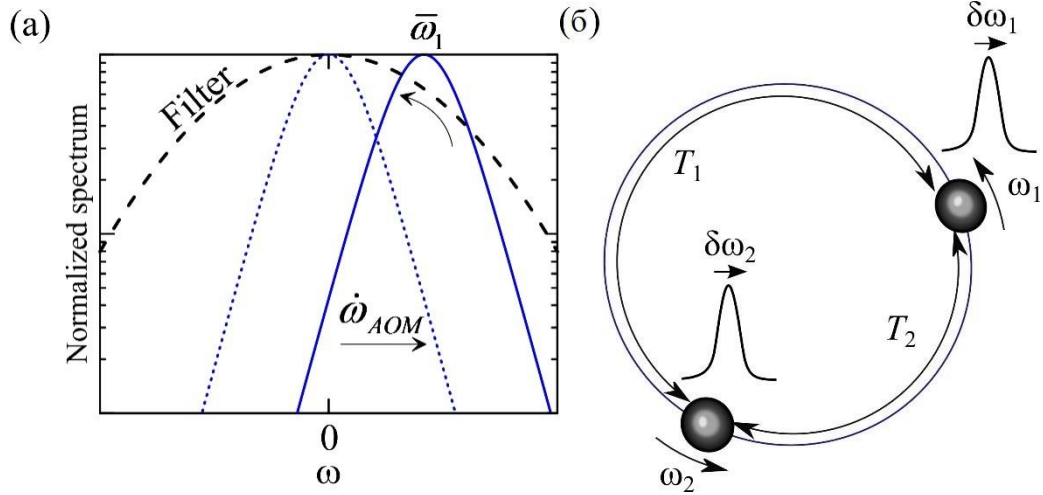


Рис. 5. Нормированный спектр солитона под действием сдвига частоты. Пунктир обозначает солитонный спектр в отсутствии сдвига (а). Схема взаимодействия двух импульсов в кольцевом резонаторе с фундаментальным периодом  $T_R = T_1 + T_2$ , где  $T_1$  и  $T_2$  – временные расстояния между импульсами.  $\delta\omega_1, \delta\omega_2$  – изменения частоты одного импульса под действием другого (б).

Наиболее важным результатом является повышение при этом жесткости связи, т.е. усиление взаимного отталкивания импульсов. Получена следующая система уравнений для параметров пары импульсов  $\eta = (\eta_1 + \eta_2)/2$  – средней амплитуды,  $p = (\eta_2 - \eta_1)/2$  – разности амплитуд,  $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2$  – средней частоты и  $q = (\omega_2 - \omega_1)/2$  – разности частот:

$$\begin{aligned}
 \partial\eta/\partial Z &= 2\delta\eta - 2\beta\eta(\eta^2/3 + \omega^2), \\
 \partial p/\partial Z &= 2p(\delta - \beta(\eta^2 + \omega^2)) - 4\beta\eta\omega q, \\
 \partial\omega/\partial Z &= \dot{\omega}_{AOM} - 4\beta\eta^2\omega/3, \\
 \partial q/\partial Z &= -B\Delta - 4\beta\eta^2q/3 - 8\beta\eta\omega p/3, \\
 \partial\Delta/\partial Z &= -2q.
 \end{aligned} \tag{1.2}$$

Система уравнений (1.2), описывающая динамику двух взаимодействующих импульсов под влиянием сдвига частоты, обладает стационарной точкой  $(\eta = \bar{\eta}, p = 0, \omega = \bar{\omega}, q = 0, \Delta = 0)$ , отвечающей импульсам

равной амплитуды и одинаковой частоты, равномерно распределенным по резонатору  $T_1 = T_2$ .

Теоретические расчеты, основанные на обобщенном НУШ, учитывающем эффекты фильтрации и сдвига частоты лазерных импульсов от центра фильтра, показали, что динамическая система, описывающая взаимодействие и распределение солитонных импульсов внутри лазерного резонатора, приходит к стационарной точке, соответствующей однородному расположению импульсов, при включении частотного сдвига значительно быстрее, чем в его отсутствии. Ускорение выравнивания межимпульсных расстояний при включении сдвига частоты в резонаторе соответствует повышению жесткости межимпульсных связей, отвечающей однородному гармоническому распределению импульсов в резонаторе.

В третьем разделе исследована численная модель волоконного солитонного лазера с отталкиванием между импульсами, индуцируемым насыщением и релаксацией усиления. Показано согласование с полученными теоретическими выводами. Включение сдвига частоты позволяет на порядки сократить время выравнивания расстояний между парой импульсов в резонаторе, взятых в качестве начальных условий модели.

Главным результатом является то, что в лазере со сдвигом частоты снижение межимпульсного расстояния от начального значения 6 пс до 0 происходит менее чем за 1000 проходов резонатора, т.е. состояние ГСМ устанавливается очень быстро (рис. 6(а-д)). Кроме того, у лазера с гибридной синхронизацией мод импульс короче ( $\sim 3$  пс против  $\sim 5$  пс в отсутствии сдвига частоты). Отключение насыщающегося поглотителя не приводит к принципиальным изменениям в эволюции межимпульсного расстояния, что говорит о том, что механизм сдвига частоты вполне успешно может осуществлять синхронизацию мод и одновременно стабилизировать межимпульсное отталкивание.



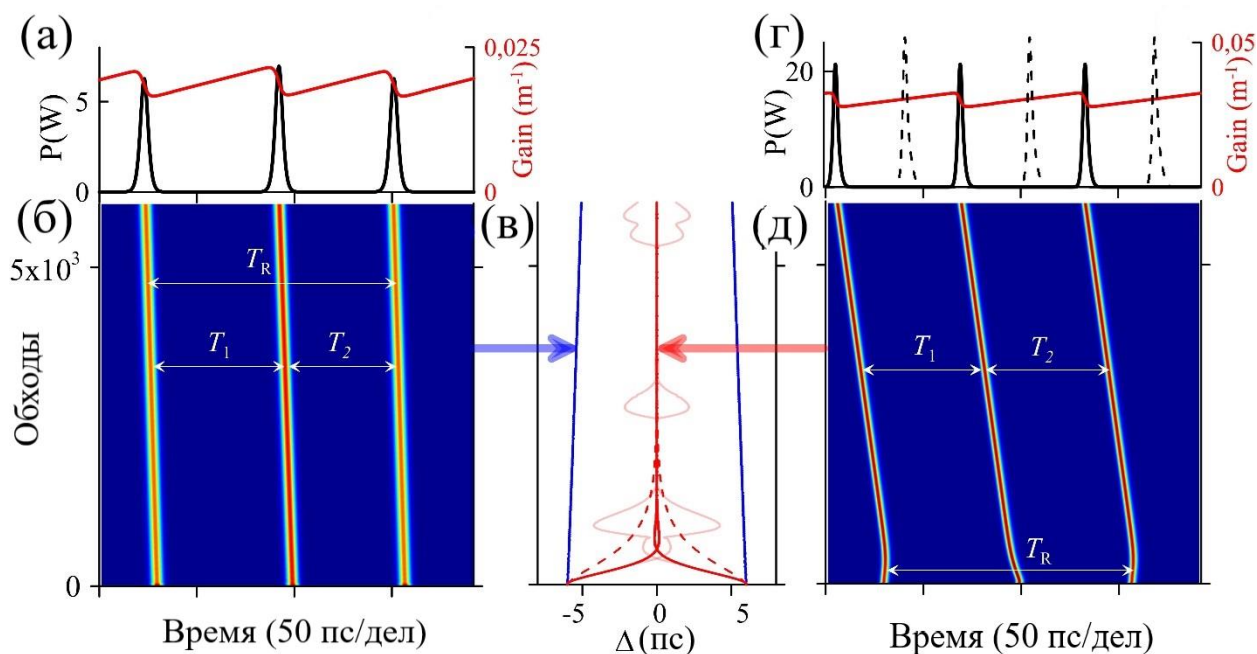


Рис. 6. Распространение импульсов при наличии насыщающегося поглотителя без сдвига частоты. Расположение импульсов и график усиления  $g(t)$  после 6000 проходов резонатора (а, г). Диаграмма эволюции импульсов в резонаторе (б, д). Эволюция разностей межимпульсных расстояний  $\Delta$  и  $-\Delta$  в модели без сдвига частоты (синие) и со сдвигом частоты (красные линии) (в).

В четвертой главе представлены результаты эксперимента с волоконным лазером со сдвигом частоты. С целью подтвердить теоретические предположения и результаты численного моделирования, были сконструирована схема, содержащая в качестве частото-сдвигающего элемента АОМ.

Была собрана модель кольцевого волоконного лазера (рис. 7), причем в ходе экспериментов было проведено сравнение двух вариантов схемы – с АОМ, обеспечивающим сдвиг частоты, и без АОМ.

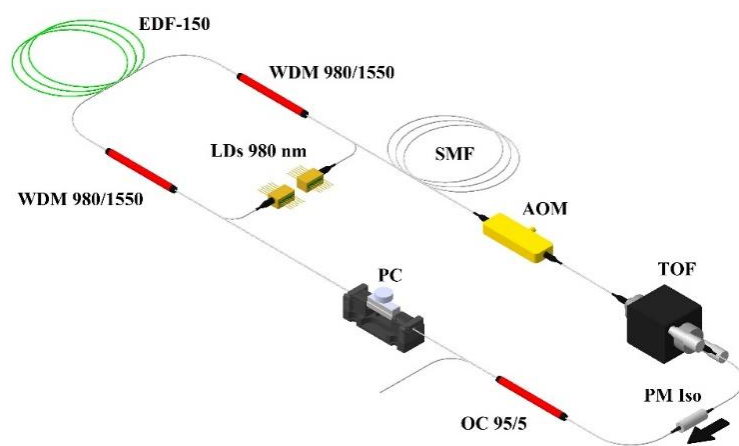


Рис. 7. Схема экспериментальной установки. EDF – волокно, легированное  $Er^{3+}$ , PC – контроллер поляризации, PM Iso – поляризационно-чувствительный изолятор, АОМ – акустооптический модулятор, обеспечивающий сдвиг частоты.

При включении в схему АОМ после ряда тестовых запусков было установлено, что синхронизация мод происходит в достаточно широкой полосе перестройки фильтра. Наилучшие результаты в итоге были получены, когда центральная длина волны фильтра была зафиксирована в области 1562 нм. Устойчивость генерируемой импульсной последовательности демонстрирует радиочастотный спектр, показанный на рис. 8 с различным разрешением. Отношение уровня сигнала к шумовому фону на развертке 3 кГц и разрешением 10 Гц составляет около 53 дБ, что показывает высокую устойчивость на временах порядка и более фундаментального периода, т.е. низкий уровень низкочастотного временного джиттера.

На спектре с разрешением 20 кГц (рис.8(в)) видна последовательность пиков межмодового шума, разделенных фундаментальной частотой  $f_T$ , что является характерным признаком ГСМ лазеров, возникающим вследствие корреляций между импульсами. Уровень подавления межмодового шума составляет около 38 дБ, что соответствует наиболее стабильным лазерам с гармонической синхронизацией мод [12].

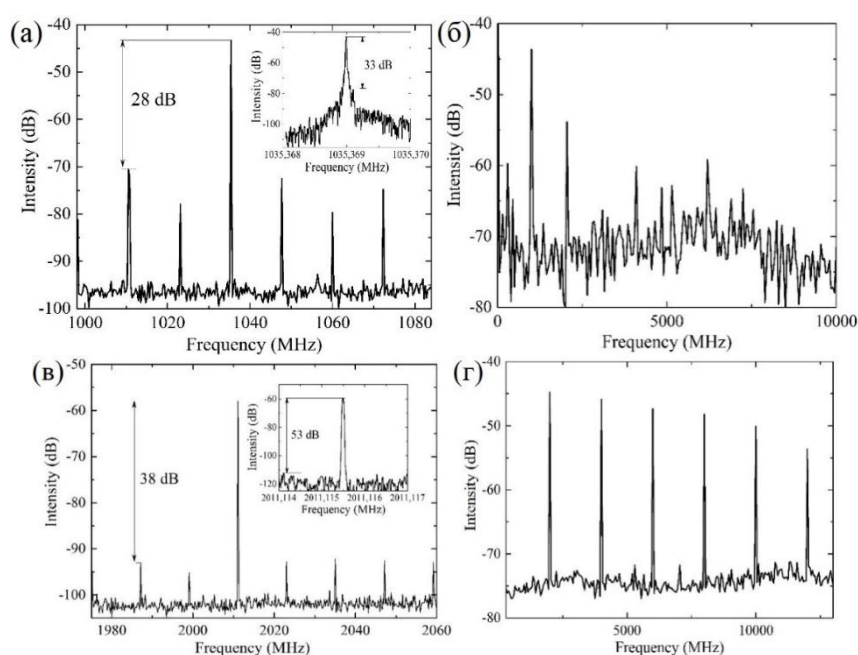


Рис. 8. Радиочастотные спектры с различным разрешением полученные в режиме ГСМ на частоте следования 1,035 ГГц в схеме без сдвига частоты: с разрешением 20 кГц, на вставке – с разрешением 10 Гц(а); с разрешением 50 МГц (б). На частоте следования 2,011 ГГц в схеме с АОМ: с разрешением 20 кГц, на вставке – с разрешением 10 Гц(в); с разрешением 50 МГц (з).

На крупномасштабном радиочастотном спектре с разрешением 50 МГц (рис. 8 (г)), видна последовательность пиков, разделенных частотой следования ( $\sim 2,01$  ГГц), причем дополнительные модуляции незначительны, а интенсивность пиков изменяется с частотой достаточно медленно. Эти признаки свидетельствуют об устойчивом гармоническом распределении импульсов в резонаторе и о малом высокочастотном временной флуктуации расстояния между импульсами.

В пятой главе представлен волоконный лазер, генерирующий УКИ на высокой частоте, достигнутой посредством точной настройки центральной полосы пропускания оптического фильтра, схема которого представлена на рис. 9.

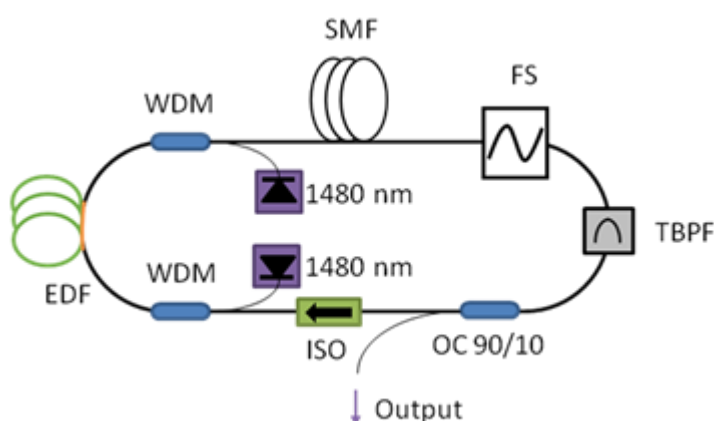


Рис. 9. Схема волоконного лазера с гармонической синхронизацией мод. PC – контроллер поляризации, FS – акустооптический модулятор в режиме сдвига частоты, TAPF – перестраиваемый фильтр, OC – выходной ответвитель.

Режим гармонической синхронизации мод, полученный 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. 10 (а)), при этом дополнительная подстройка поляризации не производилась.

На центральной длине волны пропускания фильтра 1546,5 нм получена импульсная последовательность с частотой следования 11,97 ГГц с высоким уровнем подавления межмодового шума  $> 40$  дБ. На длине волны пропускания фильтра 1545,5 нм была достигнута частота следования 13,01 ГГц, однако, вид РЧ спектра этой импульсной последовательности и

значительно меньший уровень межмодового шума свидетельствуют о ее слабой устойчивости (рис. 13 – верхний ряд). Для сравнения показаны также осциллограмма и РЧ спектр импульсной последовательности с частотой следования 8,95 ГГц, полученной в коротковолновой области пропускания фильтра (1529 нм) (рис. 11 – нижний ряд).

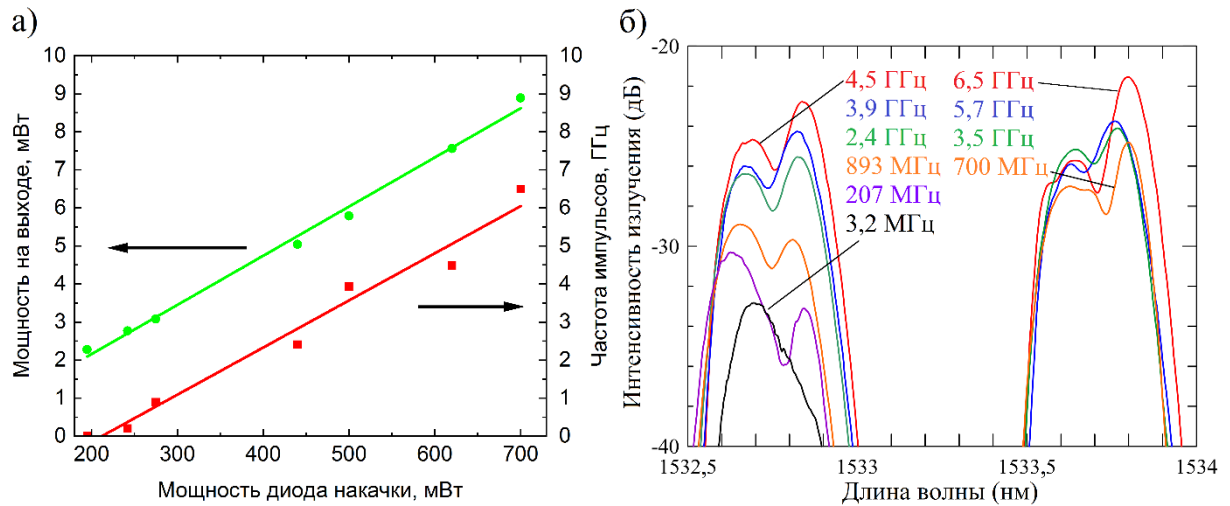


Рис.10. Выходная мощность и частота следования импульсов в зависимости от мощности накачки при центральной длине волны пропускания фильтра 1533,7 нм (а). Оптические спектры импульсных последовательностей при различных частотах следования для центральных длин волн пропускания фильтра 1532,7 нм и 1533,7 нм (б).

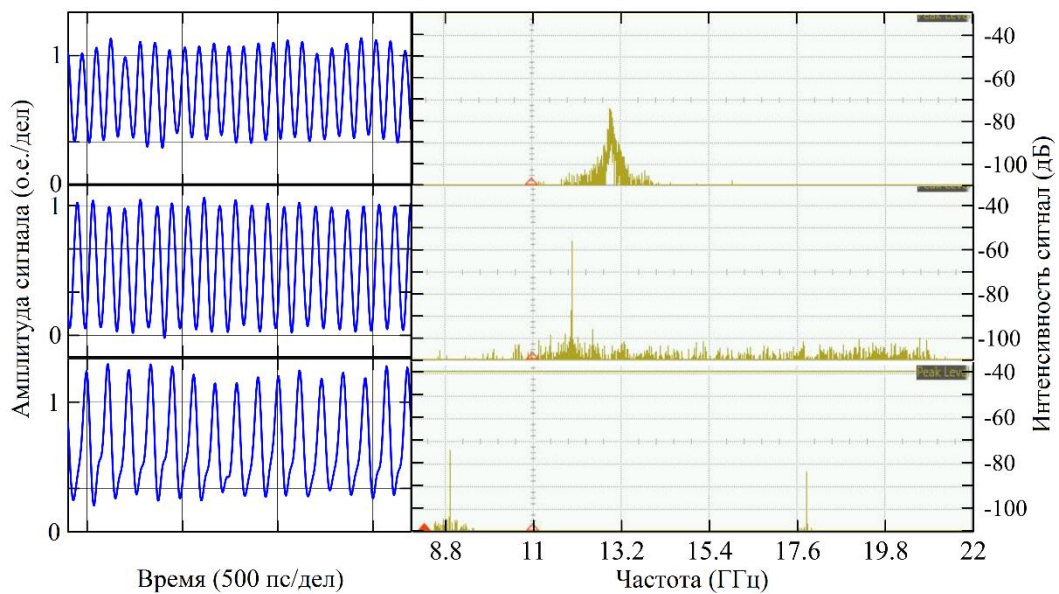


Рис. 11. Осциллограммы (слева) и РЧ спектры (справа) импульсных последовательностей с частотами следования 8,95 ГГц, 11,97 ГГц и 13,01 ГГц на центральной длине волны пропускания фильтра 1529 нм, 1546,5 нм и 1545,5 нм (снизу вверх) соответственно.

## Основные результаты и выводы

1. Экспериментально показано, что волоконные лазеры в линейной и кольцевой конфигурациях, работающие в режиме гармонической синхронизации мод на высоких ( $>1$  ГГц) частотах следования импульсов обладают относительно невысокой стабильностью импульсной последовательности. Уровень подавления межмодового шума в данных конфигурациях в среднем не превосходит 25-30 дБ, что ограничивает применимость лазеров указанного типа в ряде приложений. Из двух рассмотренных конфигураций наиболее перспективной для дальнейшей работы является кольцевая схема, использующая для синхронизации мод механизм нелинейного вращения плоскости поляризации и обеспечивающая меньшую длительность импульсов, более интенсивное межимпульсное отталкивание и более высокую частоту следования импульсов ( $>5$  ГГц без дополнительных средств стабилизации). Данная конфигурация в дальнейшем используется как база для теоретического анализа и численного моделирования при введении дополнительного частотно-сдвигающего элемента.

2. Теоретически показано, что динамическая система, описывающая взаимодействие и распределение солитонных импульсов внутри кольцевого лазерного резонатора, приходит к стационарной точке, соответствующей однородному расположению импульсов, при включении частотного сдвига значительно быстрее, чем в его отсутствие. Ускорение выравнивания межимпульсных расстояний при включении сдвига частоты отвечает повышению интенсивности межимпульсного отталкивания и стабилизации однородного периодического распределения импульсов в резонаторе. Проведенное численное моделирование подтвердило теоретические результаты.

3. Экспериментально показано, что предложенная схема волоконного кольцевого лазера с встроенным в резонатор акустооптическим модулятором, обеспечивающим сдвиг несущей частоты излучения, перспективна для

генерации стабильных последовательностей импульсов с низким уровнем межмодового шума. Показано также, что предложенная конфигурация обеспечивает достижение более высокой максимальной частоты следования импульсов и возможность локальной подстройки длины волны генерации. Эксперимент показал, что метод сдвига частоты обеспечивает повышение уровня подавления межмодового шума более чем на 10 дБ, что существенно повышает стабильность гармонической синхронизации мод в рассматриваемой конфигурации.

4. Показано, что применение сдвига частоты для стабилизации гармонической синхронизации мод позволяет значительно повысить максимальную частоту следования импульсов, генерируемых солитонными лазерами с синхронизацией мод за счет нелинейного вращения поляризации, поддерживая при этом высокий уровень подавления межмодового шума. Максимальная частота следования импульсов в предложенной конфигурации составила  $\sim 12$  ГГц при уровне подавления межмодового шума, превышающем 40 дБ, что соответствует высокой стабильности импульсной последовательности. Показано также, что использование сдвига частоты обеспечивает возможность перестройки длины волны генерации в широком диапазоне, что значительно увеличивает прикладной потенциал предложенной конфигурации волоконного лазера.

#### **Список публикаций по теме диссертации**

- A1. **Итрин П. А.** Высокочастотная гармоническая синхронизация мод в волоконном кольцевом лазере со сдвигом частоты при помощи акустооптического модулятора / П. А. Итрин, Д. И. Семенцов, А. Б. Петров, М. С. Козляков, В. А. Рибенек // Фотоника. – 2023. – Т. 13. - № 3.(ВАК)
- A2. Korobko, D. Soliton Raman shift wavelength tuning through the pump pulse polarization control / D. Korobko, I. Panyaev, **P. Itrin**, D. Sementsov, P. Mégret, I. Chapalo, A. Fotiadi // Specialty Optical Fibres / подред. К. Kalli, А. Mendez, P. Peterka. – SPIE, 2023. – Т. 12573 – С. 125730Z.(Scopus)

- A3. Korobko, D. Fine tuning of the repetition rate and stabilization of harmonically mode-locked fiber laser with CW component in the spectrum / D. Korobko, V. Ribenek, **P. Itrin**, D. Sementsov, P. Mégret, I. Chapalo, A. Fotiadi // Nonlinear Optics and Applications XIII / под ред. M. Bertolotti, A.V. Zayats, A.M. Zheltikov. – SPIE, 2023. – Т. 12569 – С. 125690H.(Scopus)
- A4. **Itrin P.A.**, Harmonic mode-locking fiber ring laser with a pulse repetition rate up to 12 GHz / P.A. Itrin, D.A. Korobko, D.A. Stoliarov, , M.A. Odnoblyudov, A.B. Petrov, R.V. Gumenyuk // Optics & Laser Technology. – 2021. – Vol. 133 – P. 106526. (Scopus)
- A5. Korobko, D.A. Stable harmonic mode locking in soliton fiber laser with frequency shift: theory and experiment / D.A. Korobko, D.A. Stoliarov, **P. Itrin**, V. Ribenek, A.A. Fotiadi, R.V. Gumenyuk // Nonlinear Optics and Applications XII: Nonlinear Optics and Applications XII / подред. A.V. Zayats, M. Bertolotti, A.M. Zheltikov. – Online Only, Czech Republic: SPIE, 2021. – С. 56.(Scopus)
- A6. Panyaev, I. Stabilizing DFB laser injection-locked to an external polarization maintaining optical fiber ring cavity / I. Panyaev, **P. Itrin**, D. Korobko, D. Sementsov, I. Chapalo, P. Mégret, A.A. Fotiadi // Optical Sensors 2023: Optical Sensors 2023 / подред. R.A. Lieberman, F. Baldini, J. Homola. – Prague, Czech Republic: SPIE, 2023. – С. 62.(Scopus)
- A7. Korobko, D.A. Birth and annihilation of solitons in harmonically mode-locked fiber laser cavity through continuous wave injection / D.A. Korobko, V.A. Ribenek, **P.A. Itrin**, A.A. Fotiadi // Optical Fiber Technology. – 2023. – Vol. 75 – P. 103216.(Scopus)
- A8. Korobko, D.A. Polarization maintaining harmonically mode-locked fiber laser with suppressed supermode noise due to continuous wave injection / D.A. Korobko, V.A. Ribenek, **P.A. Itrin**, D.A. Stoliarov, A.A. Fotiadi // Optics & Laser Technology. – 2023. – Vol. 162 – P. 109284.(Scopus)
- A9. López-Mercado, C. Brillouin optical time domain analysis with dual-frequency self-injection locked DFB laser / C. López-Mercado, **P. Itrin**, D.A. Korobko, I.O. Zolotovskii, A.A. Fotiadi // Optical Sensing and Detection VII:

Optical Sensing and Detection VII / подред. F. Berghmans, I. Zergioti. – Strasbourg, France: SPIE, 2022.(Scopus)

A10. Рибенек, В. А. Управление числом солитонов в волоконном лазере путем резонансной инжекции внешнего узкополосного излучения / В. А. Рибенек, **П. А. Итрин**, Д. А. Коробко, А. А. Фотиади // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52 – № 11 – С. 967–974. (ВАК)

A11. Рибенек, В. А. Волоконный лазер с гармонической синхронизацией мод: стабилизация и контроль частоты следования импульсов при помощи узкополосной компоненты в спектре / В. А. Рибенек, И. О. Золотовский, **П. А. Итрин**, Д. А. Коробко // Квантовая электроника. – 2022. – Т. 52 – № 7 – С. 604–609. (ВАК)

A12. Korobko, D.A. Supermode noise suppression in harmonically mode-locked fiber laser by continuous wave injection / D.A. Korobko, **P.A. Itrin**, V. Ribenek, D.A. Stoliarov, A.A. Fotiadi // Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications III: Fiber Lasers and Glass Photonics: Materials through Applications III / под ред. S. Taccheo, M. Ferrari, A.B. Seddon. – Strasbourg, France: SPIE, 2022. – С. 81. (Scopus)

A13. Korobko, D.A. Saturable absorber for ring fiber lasers on the base of coupler coated by CNTs / D.A. Korobko, D. Stolyarov, **P. Itrin**, V. Ribenek, A. Sysa, Y. Shaman, A. Fotiadi // Integrated Optics: Design, Devices, Systems and Applications VI: Integrated Optics: Design, Devices, Systems and Applications VI / под ред. P. Cheben, J. Čtyroký, I. Molina-Fernández. – Online Only, Czech Republic: SPIE, 2021. – С. 22.(Scopus)

A14. Stoliarov, D.A. Saturable absorber based on the fiber coupler coated by CNTs / D.A. Stoliarov, **P.A. Itrin**, D.A. Korobko, V.A. Ribenek, L.V. Tabulina, A.V. Sysa, Yu.P. Shaman // Optical Fiber Technology. – 2021. – Vol. 63 – P. 102524. (Scopus)

A15. Korobko, D. Stabilization of a Harmonic Mode-Locking by Shifting the Carrier Frequency / D. Korobko, D. Stoliarov, **P. Itrin**, V. Ribenek, M.



Odnoblyudov, A. Petrov, R. Gumenyuk // Journal of Lightwave Technology. – 2021. – Т. 39 – № 9 – С. 2980–2987. (Scopus)

A16. Волков, И. А. Управление режимами импульсной генерации в эрбиевом волоконном лазере с пассивной синхронизацией мод, основанной на нелинейном вращении плоскости поляризации / И. А. Волков, В. А. Камынин, **П. А. Итрин**, С. Н. Ушаков, К. Н. Нищев, В. Б. Цветков // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50 – № 2 – С. 153–156. (ВАК)

A17. Stoliarov, D.A. Linear cavity fiber laser harmonically mode-locked with SESAM / D.A. Stoliarov, **P.A. Itrin**, V.A. Ribenek, D.A. Korobko, A.A. Fotiadi // Laser Physics Letters. – 2020. – Т. 17 – № 10 – С. 105102. (Scopus)

A18. Филатова, С.А. Сравнение режимов синхронизации мод в гольмиевом волоконном лазере / С.А. Филатова, В.А. Камынин, Н. Р. Арутюнян, А. С. Пожаров, Е. Д. Образцова, **П. А. Итрин**, В. Б. Цветков // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48 – № 12 – С. 1113–1117. (ВАК)

A19. Трикшев, А. И. Пассивная гармоническая синхронизация мод в эрбиевом волоконном лазере / А. И. Трикшев, В. А. Камынин, В. Б. Цветков, **П. А. Итрин** // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48 – № 12 – С. 1109–1112. (ВАК)

### Список цитируемой литературы

1. Haus, H.A. Solitons in optical communications / H.A. Haus, W.S. Wong // Rev. Mod. Phys. – American Physical Society, 1996. – Vol. 68 – № 2 – P. 423–444.
2. Schliesser, A. Mid-infrared frequency combs / A. Schliesser, N. Picqué, T.W. Hänsch // Nature Photonics. – 2012. – Vol. 6 – № 7 – P. 440–449.
3. Fermann, M.E. Ultrafast fibre lasers / M.E. Fermann, I. Hartl // Nature Photonics. – 2013. – Vol. 7 – № 11 – P. 868–874.
4. Chernysheva, M., Rozhin, A., Fedotov, Y., Mou, C., Arif, R., Kobtsev, S. M., ... & Turitsyn, S. (2017). Carbon nanotubes for ultrafast fibre lasers. Nanophotonics, 6(1), 1-30.

5. Mao, D. Flexible high-repetition-rate ultrafast fiber laser / D. Mao, X. Liu, Z. Sun, H. Lu, D. Han, G. Wang, F. Wang // *Scientific Reports*. – 2013. – Vol. 3 – № 1 – P. 3223.
6. Korobko, D.A. Mode-locking evolution in ring fiber lasers with tunable repetition rate / D.A. Korobko, A.A. Fotiadi, I.O. Zolotovskii // *Optics Express*. – 2017. – Vol. 25 – № 18 – P. 21180.
7. Grudinin, A.B. Passive harmonic mode locking in soliton fiber lasers / A.B. Grudinin, S. Gray // *Journal of the Optical Society of America B*. – 1997. – Vol. 14 – № 1 – P. 144.
8. Kutz, J.N. Stabilized pulse spacing in soliton lasers due to gain depletion and recovery / J.N. Kutz, B.C. Collings, K. Bergman, W.H. Knox // *IEEE Journal of Quantum Electronics*. – 1998. – T. 34 – № 9 – C. 1749–1757.
9. Korobko, D.A. Long-range soliton interactions through gain-absorption depletion and recovery / D.A. Korobko, O.G. Okhotnikov, I.O. Zolotovskii // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40 – № 12 – P. 2862.
10. Semaan, G. Study of a harmonic mode lock stability under external continuous-wave injection / G. Semaan, A. Komarov, M. Salhi, F. Sanchez // *Optics Communications*. – 2017. – Vol. 387 – P. 65–69.
11. Dianov, E.M. Electrostriction mechanism of soliton interaction in optical fibers / E.M. Dianov, A.V. Luchnikov, A.N. Pilipetskii, A.N. Starodumov // *Optics Letters*. – 1990. – Vol. 15 – № 6 – P. 314.
12. Lecaplain, C. Multi-gigahertz repetition-rate-selectable passive harmonic mode locking of a fiber laser / C. Lecaplain, P. Grelu // *Optics Express*. – 2013. – Vol. 21 – № 9 – P. 10897.
13. Sobon, G. Passive harmonic mode-locking in Er-doped fiber laser based on graphene saturable absorber with repetition rates scalable to 2.22 GHz / G. Sobon, J. Sotor, K.M. Abramski // *Applied Physics Letters*. – 2012. – Vol. 100 – № 16 – P. 161109.
14. Mou, C. Passively harmonic mode locked erbium doped fiber soliton laser with carbon nanotubes based saturable absorber / C. Mou, R. Arif, A. Rozhin, S. Turitsyn // *Optical Materials Express*. – 2012. – Vol. 2 – № 6 – P. 884.