

Отзыв официального оппонента
на диссертационную работу Итрина Павла Аркадьевича
«Кольцевые волоконные лазеры с гармонической синхронизацией мод и
сдвигом частоты» на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Бурное развитие телекоммуникационных волоконных линий связи, происходящее с 1990 годов, вызвало потребность в создании импульсных лазерных источников с высокой (ГГц и выше) частотой повторения и длительностью отдельного импульса ~ 1 пс и менее. В этом направлении волоконные лазеры обладают существенными преимуществами по сравнению с конкурирующими технологиями твердотельных и полупроводниковых лазеров. 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. В диссертационной работе П.А. Итрина кольцевой волоконный лазер исследован как возможный генератор стабильных высокочастотных последовательностей коротких лазерных импульсов, при этом основное внимание уделяется реализации и стабилизации режима т.н. «гармонической» синхронизации мод, при которой частота следования импульсов волоконного лазера возрастает многократно из-за равномерного размещения импульсов в резонаторе лазера. В указанном выше смысле разработка новых конфигураций волоконных лазеров с гармонической синхронизацией мод и повышение стабильности выходных высокочастотных импульсных последовательностей является востребованной задачей, что делает

направление исследований Итрина П.А. весьма актуальным.

В диссертационной работе Итрина П.А. проведены глубокие исследования процессов, происходящих в резонаторе волоконных лазеров, оперирующих в режиме пассивной гармонической синхронизации мод, при этом основным результатом этих исследований является доказанное соискателем стабилизирующее воздействие частотного сдвига на выходные параметры высокочастотной импульсной последовательности, генерируемой лазером. В частности, в работе установлено, что частотный сдвиг, осуществляемый в резонаторе волоконного лазера, способствует подавлению уровня межмодового шума и снижению флуктуаций в межимпульсных расстояниях (другими словами, уменьшению временной нестабильности волоконного лазера с гармонической синхронизацией мод). Также в работе показаны значительные преимущества волоконного лазера, с гибридной гармонической синхронизацией мод, осуществляемой за счет совместного действия сдвига частоты и нелинейного вращения плоскости поляризации, перед стандартной конфигурацией, использующей лишь нелинейное вращение плоскости поляризации. Полученные в диссертационной работе результаты могут быть использованы при разработке ряда высокочастотных импульсных волоконных лазеров востребованных на практике.

Таким образом, работа Итрина П.А. обладает как научной новизной в области оптики, так и практической значимостью для разработки и применения новых волоконных лазерных систем.

Содержание диссертационной работы изложено на 108 страницах и состоит из введения, пяти глав (литературный обзор и четыре оригинальные главы), заключения, списка литературы. Основные результаты опубликованы автором в 19 научных трудах, опубликованных в ведущих рецензируемых научных журналах по лазерной физике, входящих в Перечень ВАК и индексируемых в базах WoS, Scopus и РИНЦ, а также представлены на международных и российских конференциях и семинарах. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Во введении обоснована актуальность исследования, указаны цель и задачи диссертационной работы, отмечены научная новизна и научно-практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту, описаны апробация, достоверность и личный вклад автора.

Глава 1 посвящена анализу сведений из научной литературы по теме исследования. В частности, в ней представлены описания основных характеристик волоконных лазеров и режимов их работы. Более подробно рассмотрен режим пассивной гармонической синхронизации мод (ГСМ), характеризующийся однородным «гармоническим» распределением импульсов по волоконному резонатору.

Глава 2 посвящена экспериментальному исследованию волоконных лазеров с пассивной гармонической синхронизацией мод, излучающих в телекоммуникационном диапазоне длин волн 1520 – 1580 нм, использующих активное волокно, легированное ионами эрбия. В главе описана работа двух вариантов волоконных лазерных схем с гармонической синхронизацией мод. Первая конфигурация основана на линейном резонаторе и для режима синхронизации мод в ней используется полупроводниковое насыщающееся зеркало. Вторая конфигурация основана на резонаторе кольцевого типа и синхронизации мод, осуществляемой при помощи нелинейного вращения поляризации. В кольцевой волоконной схеме был получен режим ГСМ с максимальной частотой следования импульсов 5,62 ГГц. Установлено, что существуют рабочие точки с возможностью перестройки лазера по гармоническим частотам на заданных длинах волн. В итоге соискателем был сделан вывод о перспективе применения кольцевой волоконной схемы для разработки волоконного лазера, оперирующего в режиме ГСМ, и достижения высокой частоты следования последовательности импульсов.

В главе 3 рассмотрены теоретические основы стабилизации режима гармонической синхронизации мод в солитонном лазере при помощи сдвига частоты. Приводятся теоретические расчеты, основанные на обобщенном нелинейном уравнении Шредингера, учитывающем эффекты фильтрации и

сдвига частоты лазерных импульсов от центра фильтра. Рассмотрена динамическая система двух взаимно отталкивающихся импульсов. Показано, что эта динамическая система, приходит к стационарной точке, соответствующей однородному расположению импульсов, при включении частотного сдвига значительно быстрее, чем в его отсутствие, т.е. сдвиг частоты является в данном случае активным дополнительным фактором стабилизации. Проведенное численное моделирование также подтвердило сделанный вывод о том, что включение сдвига частоты позволяет существенно снизить время установления ГСМ, т.е. время, необходимое для выравнивания расстояний между парой отталкивающихся импульсов, изначально размещенных на произвольных случайных позициях.

В главе 4 представлены экспериментальные результаты по достижению ГСМ в полностью волоконных лазерах телеком диапазона с перестраиваемым фильтром и синхронизацией мод на основе нелинейного вращения поляризации. Были сравнены схемы кольцевых волоконных лазеров со сдвигом и без сдвига частоты. В проведенном сравнении, в одной из конфигураций для осуществления частотного сдвига используется акустооптический модулятор (АОМ). Сравнимые солитонные лазеры близки по параметрам генерируемых импульсов, т.е. синхронизация мод в лазерах происходит схожим образом, однако, параметры гармонической синхронизации мод, осуществляемой при переходе к многоимпульсному режиму генерации свидетельствуют о доказанном стабилизирующем действии сдвига частоты. В частности, после включения в схему лазера АОМ было установлено, что гармоническая синхронизация мод происходит в широкой полосе перестройки фильтра, при этом лазер без АОМ приходит к режиму ГСМ только в очень узкой полосе перестройки, а его уровень межмодового шума в данном случае весьма высок. Стабилизирующий эффект сдвига частоты дополнительно подтверждается тем, что конфигурация с АОМ обеспечивает максимальную частоту следования в 2 раза более высокую, по сравнению с конфигурацией без частотного сдвига. Таким образом, можно сделать вывод о том, что

эксперимент подтвердил теоретические предсказания и результаты численного моделирования.

В главе 5 представлены результаты исследования экспериментальной конфигурации лазера со сдвигом частоты, в которой были получены высокие (более 10 ГГц) значения частоты следования выходных импульсов в режиме ГСМ при достаточно высоком уровне стабильности импульсной последовательности. Характеристики выходных импульсных последовательностей (длительность импульсов, частота следования, уровень межмодового шума) были проанализированы в зависимости от различных параметров лазерного резонатора (частотный сдвиг, полоса и диапазон пропускания фильтра). В результате исследования экспериментального образца был найден широкий диапазон перестройки, в котором, в частности, было получено указанное значение частоты следования импульсов и показано, что применение сдвига частоты позволяет значительно повысить максимальную частоту следования импульсов солитонных лазеров с гармонической синхронизацией мод за счет нелинейного вращения поляризации, поддерживая при этом высокий уровень подавления межмодового шума.

В заключение работы подведены итоги проведенных исследований и сформулированы основные результаты работы.

К их числу можно отнести следующие выводы:

1. В волоконном кольцевом лазере с пассивной гармонической синхронизацией мод, осуществляемой на основе нелинейного вращения поляризации, может быть реализована гибридная схема ГСМ, в которой действие сдвига частоты позволяет повысить стабильность генерации импульсной последовательности.
2. В экспериментальных конфигурациях волоконных лазеров с гармонической синхронизацией мод стабилизирующий сдвиг частоты можно осуществить при помощи акустооптического модулятора с рабочей частотой ~ 80 МГц, встроенного в волоконный резонатор.
3. Совместное использование перестраиваемого оптического фильтра и

акустооптического модулятора в составе резонатора позволяет настраивать оптимальную длину волны импульсной генерации, обеспечивающую наиболее высокий уровень подавления межмодового шума и максимально возможную частоту следования импульсов.

Диссертационная работа Итрина П.А. является законченным научным исследованием. Достоверность результатов обеспечивается тщательностью проведения экспериментов, использованием современного оборудования и применением современных теоретических представлений и методов обработки при анализе данных. Все основные результаты работы были опубликованы в ведущих научных журналах направления исследований и докладывались на международных и российских конференциях.

К недостатку работы следует отнести сам текст рукописи диссертации:

1. Не указана максимально достижимая частота выходных импульсов в режиме пассивной гармонической синхронизации мод методом сдвига частоты.
2. Отсутствие разделительных строк между рисунками, подписями к рисункам, заголовками разделов и таблицами. Без этих разделительных строк визуально текст рукописи очень тяжел для восприятия ввиду огромного количества информации на каждой странице рукописи.
3. В тексте рукописи присутствуют технические термины - англицизмы, например, «джиттер» - дрожание, которые должны быть объяснены (переведены) в тексте рукописи диссертации.
4. Отсутствие общего списка сокращений вначале текста рукописи.

Все указанные замечания не являются существенными, не отражаются на полученных результатах и не влияют на положительную оценку диссертационной работы. Тема исследования соответствует специальности 1.3.6. Оптика.

Диссертационная работа Итрина П.А. на тему «Кольцевые волоконные лазеры с гармонической синхронизацией мод и сдвигом частоты» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по стабилизации высокочастотной импульсной

последовательности и снижению уровня межмодового шума в волоконных лазерах, работающих в режиме пассивной гармонической синхронизации мод. В работе впервые продемонстрировано существенное снижение межмодового шума лазера с пассивной гармонической синхронизацией мод, осуществляемое за счет встраивания в резонатор волоконного лазера элемента, обеспечивающего сдвиг частоты – акустооптический модулятор. Работа удовлетворяет всем требованиям пунктов 9-11, 13, 14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации N 842 от 24 сентября 2013 г. в действующей редакции, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент:

кандидат физико-математических наук
по научной специальности 01.04.21 – Лазерная физика,
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

14.11.2023г.

Попов Сергей Михайлович

Фрязинский филиал ФГБУН Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН Россия, 141190, г. Фрязино Московской области, пл. Введенского 1; e-mail: chucheva@ms.ire.rssi.ru; телефон: +7(496) 5652430

Подпись Попова С.М. удостоверяю

Ученый секретарь

Фирс И.В.А. Котельникова РАН, д.ф.-м.н.

Чучева Г.В.

