

УТВЕРЖДАЮ

Проректор
Московского государственного университета
имени М.В. Ломоносова,
профессор



А.А. Федянин

А.А. Федянин

« » _____ 2015 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Комарова Андрея Константиновича “Динамика формирования и взаимодействия ультракоротких импульсов в лазерах с пассивной синхронизацией мод”, представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Диссертационная работа А.К. Комарова посвящена разработке теории и анализу нелинейной динамики формирования и взаимодействия ультракоротких импульсов света в лазерах с пассивной синхронизацией мод. Такие лазеры имеют широкое поле приложений в различных областях науки и техники. Постоянно расширяющийся спектр их применений требует дальнейшего совершенствования и развития этого типа генераторов. В настоящее время одно из основных направлений такого совершенствования связано с волоконными лазерами, отличающимися большим разнообразием режимов пассивной синхронизации мод в сочетании с уникальностью эксплуатационных характеристик. Создание теории, адекватно описывающей механизмы реализации различных режимов пассивной синхронизации лазерных мод, позволяет понять природу этих механизмов и является основой для развития методов управления режимами генерации и оптимизации параметров выходного излучения. В связи с этим **актуальность** диссертационной работы А.К. Комарова не вызывает сомнений.

Диссертация включает в себя введение, пять глав, заключение и список цитируемой литературы. Объем работы составляет 298 страниц, содержит 94 рисунка и 227 наименований в списке литературы.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель, основные положения, выносимые на защиту, обоснованы научная новизна и практическая значимость, приведены сведения об апробации результатов работы и основных публикациях автора.

В **первой** главе представлены результаты анализа пассивной синхронизации мод в простейшей модели распределенной внутрирезонаторной среды с квадратичной частотной дисперсией усиления, потерь, показателя преломления и кубической нелинейностью потерь и показателя преломления. Показано, что в рамках такой модели, возможно описание лишь двух генерационных режимов. В зависимости от нелинейно-дисперсионных параметров внутрирезонаторной среды реализуется либо режим генерации с одиночным ультракоротким импульсом в лазерном резонаторе, либо генерация с заполнением всего лазерного резонатора излучением. Такие широко наблюдаемые в эксперименте явления как многоимпульсная пассивная синхронизация мод и пороговый самостарт модовой синхронизации в рамках данной модели не описываются. Определены условия, при которых колоколообразный спектральный профиль одиночного импульса переходит в прямоугольный.

Вторая глава посвящена анализу режимов пассивной синхронизации лазерных мод с использованием более сложных моделей, учитывающих частотную дисперсию и нелинейность внутрирезонаторных элементов более высоких порядков, чем рассматривавшихся в первой главе. В рамках таких моделей обнаружены и исследованы механизмы, приводящие к пороговой зависимости самостарта пассивной синхронизации лазерных мод от интенсивности начального излучения и к эффекту квантования внутрирезонаторного излучения на отдельные идентичные солитоны. Установлена мультигистерезисная зависимость числа генерируемых импульсов от накачки. Показано, что лазерная генерация является мультистабильной: число импульсов в устанавливаемом режиме генерации зависит от начальных условий. Полученные результаты позволили понять механизмы реализации перечисленных генерационных особенностей многоимпульсной пассивной синхронизации мод, наблюдаемых в экспериментальных работах.

В **третьей** главе анализируется предложенная модель пассивной синхронизации мод волоконных лазеров с нелинейными потерями, основанными на технике нелинейного вращения поляризации излучения, ориентированная на широко используемые в экспериментальных исследованиях эрбиевые и иттербиевые генераторы. Широкие полосы усиления в сочетании с практически безинерционными нелинейными потерями, основанными на керровской нелинейности волокна,

возможность использования в качестве накачки полупроводниковых лазеров, высокая стабильность по отношению к техническим возмущениям волоконных резонаторов – всё это обеспечивает уникальность эксплуатационных свойств таких систем. Изучены генерационные особенности, обусловленные многоимпульсностью пассивной синхронизации мод. Дан анализ мультигистерезисным зависимостям числа импульсов в устанавливаемом режиме генерации от накачки и ориентационных углов фазовых пластин, обеспечивающих внутрирезонаторные нелинейные потери, формирующие ультракороткие импульсы. Исследованы генерационные особенности, связанные с конечным временем релаксации усиливающей среды – переходы между непрерывным режимом генерации, пиковой генерацией и пассивной синхронизацией мод. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с результатами эксперимента.

В **четвертой** главе представлены результаты анализа режимов связанных солитонов. Установлено, что энергия связи солитонов квантуется. При этом фазовые разности пиковых амплитуд двух солитонов в стационарных связанных состояниях близки к значениям 0 , π и $\pi/2$. Продемонстрирована возможность реализации “многосолитонных молекул” с изменением типов связи вдоль солитонного цуга. Выявлен механизм формирования мощных протяженных крыльев солитона, обусловленный дисперсионными волнами, испускаемыми солитоном из-за сосредоточенности нелинейных потерь, формирующих ультракороткие импульсы. Показано, что именно такие крылья отвечают за взаимодействие солитонов на больших расстояниях и за значительные энергии связи одиночных импульсов при образовании “солитонных молекул”. Полученные результаты позволили дать объяснение экспериментально наблюдаемому эффекту квантования межсолитонного расстояния при двухимпульсной пассивной синхронизации лазерных мод. Предсказанная возможность генерации высокостабильных цугов ультракоротких импульсов с эквидистантным расположением импульсов в цуге нашла свое подтверждение в экспериментальных работах. Полученные результаты представляют интерес для стабилизации информационных последовательностей импульсов в оптоволоконных линиях связи и разработки генераторов стабилизированных пар импульсов для спектроскопических исследований. Анализ связанных солитонных состояний проведен также для сосредоточенных нелинейных потерь на основе насыщающихся поглотителей. В качестве таких поглотителей в настоящее время используются различные наноматериалы: графен, углеродные нанотрубки, топологические изоляторы и др.

Пятая глава посвящена предложенным методам управления взаимодействием солитонов при многоимпульсной пассивной синхронизации лазерных мод. Характер взаимодействия солитонов (их притяжение или расталкивание) играет ключевую роль в реализации типа устанавливающегося режима генерации. Исследуются механизмы управления солитонным взаимодействием, связанные с узкополосной селекцией внутрирезонаторного излучения, с дополнительной инерционной нелинейностью показателя преломления, с инжекцией в лазерный резонатор узкополосного непрерывного излучения. Показано, что за счет таких механизмов возможна реализация гармонической пассивной синхронизации мод, при которой импульсы эквидистантно выстраиваются вдоль лазерного резонатора. Эти результаты представляют интерес для разработки генераторов ультракоротких импульсов с высокой тактовой частотой следования импульсов в выходном излучении (при обычном режиме пассивной синхронизации мод расстояние между импульсами определяется длиной резонатора, которая должна быть достаточно большой для реализации нелинейных потерь за счет слабой керровской нелинейности). В пятой главе также представлены результаты анализа диссипативного солитонного резонанса, при котором выход в генерацию новых импульсов с ростом накачки оказывается подавленным. Выявлен механизм такого подавления. Предсказанные закономерности в изменении (с ростом накачки) формы генерируемого импульса, его длительности, спектральных характеристик нашли свое подтверждение в экспериментальных исследованиях (H. Lin et al, *Laser Phys. Lett.*, **11**, 085102 (2014)). Полученные результаты представляют интерес для создания генераторов высокоэнергетических импульсов света. Механизм увеличения энергии генерируемых импульсов связан с подавлением многоимпульсности, в результате чего вся энергия накачки сосредотачивается в единственном внутрирезонаторном импульсе.

В заключении суммированы основные результаты диссертационной работы, из которых наиболее значимыми являются следующие:

- 1) Разработана теория генерации волоконных лазеров с нелинейными потерями, основанными на технике нелинейного поляризационного вращения, позволившая описать и исследовать характерные генерационные особенности волоконных лазеров: квантование внутрирезонаторного излучения на отдельные идентичные диссипативные солитоны, мультстабильную зависимость числа импульсов от начальных условий генерации, мультигистерезисную зависимость числа импульсов от накачки и ориентационных углов внутрирезонаторных фазовых пластин, пороговую зависимость самостарта пассивной синхронизации лазерных мод от интенсивности затравочного излучения.

2) Решена задача о квантовании энергии связи двух взаимодействующих солитонов в лазерах с пассивной синхронизацией мод.

3) Выявлен механизм возникновения мощных протяженных солитонных крыльев, связанный с дисперсионными волнами, излучаемыми солитонами из-за сосредоточенности нелинейных потерь, формирующих ультракороткие импульсы в лазерных системах.

4) Предложены механизмы управления режимами пассивной синхронизации мод, связанные с узкополосной селекцией внутрирезонаторного излучения, с дополнительной инерционной нелинейностью показателя преломления, с инъекцией в лазерный резонатор узкополосного непрерывного излучения.

5) Показано, что при нелинейно-дисперсионных параметрах лазера с пассивной синхронизацией мод, ограничивающих рост пиковой интенсивности формируемых импульсов и приводящих к их прямоугольной форме, происходит подавление выхода в генерацию новых импульсов при увеличении накачки. Установлено, что возникающий эффект связан с сужением спектра генерируемых импульсов.

Все указанные выше результаты получены впервые. Их **новизна** подтверждается приоритетными публикациями в ведущих журналах по соответствующей тематике и широким цитированием работ соискателя специалистами, работающими в данной области (индекс Хирша по системе Scopus равен 15).

Обоснованность и достоверность диссертационных результатов не вызывает сомнений, поскольку она обеспечена тщательным анализом исследуемых явлений, согласием результатов численных и аналитических подходов, корректностью их использования, сопоставлением с многочисленными экспериментальными данными, а также с теоретическими результатами аналогичных исследований, проводимых в ряде отечественных и зарубежных лабораторий, апробацией полученных результатов на отечественных и международных конференциях и их публикацией в ведущих отечественных и зарубежных научных журналах.

Научная значимость диссертационной работы состоит в выявлении общих закономерностей формирования и взаимодействия импульсов в лазерах с многоимпульсной пассивной синхронизацией мод, позволяющей дать адекватную интерпретацию многочисленным генерационным особенностям этого типа лазеров.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования ее результатов для разработки и совершенствования лазеров с пассивной синхронизацией мод, а также для оптимизации параметров их выходного излучения.

Апробация результатов, полученных в диссертационной работе, проведена на многочисленных научных российских и международных конференциях. Основные результаты диссертации опубликованы в 27 статьях реферируемых научных журналов, входящих в перечень ВАК, включая Physical Review, Optics Letters, Optics Communications, Optical Fiber Technology и другие. Публикации в полном объеме отражают результаты диссертационной работы. Автореферат полностью и точно отражает содержание диссертации.

Результаты диссертации Комарова А.К. могут быть рекомендованы для использования в НЦВО РАН, ИОФ РАН, ИЛФ СО РАН, ИПФ РАН, ФИАН и других организациях, занимающихся разработкой, технологией изготовления и применением генераторов ультракоротких импульсов света.

В качестве замечаний следует отметить:

1. В предложении на стр.18 допущено несоответствие понятий: «Реализация режимов лазерной генерации с длительностью световых импульсов всего лишь в два раза превышающих длину волны генерируемого излучения...». Тем не менее, следует отметить, что, в общем, диссертационную работу А.К. Комарова отличает исключительные чёткость и тщательность изложения её результатов.
2. Диссертационный список цитируемой литературы следовало бы дополнить работой: Н. Lin, С. Guo, S. Ruan, J. Yang, “Dissipative soliton resonance in an all-normal-dispersion Yb-doped figure-eight fibre laser with tunable output”, Laser Phys. Lett., **11**, 085102 (2014), в которой экспериментально подтверждаются предсказанные в диссертации генерационные закономерности пассивной синхронизации мод волоконных лазеров при диссипативном солитонном резонансе (Глава 5, §24, стр. 255 диссертации).

Сделанные замечания не снижают ценности полученных результатов и высокой оценки диссертационной работы.

Диссертационная работа А.К. Комарова выполнена на высоком научной уровне и вносит существенный вклад в актуальное направление исследований – нелинейную динамику формирования и взаимодействия ультракоротких импульсов в лазерах с пассивной синхронизацией мод.

Диссертационная работа А.К. Комарова “Динамика формирования и взаимодействия ультракоротких импульсов в лазерах с пассивной синхронизацией мод” соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук (пп. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ №842 от 24.09.2013 г.), а

ее автор Комаров Андрей Константинович заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Отзыв на диссертацию Комарова А.К рассмотрен на объединённом семинаре кафедры Общей физики и волновых процессов Физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова и Международного лазерного центра МГУ имени М.В. Ломоносова “ 20 ” марта 2015 г.

Директор МЛЦ МГУ,
Зав. кафедрой Общей физики и
волновых процессов Физического
факультета МГУ,
профессор



В.А.Макаров

Доктор физ.-мат. наук, профессор



В.Г.Тункин