

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Института ионно-плазменных  
и лазерных технологий имени У.А. Арифова  
АН Республики Узбекистан  
д.т.н. профессор \_\_\_\_\_ Ашуров Х.Б.

20.01.2025г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Муроди Халимджон Гафурзода на тему: «Физические основы управления временных характеристик в непрерывно действующих лазерах с насыщающимся поглотителем внутри резонатора», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния

Диссертационная работа выполнялась в рамках реализации перспективных планов научно-исследовательских работ кафедры общей физики и твердого тела ГОУ «Худжандский университет имени академика Бободжона Гафурова» 2021–2025 гг. по теме «Изучение физико-химических свойств композитных материалов и тяжелых элементов в почве и аэрозоля», по реализации объявленного 2020-2040 годов «Двадцатилетием изучения и развития естественных, точных и математических наук в сфере науки и образования» утвержденного Постановлением Правительства Республики Таджикистан от 30 июля 2020 года, №427.

Основная цель диссертационной работы состоит в исследовании физических процессов, достижения высокой эффективности режима генерации сверхкоротких световых импульсов использованием насыщающегося поглотителя, внутри резонатора непрерывных лазеров, при пассивной и активной синхронизации продольных мод.

**Актуальность темы выполненной работы.** Диссертационная работа Муроди Халимджон Гафурзода посвящена исследованию режима синхронизации продольных мод непрерывных лазеров, которые традиционно бывают активной или пассивной. Благодаря исследованиям физических процессов синхронизацией продольных мод непрерывных лазеров был достигнут логический предел длительности световых импульсов до  $3,8 \text{ фс}$  ( $10^{-12} \text{ с}$ ), который близок к одному периоду колебаний на длине волны  $800 \text{ нм}$  ( $10^{-9} \text{ м}$ ).

Совершенно новые условия генерации лазера, создаваемые при совмещении обеих методов, автором, исследован впервые и определен как режим комбинированной синхронизации продольных мод. Также следует,



отметь, что в работе исследуется один из уникальных случаев режима синхронизации мод, когда длительность световых импульсов на много меньше характерного времени насыщенного состояния поглотителя. В таком случае имеет место три пороговых условия генерации лазера при пассивной синхронизации мод, одна из которых устанавливает требование существования разницы условий насыщения усиливающей и поглощающей среды, определенная автором как отношение энергий насыщения этих сред. Оказалось, что этот параметр, связанный с процессами насыщения, определяется как оптическими свойствами усилителя и поглотителя, так и геометрией резонатора лазера, которую можно было варьировать при экспериментальном исследовании. Следует отметить, что основным критерием достижения предельно коротких световых импульсов является обеспечение высокой энергетической стабильности генерации лазера, который достигается, главным образом, процессами насыщения и прежде всего насыщающегося поглотителя. С другой стороны расширение направлений практического применения сверхкоротких импульсов, прежде всего, в сферах обработки информации и телекоммуникации, требует создание лазеров в новых диапазонах длин волн, где нужны новые поглощающие элементы, в том числе на основе квантовых точек. Таким образом, тема диссертации «Физические основы управления временных характеристик в непрерывно действующих лазерах с насыщающимся поглотителем внутри резонатора», связанный оптимизацией и разработкой критериев выбора насыщающегося поглотителя внутри резонатора непрерывных лазеров для обеспечения его эффективного действия является весьма актуальной.

**Новизна исследования и полученных результатов.** На основе численных расчетов режима пассивной синхронизации мод непрерывного лазера и экспериментальных исследований пассивной синхронизации мод непрерывного аргонового лазера с газоразрядным поглотителем автором получена зависимость временных и энергетических характеристик и стабильности излучения лазера, от разницы в условиях насыщения усиливающих и поглощающих сред, определяющий, в какой степени быстрее происходит насыщение поглотителя по сравнению с усилителем в пределах формируемых импульсов. Для аргонового лазера, в режиме пассивной синхронизации мод достигнут интервал между импульсами  $T = 5 \div 15$  нс, средняя мощность генераций  $P_{cp} = 0.3 \div 0.5$  Вт, при ненасыщенном поглощении  $K_0 = 0.4 \div 0.6$ , длительность генерируемых световых импульсов  $\tau_p = 100$  пс.

Существование второго порога режима пассивной синхронизации мод, сформулирован как критерий выбора насыщающегося поглотителя по спектральным характеристикам для заданной усиливающей среды лазера при комбинированной синхронизации мод. Впервые получено экспериментальное подтверждение существования критерия выбора насыщающегося поглотителя по оптическим характеристикам, для лазера на красителе родамин 6Ж работающего в режиме активной синхронизации мод, который позволяет в два



раза уменьшить длительность световых импульсов и обеспечить повышение стабильности работы лазера. Эффективное действие введенного в струю красителя родамин 6Ж в качестве насыщающегося поглотителя рассчитанной концентрации красителя малахитовый зелёный позволяет длительности световых импульсов 700 фс.

Результатами численных расчетов установлена однозначная зависимость спектральных и временных характеристик сложной временной структуры излучения лазера, который, определен как режим одновременной синхронизации нескольких групп продольных мод. Численные расчеты автора по исследованию влияния импульсов сложной структуры, подтверждают дополнительное смещение нижней границы процесса абляции за счёт действия дополнительного импульса сателлит. Высокая стабильность режима синхронизации мод, тесно связанная процессами интерференции, критерием, которого является когерентность, указывает на возможность применения сверхкоротких световых и электромагнитных импульсов как источника сжатой информации. Фурье спектр световых импульсов, рассчитанные автором, показывает однозначную связь с значением двоичного кода определяющий состав и частоты синхронизованных продольных мод. Таким образом, на основе численных расчетов, в диссертационной работе, показаны возможности одновременной синхронизации нескольких групп продольных мод, эффективного действия импульсов сложной структуры при абляции и формирование сжатой информации в лазерах с синхронизацией продольных мод, каждый из которых получает экспериментальное подтверждение в современных исследованиях.

**Значимость для науки и практики полученных автором результатов.** Теоретическая значимость исследования заключается в совершенствовании и математических моделей, непрерывных лазеров в режиме генерации сверхкоротких световых импульсов с целью повышения эффективности процессов насыщения в достижении предельных энергетических и временных параметров. На основе, однозначной корреляции временных и спектральных характеристик, появление дополнительных импульсов на периоде объясняется, как следствие режима одновременной синхронизации нескольких групп продольных мод. Поскольку к таким группам могут относиться, например, одновременная синхронизация нескольких поперечных мод, одновременная синхронизация на нескольких длинах волн или диапазон генерации, то данное заключение может иметь широкое применение в информационных системах для повышения количества передаваемой информации за единицу времени, на заданной длине волны или диапазона длин волн связи. Также предложен способ формирования световых импульсов, как носителя информации, за счет насыщающихся поглотителей внутри резонатора лазера с синхронизацией мод, обладающий уникальным свойством, занимать меньше интервал времени при большем объеме размещенной информации в каждом световом импульсе.

Практическая значимость исследования состоит из полученных автором новых научных результатов содержащие конструктивные предложения по



разработке и созданию новых источников сверхкоротких электромагнитных импульсов, повышения эффективности процесса лазерной абляции, а также способов уплотнения информации.

Установлено, что верхняя граница режима синхронизации мод, кроме таких традиционных параметров как величина поглощения, имеет не менее сильную зависимость от разницы в условиях насыщения, для количественной оценки которого можно использовать соответствующее соотношение. Автором было достигнуто улучшение временных и энергетических характеристик, а также стабильности излучения непрерывного  $Ar^+$  лазера с пассивной синхронизацией мод за счет разницы в условиях насыщения усиления и поглощения, достигаемой выбором геометрии резонатора и местоположением активных элементов.

Наличие гистерезиса, который наблюдается вблизи границ режима синхронизации мод лазера с насыщающимся поглотителем внутри резонатора, является признаком устойчивости, позволяющий их практическое применение для систем обработки информации.

Использование газоразрядного поглотителя, разработанный автором на базе конструкции аргонового лазера, обеспечивает масштабируемость и технологическое преимущество при создании промышленного лазера сверхкороткими световыми импульсами.

Установленная автором не критичность точного согласования длин резонаторов лазера на красителе и лазера накачки в режиме комбинированной синхронизации мод имеет непосредственное практическое применение. Для повышения стабильности режима генерации сверхкоротких световых импульсов следует использовать насыщающийся поглотитель внутри резонатора лазера с активной синхронизацией мод, имеющих цель применения в системах передачи и обработки информации.

**Личный вклад автора.** Представленная работа имеет строго направленную и последовательно решенную задачу, который указывает на высокую значимость научного консультанта, который оказывал консультативное содействие. Согласно приведенным в работе данным, автором созданы две лазерные системы, это непрерывный аргоновый лазер и на красителе. Все результаты диссертационной работы, имеют строго определенный стиль, имеющий тонкий и комплексный характер, указывающий на то, что получены лично автором.

**Рекомендации по использованию результатов работы.** Результаты диссертации могут быть использованы при разработке и создании непрерывных лазеров работающих в режиме пассивной и комбинированной синхронизации мод с целью генерации предельно коротких импульсов излучения в виде электромагнитного поля. Также их можно использовать при разработке и создания систем обработки информации, исследования и управления процессов, связанных с высокоточным измерением расстояния, времени и частоты, как в фундаментальной науке, так и прикладных задачах.

Результаты диссертации можно использовать при чтении спецкурсов и написании научных работ для магистрантов, аспирантов и студентов старших



курсов физических, математических и телекоммуникационных специальностей учебных заведений.

**Публикации по результатам работы.** Основные результаты диссертации опубликованы в 37 научных работах, 19 из которых составляют научные статьи в журналах из перечня рецензируемых научных журналов ВАК при Президенте Республики Таджикистан и ВАК Министерства науки и высшего образования РФ, одна из которых включен в перечень базы данных Web of Science и Scopus и одна монография. В тезисах докладов и материалах международных и республиканских конференций, опубликовано 17 работ. Поэтому можно заключить, что обоснованность и достоверность научных результатов диссертационной работы безусловна и не вызывает сомнения.

**Структура и содержание работы.** Работа состоит из введения, общей характеристики исследований, шести глав, обсуждения полученных результатов, выводов и списка литературы (318 наименования работ). Общий объем диссертации составляет 266 страниц компьютерного набора, содержащий 77 рисунка и 4 таблиц.

Во введении обоснована актуальность исследования, с указанием имеющихся достижений по теме диссертации и приводится общая характеристика работы, содержащая цель, задачи, объект, предмет, теоретические основы, научную новизну, теоретическую значимость, практическую значимость, степень достоверности исследования и положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертационного исследования начинается с обзора теоретических и экспериментальных работ по генерации сверхкоротких световых импульсов, преимущественно в непрерывных лазерах в условиях, когда длительность получаемых импульсов много меньше времен релаксации усиливающего и поглощающего элемента. Оказалось, что для генерации непрерывной последовательности сверхкоротких световых импульсов нужны выполнение трёх условий, одной из которых определяется как отношение энергий насыщений усиливающей и поглощающей элементов. Поскольку это условие определялось отношениями геометрических и оптических сечений, а также коэффициентом определяющим другие условия разницы плотности энергии в усилителе и поглотителе, были проведены численные расчеты по определению области существования генерации световых импульсов в непрерывных лазерах. В результате установлено, что разница в условиях насыщения усиливающего и поглощающего элемента, сильнее проявляется при достижении предельных энергетических характеристик.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию режима пассивной синхронизации мод непрерывного аргонового лазера, параметры которой соответствуют модели проведенных численных расчетов в первой главе. Разработан газоразрядный поглотитель, для пассивной синхронизации мод мощного, непрерывного лазера предназначенного для синхронного возбуждения непрерывного лазера на красителе. Исследовано радиальное распределение поглощения в разрядном канале, влияние местоположения поглотителя на временную структуру излучения и стабильность генерации



лазера. Высокая стабильность режима пассивной синхронизации мод объясняется как результат разного знака дисперсии усилителя и поглотителя для продольных мод резонатора лазера. Результатами измерений дана оценка стабильности частот между соседними продольными модами равной 1 кГц, ограниченной аппаратной функцией измерительного прибора.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию влияния разницы, в условиях насыщения на энергетические и временные характеристики режима стационарной пассивной синхронизации  $Ag^+$  лазера. Разница в условиях насыщения создавалась выбором геометрических сечений пучков за счет использования разной конфигурации и радиусов кривизны зеркал резонатора  $Ag^+$  лазера. Экспериментально получено полное подтверждение сильного влияния разницы в условиях насыщения на предельные временные и энергетические характеристики лазера в режиме пассивной синхронизации мод. Для аргонового лазера автором был достигнут минимальная длительность световых импульсов равной 100 пикосекунд ограниченной спектральной шириной лазерного перехода.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию влияния насыщающегося поглотителя вводимого внутрь резонатора лазера, на красителе работающего в режиме синхронного возбуждения. Для синхронного возбуждения, использован аргоновый лазер, созданный автором и работающий в режиме пассивной синхронизации мод. Исследователь, по спектральным характеристикам, выбрал насыщающийся поглотитель, для известного лазера, где получил полное экспериментальное подтверждение правильности такого метода, показав, эффективное действие поглотителя малахитового зеленого на определенном участке спектра генерации красителя родамин 6Ж. В результате реализации совместного действия активной и пассивной синхронизации мод предложен новый способ комбинированной синхронизации мод, позволивший автору перейти на новый фемтосекундный диапазон минимальной длительности световых импульсов ( $0,7 \pm 0,2$  пс). Также, впервые, экспериментально и теоретически установлено повышение стабильности режима активной синхронизации мод при дополнительном введении внутрь резонатора лазера насыщающегося поглотителя. Таким образом, автором получено полное подтверждение существования критерия выбора эффективного насыщающегося поглотителя по спектральным характеристикам для заданного лазера, который имеет важное практическое значение.

Пятая глава посвящена определению механизма формирования дополнительных импульсов на периоде, за пределами области существования, на основе численных расчетов корреляции временных, спектральных и энергетических характеристик импульсов, поскольку они характеризуется высокой стабильностью. Известно, что в системах телекоммуникации, каждый импульс является источником информации. Поэтому заключение этой главы, что, возможна одновременная синхронизация нескольких групп продольных мод в одном лазере, имеет практическое значение. Каждому дополнительному световому импульсу прописывается результат синхронизации



дополнительного набора продольных мод. Установлено, что смена каждой временной структуры вызывает соответствующее характерное изменение спектра сигнала, определяя информационную эффективность и механизм формирования импульсов.

Шестая глава посвящена применению излучения лазера с синхронизованными модами для формирования много битной информации в цифровых системах и обработки твердых тел.

Известно, что режим синхронизации продольных мод лазера можно рассматривать как реализацию принципа суперпозиции для набора эквидистантных продольных мод. Если набор продольных мод задается в соответствии с двоичным кодом, то спектр формируемого светового импульса становится носителем этого двоичного кода. Поскольку режим синхронизации мод является достаточно устойчивым состоянием, автором предложен, использовать его для формирования много битной информации, где каждая элементарная единица информации состоит из одной продольной моды резонатора.

Энергетические характеристики лазера с синхронизацией мод, при сложной временной структуре, являются много выше чем временной структуры одиночных импульсов. Численными расчетами автором показана однозначная зависимость размерных откликов, воздействия излучения лазера сложной временной структуры, в процессе абляции.

В конце диссертации отдельным разделом изложен краткий анализ данных экспериментального и теоретического исследования.

*Достоинства и недостатки диссертационной работы.* Следует подчеркнуть, что полученные в диссертации результаты имеют достаточно весомые утверждения по одной из сильно развивающейся области науки, изложены в логической последовательности. Графические данные построены использованием графических возможностей компьютерных программ, которое указывает на то, что они оцифрованы. Достигнуто хорошие качественные согласия численных расчетов с результатами эксперимента.

Вместе с тем работа не лишена некоторых недостатков, к которым можно отнести:

1. На некоторых рисунках не все используемые (на рисунке) обозначения пояснены в тексте диссертации, например, на рисунке 4.1.

2. Диссертацию можно было бы немного сократить, например, вместо главы 6 можно было бы добавить 1-2 параграфа в главу 5, тем более, что по результатам главы 6 сделано всего два кратких вывода о возможности применения результатов предыдущих глав, а результаты последней главы были опубликованы в основном в местных журналах.

3. В работе не рассмотрены перспективы методики пассивной синхронизации продольных мод в газоразрядной трубке, заполненной аргоном.

4. В работе упомянуто, что при синхронизации мод синхронизированная волна является носителем одного бита информации. Следовательно, чем больше объем информации в одном таком импульсе, тем



меньше его длительность. Это уникальная возможность сжатия информации, которую на сегодняшний день не применяют в квантовых компьютерах. Было бы хорошо, если бы более детально описывался механизм сжатия информации при синхронизации волны внутри резонатора.

5. В работе встречаются стилистические ошибки, есть также замечания по оформлению таблицы. В целом диссертационная работа написана грамотно, но отдельные сокращения в тексте затрудняют чтение работы.

Высказанные замечания не снижают достоинств диссертационной работы Х.Г. Муроди, ее основные положения достаточно полно раскрыты в автореферате и публикациях диссертанта.

На основе вышесказанного можно сделать следующие выводы.

1. Тема диссертации Х.Г. Муроди важна и актуальна. Работу следует отнести к специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

2. Основные результаты диссертации являются новыми. Решен ряд достаточно значимых задач лазерных источников сверхкоротких импульсов и режима синхронизации продольных мод в непрерывных лазерах.

3. В целом диссертация является завершенным научным исследованием, вносящим значимый вклад в физику лазерных систем при синхронизации мод.

4. Автореферат диссертации полно и правильно отражает ее содержание.

5. Представленные в диссертации результаты будут востребованы при создании современных систем генерации и управления, сверхкоротких световых и электромагнитных импульсов. Она представляет огромный интерес для научных и образовательных учреждений занимающихся исследованиями быстро протекающих процессов. Также их можно использовать при разработке и создания систем обработки информации, исследования и управления процессов, связанных с высокоточным измерением расстояния, времени и частоты, как в фундаментальной науке, так и прикладных задачах. Результаты диссертации можно использовать при чтении спецкурсов и написании научных работ для магистрантов, аспирантов и студентов старших курсов физических, математических и телекоммуникационных специальностей учебных заведений.

**Заключение.** На основании вышеприведенного можно заключить, что диссертационная работа «Физические основы управления временных характеристик в непрерывно действующих лазерах с насыщающимся поглотителем внутри резонатора» представленная на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния, является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований разработаны аргументированные теоретические и практические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие лазерной физики, что соответствует требованиям ВАК при президенте



Республики Таджикистан в том числе соответствующим пунктам Порядка присуждения учёных степеней (в редакции постановления Правительства Республики Таджикистан №295 от 26 июня 2023 года), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук, а её автор Муроди Халимджон Гафурзода заслуживает присуждения ему искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - Физика конденсированного состояния.

Отзыв на диссертацию и автореферат обсужден на заседании расширенного научного семинара Института Ионно-плазменных и лазерных технологий, протокол № 1 от 20 января 2025 года.

Отзыв на диссертационную работу Муроди Халимджон Гафурзода на тему: «Физические основы управления временных характеристик в непрерывно действующих лазерах с насыщающимся поглотителем внутри резонатора» подготовил ведущий научный сотрудник института Тажибаев И.И.

**Председатель расширенного научного семинара Института ионно-плазменных и лазерных технологий им. У. А. Арифова АН Республики Узбекистан**  
д.т.н., профессор



**Курбанов М.Ш.**

**Секретарь научного семинара,**  
к.ф-м.н., СНС института



**Тажибаев И.И.**

**Контактная информация:** ул. Дурмон йули 33, 100125, город Ташкент, Узбекистан. Сайт организации: <https://iplt.uz>, E-mail: [ashurov@iplt.uz](mailto:ashurov@iplt.uz).  
Телефон: +998 71 262 31 69, факс: +998 71 262 32 54

Подписи Курбанова М.Ш. и Тажибаева И.И. заверяю.

