

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Муроди Халимджон Гафурзода «Физические основы управления временных характеристик в непрерывно действующих лазерах с насыщающимся поглотителем внутри резонатора» представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Актуальность темы. Диссертационная работа Муроди Халимджон Гафурзода на тему: «Физические основы управления временных характеристик в непрерывно действующих лазерах с насыщающимся поглотителем внутри резонатора» посвящена исследованиям одной из ключевых элементов лазерных систем работающих в режиме синхронизации продольных мод, способные генерировать сверхкороткие световые импульсы. Логический предел длительности световых импульсов ограниченный несколькими периодами колебаний электромагнитных волн видимого диапазона было достигнуто благодаря эффективному действию насыщающегося поглотителя внутри резонатора непрерывных лазеров. Одновременно с этим введение насыщающегося поглотителя обеспечивает высокую стабильность режима синхронизации продольных мод непрерывных лазеров используемых в качестве уникального инструмента для фундаментальных исследований и практических задачах.

Каждый этап значимых достижений в области генерации сверхкоротких световых импульсов имеет свои задачи, которые открывают все новые и новые области знаний и практических применений. Нынешний этап развития данной области не является исключением, а наоборот отмечается резкое повышение интереса, как исследователей так разработчиков систем практического применения источников сверхкоротких электромагнитных импульсов. Следует отметить, что длительность световых импульсов не ограничивается временем релаксации насыщающегося поглотителя, а определяется процессами насыщения, где сильное влияние имеют ряд важных параметров, таких как геометрия резонатора, положение поглотителя, её оптические характеристики, сложная временная структура излучения, когда на периоде существуют не один, а несколько импульсов.

Таким образом, можно с уверенностью утверждать, что тема исследователя, где решаются задачи связанные с оптимизацией и разработкой критериев выбора насыщающегося поглотителя внутри резонатора непрерывных лазеров, и обеспечение его эффективного

действия является, востребованной, своевременной и, безусловно, актуальной.

Степень новизны и достоверность научных положений и выводов. На основе глубокого понимания процесса формирования световых импульсов в непрерывных лазерах автором был корректно выбран механизм, имеющий наиболее сильное влияние на предельные энергетические и временные характеристики. Экспериментальные зависимости временных и энергетических характеристик подтвердили влияние разницы в условиях насыщения усиливающих и поглощающих сред, определяемой как параметр S равной отношению энергии насыщения усилителя к энергии насыщения поглотителя. Параметр S , зависит от геометрии резонатора и оптических свойств усилителя и поглотителя, определяющий, в какой степени быстрее происходит насыщение поглотителя по сравнению с усилителем в пределах формируемых импульсов. На основе экспериментальных исследований установлено существование порогового значения разницы в условиях насыщения усиливающей и поглощающей среды и определен критерий выбора насыщающегося поглотителя для заданного типа лазера. Следует особо отметить, что существование данного критерия автором доказано на основе экспериментального исследования, режима комбинированной синхронизации мод, непрерывного лазера на красителе. Другим значимым результатом данного исследования является экспериментально доказанная возможность существования коротких световых импульсов излучения лазера на красителе в режиме комбинированной синхронизации мод в области отрицательных расстройек длин резонаторов лазера на красителе и лазера накачки, получившие полное качественное подтверждение результатами теоретических численных расчетов. Данный результат исследователя можно отнести к категории научного открытия, поскольку это было доказано впервые и находит практическое применение как способ, который повышает стабильность режима синхронизации продольных мод.

Численными расчетами, исследователем доказаны механизмы высокой стабильности одновременной синхронизации нескольких групп продольных мод, экспериментальное подтверждение которых получено в лазерах с одновременной синхронизацией продольных мод на нескольких частотах, используемых в современных телекоммуникационных системах для повышения скорости и объема передачи информации. Значимым достижением исследователя в данном направлении является установленная однозначная зависимость спектра

формированного импульса от кодированного состава синхронизованных продольных мод. Также следует отметить, что высокая стабильность сложной временной структуры излучения лазера позволяет использовать их для лазерной абляции и численные расчеты подтверждают дополнительное смещение нижней границы за счет действия второго дополнительного импульса.

Основными положениями, выносимые на защиту, по данной исследовательской работе, можно считать следующие утверждения:

- Для пассивной синхронизации мод, в случае медленного поглотителя, когда длительность импульса много меньше времен релаксации поглощения и усиления, важнейшим параметром является. Установлено, что предельная плотность энергии излучения в поглотителе и усилителе находятся в функциональной зависимости от разницы в условиях насыщения усиления и поглощения, выражаемой параметром S , от величин ненасыщенного поглощения – K_0 , ненасыщенного усиления – G_0 , времен релаксации усиливающих и поглощающих сред.
- Установлены существование порога режима пассивной синхронизации мод по разнице в условиях насыщения усилителя и поглотителя, критерий выбора насыщающегося поглотителя по спектральным характеристикам и оптимальной геометрии резонатора для лазеров, работающих в режиме пассивной и комбинированной синхронизации мод.
- Для случая аргонового лазера с пассивной синхронизацией мод с помощью газоразрядного поглотителя показано существование оптимального значения параметра S .
- При комбинированной синхронизации мод непрерывного лазера на красителе использование насыщающегося поглотителя приводит к дополнительному укорочению длительности генерируемых световых импульсов, повышению стабильности режима генерации лазера и возможности генерации световых импульсов минимальной длительности в области отрицательных расстройок длин резонаторов лазера на красителе и лазера накачки.
- При условии генерации насыщающегося поглотителя повышается стабильность и энергетические характеристики лазера с синхронизацией продольных мод, которую можно использовать для уплотнения информации в виде светового импульса, длительность которого обратно пропорционально количеству синхронизованных продольных мод лазера.

- Сложная временная структура световых импульсов спутеллит формируемых в области высоких энергетических характеристик излучения лазера с синхронизацией мод позволяет повысить эффективность воздействия при абляции твердых тел.

Научная и практическая значимость результатов работы.

Научная значимость исследования, заключается в глубоком исследовании влияния процессов насыщения на режим генерации сверхкоротких световых импульсов, с целью достижения предельных энергетических и временных параметров. В случае формирования импульсов спутеллит показан однозначная корреляция временных, спектральных и стабильности режима генерации лазера с синхронизацией мод и обоснована возможность одновременной синхронизации нескольких групп продольных мод. Поскольку длительность световых импульсов обратно пропорционально количеству синхронизованных продольных мод предложен уникальный способ формирования световых импульсов, как носителя информации. Численными расчетами установлена возможность повышения энергетической эффективности воздействия светового импульса сложной временной структуры, которые, как правило, формируются в области высоких энергетических показателей лазеров с синхронизованными модами, для процесса абляции.

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.

Для непрерывных лазеров с насыщающимся поглотителем, установлено, что кроме условия порога генерации, существуют пороговые условия нижней и верхней границы области существования синхронизации продольных мод.

Впервые установлено наличие гистерезиса вблизи порога генерации лазера с насыщающимся поглотителем внутри резонатора, а также вблизи верхней границы области существования режима синхронизации продольных мод, указывающего на высокую стабильность режима генерации лазера.

В результате экспериментальных исследований показана возможность улучшения временных и энергетических характеристик и 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.

Разработана конструкция газоразрядного поглотителя для пассивной синхронизации мод Ar^+ лазера, исходя из экспериментальных исследований радиальной зависимости величины ненасыщенного поглощения в трубках с различными диаметрами разрядного канала.

Экспериментально подтверждено существование критерия выбора оптимального насыщающегося поглотителя по спектральным характеристикам для синхронизации мод конкретно выбранного лазера. Выбранный таким образом краситель малахитовый зеленый, для комбинированной синхронизации мод лазера на красителе родамин 6Ж, позволил вдвое уменьшить длительность генерируемых световых импульсов (до $0,7 \pm 0,2$ пс).

Установлено, что не критичность точного согласования длин резонаторов лазера на красителе и лазера накачки в режиме комбинированной синхронизации мод, приводит к повышению стабильности характеристик излучения лазера на красителе при таком режиме работы.

Численные расчеты, по теоретической модели лазера на красителе при активной синхронизации мод с добавлением насыщающегося поглотителя, с учетом разницы в условиях насыщения, качественно полностью подтверждают экспериментальные результаты по комбинированной синхронизации мод родамина 6Ж с помощью красителя малахитового зеленого.

Публикации результатов диссертации.

Основные результаты диссертации опубликованы в 37 научных работах, 19 из которых 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. 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.

Краткое описание работы. Диссертационная работа оформлена, в соответствии с требованиями ВАК при Президенте Республики Таджикистан 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 75 рисунка и 4 таблицы.

Во введении обосновывается актуальность темы, определяется степень изученности темы проведением краткого исторического обзора, дается общая характеристика выполненной диссертационной работы.

Первая глава диссертационной работы посвящена обзору теоретических и экспериментальных работ и численному расчету генерации сверхкоротких световых импульсов при стационарном режиме синхронизации мод в лазерах непрерывного действия. Анализируются временной и спектральный подход к теории синхронизации продольных мод непрерывного лазера. Определяются пороговые условия генерации световых импульсов, длительность которых много меньше времени релаксации как усиливающей, так и поглощающей среды. В таком случае, для формирования непрерывной последовательности коротких световых импульсов в лазерах с пассивной синхронизацией мод, определены три пороговых условия. Показано влияние условия насыщения на процесс генерации сверхкоротких световых импульсов в лазерах непрерывного действия. Установлено, что важным звеном является существование разницы в условиях насыщения усиливающей и поглощающей сред, определяемой параметром S . Исследовано влияние параметров лазера на границы существования, режима синхронизации мод, непрерывного лазера. Область существования определяется исходя из заданных значений ненасыщенного поглощения и линейных потерь путем выбора значения ненасыщенного усиления согласно пороговым условиям генерации одиночных на периоде импульсов.

Вторая глава посвящена экспериментальному исследованию режима пассивной синхронизации мод с помощью газоразрядного поглотителя внутри резонатора аргонового лазера. При кратном положении поглотителя режим синхронизации мод отличается повышенной стабильностью временных характеристик и большей мощностью в излучении. Разница в условиях насыщения обеспечивается одновременной встречей двух световых импульсов внутри поглотителя, в то время когда эти импульсы по отдельности проходят усиливающую среду. Наличие трех пороговых условий в лазерах с пассивной синхронизацией мод экспериментально доказано появлением гистерезиса вблизи порога генерации. Таким образом, был создан насыщающийся поглотитель кратное местоположение которого обеспечивал генерацию световых импульсов по парно встречающихся в ее центре.

Третья глава посвящена экспериментальному исследованию влияния разницы, в условиях насыщения усиливающего и поглощающего элементов на энергетические и временные характеристики режима стационарной пассивной синхронизации аргонового лазера. Одновременным увеличением

сечения пучка в усилителе и уменьшением в поглотителе создаётся условие более сильного насыщения поглощения в момент прохождения световых импульсов, что характеризует увеличение глубины модуляции, регистрируемый как улучшение стабильности, достижение более коротких длительностей и большей мощности световых импульсов. Было найдено, что наилучшие характеристики в излучении получаются при достижении предельной плотности энергии в поглотителе, ограничиваемой сменой временной структуры излучения. Таким образом исследователем было достигнуто как теоретическое так и экспериментальное подтверждение значимого влияния создаваемой разницы в условиях насыщения усилителя и поглотителя на предельные временные и энергетические характеристики непрерывных лазеров в режиме пассивной синхронизации продольных мод.

Четвертая глава диссертации посвящена исследованию комбинированной синхронизации мод лазера на красителе родамин 6Ж при использовании в качестве насыщающегося поглотителя из порошка малахитового зеленого. Экспериментально показана возможность выбора насыщающегося поглотителя по спектральным характеристикам, для получения эффективного сжатия длительности генерируемых световых импульсов, при комбинированной синхронизации мод лазера на красителе. Впервые экспериментально обнаружено повышение стабильности излучения лазера в режиме комбинированной синхронизации мод, связанное с увеличением глубины модуляции и появлением горизонтального участка в зависимости полуширины автокорреляционной функции генерируемых световых импульсов от величины рассогласования длины резонаторов. Достижение высокой стабильности генерации сверхкоротких световых импульсов при введении насыщающегося поглотителя внутри резонатора лазера с активной синхронизацией мод является подтверждением возможности эффективного повышения временных энергетических характеристик. Данный способ, впервые, исследователем был определен как режим комбинированной синхронизации мод.

Пятая глава посвящена численному расчету корреляции временных, спектральных и энергетических характеристик импульсов с точки зрения их применения в системах цифровой обработки информации. Однозначная связь между спектральными и временными характеристиками периодического сигнала, определяемого преобразованиями Фурье, позволяет проводить численные расчеты спектра любого периодического сигнала и наоборот рассчитать временную структуру любой формы спектра. Сравнение результатов численных расчетов показывают возможность интерференции нескольких, а значит и множества групп гармонических колебаний. Это в

свою очередь представляет собой, режим синхронизации, множества групп продольных мод непрерывных лазеров.

Шестая глава посвящена разработке способов применения излучения лазера с синхронизованными модами для формирования много битной информации в цифровых системах и обработки твердых тел. Численными расчетами показана однозначная зависимость кодирования состава продольных мод и спектра формируемых таким образом световых импульсов, а также временных и размерных откликов воздействия излучения лазера сложной временной структуры в процессе абляции.

В заключение приводится обсуждение полученных результатов и в разделе выводы перечислены все научные результаты диссертации.

Автореферат диссертации полностью отражает, основное содержание диссертации, оформлен в соответствии с предъявляемыми требованиями. При анализе работы существенных недостатков, как по научному содержанию, так и по тексту, способных негативно повлиять на оценку качества, работы не выявлено.

Положительные и отрицательные стороны диссертационной работы. Объем проведенных экспериментальных исследований является достаточным и в полной мере соответствует теме диссертации и поставленной цели. Задачи исследования, изложенные в работе, полностью решены. Выводы изложены последовательно, логично и аргументировано, основаны на содержании проведенного исследования, характеризуются высокой степенью значимости лазерной науки и техники.

В диссертации имеются следующие недостатки.

1. Предлагаемая, автором, феноменологическая модель пассивной синхронизации мод учитывает параметры только аргонового лазера.

2. По результатам экспериментальных исследований не проводится анализ степени эффективности разницы в условиях насыщения по сравнению с величиной ненасыщенного поглощения.

3. В результатах, приведенных на рисунках 3.10 и 3.11, не были фиксированы точки перехода на сложную временную структуру, как это видно на рисунке 3.5.

4. В расчетах процесса абляции не учитывается периодическая последовательность воздействия импульсов сложной структуры, имеющее место в непрерывных лазерах с синхронизацией продольных мод.

Однако указанные замечания и недостатки работы носят больше рекомендательный характер и несколько не умаляют достоинств диссертационной работы.

«Физические основы управления временных характеристик в непрерывно действующих лазерах с насыщающимся поглотителем внутри резонатора», является завершённой квалификационной работой, отвечает всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям и соответствует пунктам 33-35 «Порядка присуждения учёных степеней», Приложение 2 к постановлению Правительства Республики Таджикистан от 30 июня 2021 года № 267 (в редакции постановления Правительства Республики Таджикистан от 26.06.2023, №295), а её автор Муроди Халимджон Гафурзода заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.07 - физика конденсированного состояния.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,
профессор кафедры теоретической
физики физического факультета
Таджикского национального университета,
по специальности 01.04.07-физика
конденсированного состояния



Солихзода Д.К.

Подпись официального оппонента,
д.ф.м.н., проф. Солихзода Д.К.
подтверждаю:

Начальник управления кадров
и специальных работ ТНУ



Тавкиев Э.Ш.

10.02.25