

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

*На правах рукописи*

Архипов Ростислав Михайлович

**Предельно короткие и униполярные импульсы в когерентных оптических процессах**

Научная специальность - 1.3.6. Оптика

Диссертация в виде научного доклада  
на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Научный консультант:  
д-р физ.-мат. наук, профессор,  
академик РАН Н.Н. Розанов

Санкт-Петербург

2024

## **Структура работы**

Текст состоит из двух основных частей.

Первая часть содержит следующие разделы: обоснования актуальности исследования, степень разработанности темы, научная новизна, степень достоверности и независимые экспертные оценки результатов, апробация работы, положения, выносимые на защиту и список публикаций соискателя.

Вторая часть работы содержит текст научного доклада соискателя, где сформулированы основные научные проблемы, на решение которых были нацелены исследования соискателя, перечисляются основные и наиболее значимые результаты, опубликованные в работах соискателя, список литературы.

## СОДЕРЖАНИЕ

**Часть I****Основные положения**

Обоснование актуальности.....	5
Степень разработанности темы .....	8
Степень достоверности и независимые экспертные оценки результатов .....	12
Апробация .....	13
Независимые экспертные оценки результатов работ .....	14
Практическая значимость .....	16
Цели и задачи исследования .....	17
Положения, выносимые на защиту .....	18
Основные научные результаты .....	20
Список публикаций с основными научными результатами соискателя.....	22

**Часть II****Научный доклад**

Введение.....	42
О существовании униполярных импульсов в оптике.....	45
Электрическая площадь импульса, ее физический смысл .....	46
Правило сохранения электрической площади и его проверка .....	46
Получение квазиуниполярных импульсов .....	47
Субцикловые импульсы в экстремальной нелинейной оптике – самокомпрессия и самоостановка света.....	49
Атомная мера электрической площади .....	52
Интерференция электрических площадей импульсов .....	53
Формирование решеток разности заселенностей и волн поляризации под действием униполярных и субциклового импульсов .....	54
Применение униполярных импульсов в голографии.....	58
Оптический эффект Ааронова-Бома и униполярные импульсы .....	59

Теоретическое описание режима когерентной синхронизации мод (КСМ).....	60
Правила подобия для лазеров .....	61
Эксперименты по демонстрации режима КСМ .....	64
Особенности режима КСМ в титан-сапфировом лазере .....	68
Экстремальные события в системе диссипативных солитонов самоиндуцированной прозрачности. Эксперимент и теория.....	68
Главные итоги работы и перспективы.....	72
Список литературы.....	75

## Часть I

### Основные положения

#### Обоснование актуальности

В естественных науках, оптика и смежные разделы, связанные с использованием света и электромагнитного излучения в других диапазонах спектра, всегда занимали важную и особую роль. Начиная с работ Ньютона, которые положили начало формированию научной картины мира, свет для человека был не только источником информации об видимом им мире, оптические исследования дали информацию о микромире, невидимым глазом - строении вещества, позволили изучать происходящие в нем процессы. Изучение электричества и магнетизма позволило понять природу электромагнитных явлений и начать практически использовать их на практике, что привело к развитию радиотехники, электроники. Оптические методы сыграли решающую роль в создании двух наиболее важных научных теорий в современной физике – квантовой механики и теории относительности. На данный момент времени существуют бесчисленные применения оптических приборов в химии, биологии, медицине и других отраслях. Вся совокупность полученных научных результатов обеспечила базу для крайне быстрого развития информационно-коммуникационной сферы, которая за крайне короткий исторический срок уже радикально изменила и будет продолжать менять повседневную жизнь людей, экономику, культуру и общественные отношения.

На всех этапах развития физики всегда возникали задачи получить импульсы электромагнитного излучения как можно меньшей длительности. Существуют две основные причины, которые поддерживали интерес к укорочению импульсов излучения. Первая, короткие вспышки света позволяли все более детально исследовать самые разнообразные процессы, получать мгновенные фотографии развития быстропротекающих явлений. Был проделан путь от импульсов длительностью в мили- и микросекунды, которые создавали нелазерные источники света, до длительностей в фемто- и аттосекундном диапазоне, которую удалось достичь за счет использования лазеров. Вторая – изучение воздействия света на вещество. Лазерное излучение обладает высокой направленностью, монохроматичностью. Накапливая энергию в усиливающей среде лазера, оказалось возможным в режимах модуляции добротности и синхронизации мод высвечивать ее в течение крайне короткого времени. Фокусируя излучение лазеров, удалось

получить световые поля с крайне высокой напряженностью поля. Это открыло новый раздел оптики – нелинейную оптику.

В наносекундном импульсе типичного твердотельного лазера, действующего в режиме модулированной добротности, содержится порядка миллиона периодов колебаний поля. В импульсах лазеров, при пикосекундных длительностях, которые были достигнуты за счет применения режима синхронизации мод 40 лет назад, было тысяча циклов. В современных типичных фемтосекундных лазерных системах, световые импульсы содержат десятки колебаний. Однако, все же это большие длительности. Рекордные значения составляют два-полтора цикла. Такие импульсы являются предельно короткими, так как в них имеется цикл колебаний.

Необходимо упомянуть об оценке той роли в развитии физики работ, выполненных еще в середине 80-х годов Жераром Мору и Д. Стрикленд, которым в 2018 году была присуждена Нобелевская премия за «метод генерирования высокоинтенсивных ультракоротких оптических импульсов».

Отметим, что понятие «предельно короткий» импульс, который использовался в наших работах, и в названии данной диссертации, имеет смысл в привязке к диапазону длин волн. Поэтому одноцикловый импульс в ИК диапазоне будет длиннее импульса в видимом диапазоне. Как можно сокращать длительность предельно короткого импульса? Очевидно, что его можно попробовать «сжать», то есть сместить его в более коротковолновый диапазон спектра. Например, импульс фемтосекундного диапазона длительностей сместится в аттосекундный диапазон, то есть из видимой области в УФ область.

Существует иной путь. Предельно короткий одноцикловый импульс можно сразу сократить в два раза, если из него удалить один полупериод колебаний поля. Такой импульс кажется весьма необычным, и он никак не похож на привычные световые импульсы, состоящие из многих или нескольких циклов колебаний. Чем этот импульс радикально отличается от известных, можно ли его получить и какими необычными свойствами он будет обладать, как его можно использовать?

Действительно, ни в одном современном учебнике по оптике и лазерной физике не найти упоминания об униполярных световых или лазерных импульсах. Традиционные источники света, такие как, например, известные лазеры, не генерируют такое излучение. В излучателях квантового характера испускание света происходит при переходах между дискретными уровнями энергии атомов и молекул (или зонами энергии в твердом теле) в результате процессов, которые имеют конечную и достаточно большую в атомных

масштабах времен длительность. С точки зрения квантовой механики процесс излучения является результатом пребывания квантовой системы в так называемом суперпозиционном состоянии. В случае дипольного излучения система ведет себя подобно осциллирующему диполю, которой совершает много циклов колебаний. Осцилляции приводят к излучению и потере энергии в процессе перехода из состояния с большей энергией в состояние с меньшей энергией. Подобная интерпретация перехода между уровнями энергии используется в полуклассической теории взаимодействия света с веществом при описании процессов когерентного взаимодействия.

С этой точки зрения поглощение света между уровнями в квантовой системе также происходит не одномоментно. Для того чтобы процесс происходил эффективно, частота излучения должна совпадать или быть вблизи частоты перехода в квантовой системе. Не одномоментно происходит и процесс индуцированного излучения в лазере. Таким образом, мы имеем дело с выраженными резонансными процессами, в которых оптическое излучение в условиях резонансов достаточно медленно в масштабах времени атомных систем раскачивает «осцилляторы».

Появление интенсивных лазерных монохроматических полей позволило сократить число циклов поля в световом импульсе, но не свело их к единичным циклам или половине циклов. Поэтому существует мнение, что полуцикловые импульсы вряд ли практически реализуемы в оптическом и смежных диапазонах.

Однако, если обратиться к электродинамике, не существует каких-либо фундаментальных запретов на существование униполярного электромагнитного излучения. Здесь заметим, что в радиотехнике, где длины волн электромагнитного излучения значительно больше, чем в оптических диапазонах, однополярные импульсы применяют в так называемой сверхширокополосной радиолокации. В отличие от обычных локаторов, где импульсы заполнены несущей частотой, антенны радиолокаторов излучают короткие униполярные импульсы.

Учитывая электромагнитную природу как радиоизлучения, излучения в видимого света, так и в других областях спектра, можно иметь униполярные импульсы в соответствующих диапазонах. Проблемы здесь в источниках такого излучения. Поскольку, как уже отмечалось, в оптике излучение атомов и молекул формируется в резонансных процессах, то сформировалось мнение о невозможности получения импульсов с длительностью в половину периода колебаний в оптическом и прилегающих диапазонах. Для реализации таких импульсов, с точки зрения уравнений Максвелла, нужны источники,

в которых бы возникали однонаправленные импульсы тока с длительностями сравнимыми с периодом колебаний поля в данном диапазоне. Такой процесс, который подразумевает мгновенный разгон и торможение зарядов, кажется практически не осуществимым.

Однако, только на первый взгляд подобные процессы не реализовать с использованием современной техники. Недавние предложения и исследования соискателя и соавторов показали как возможность получения униполярных и квазиуниполярных импульсов, имеющих характерный однополярный всплеск поля одной полярности, так и возможность управления их формой. В частности, была показана возможность получения однополярных импульсов необычной формы – прямоугольной и треугольной – в оптическом и терагерцовом диапазоне частот, возможность их интегрирования и дифференцирования.

Униполярные импульсы позволяют быстро и в одном направлении за малый промежуток времени передать механический импульс, как свободному заряду, так и связанному заряду в атоме, молекуле. Это открывает новые перспективы применения таких импульсов для сверхбыстрого управления свойствами квантовых систем, ускорения зарядов, голографии со сверхвысоким временным разрешением. Наконец, когда длительность полуволнового импульса становится короче периода оборота электрона по боровской орбите в атоме водорода, стандартные теории взаимодействия такого излучения с веществом (теория Келдыша и т.п.) становятся не применимы и требуют пересмотра.

Сказанное делает актуальным как изучение способов получения униполярных субцикловых импульсов, так их взаимодействия с квантовыми системами, что и является предметом настоящего исследования соискателя. При этом взаимодействие с квантовыми системами происходит в рамках их когерентного взаимодействия, то есть необходимо учитывать конечное время затухания поляризации квантовых переходов в среде, которое имеет большую длительность, чем длительность импульсов излучения.

### **Степень разработанности темы**

Работы над материалом, вошедшим в данную диссертацию, начались в 2011 году, когда соискатель работал над кандидатской диссертацией “Моделирование режимов синхронизации мод в лазерах”. Здесь он столкнулся с ограничением на длительность и период следования импульсов в лазерах с пассивной синхронизацией мод, в которых для модуляции потерь в резонаторе используют монолитные полупроводниковые структуры из

квантовых точек в качестве усиливающей и поглощающей сред. К одной части такой структуры прикладывалось прямое напряжение смещения, и среда выступала в качестве усиливающей среды, к другой части прикладывалось обратное напряжение смещения, и она выступала в роли насыщающейся поглощающей среды. Лазер такого типа компактен, длина его резонатора составляет всего несколько мм, а период следования импульсов в нем десятки пикосекунд (частота повторения десятки-сотни ГГц). Энергетические структуры усилителя и поглотителя подобны. Их параметры, а это квантовые точки, в принципе допускают вариации, обеспечивающие генерацию в разных спектральных диапазонах от видимого до ИК.

Однако, теоретически достигаемая длительность импульсов ограничивалась рамками теоретического рассмотрения, которое рассматривало единственный механизм модуляции потерь – насыщающееся поглощение. То есть исследователи сами ограничили себя и исключили пути сокращения импульсов. В таких приближениях поглощающие и усиливающие среды взаимодействовали с излучением без учета возможности реализации когерентного характера взаимодействия со светом. Это значит, что теоретическое описание ограничивалось длительностями импульсов, которые были больше времени релаксации поляризации  $T_2$ . Время  $T_2$  в таких структурах при комнатной температуре составляло от сотни fs до нескольких ps. Поэтому теоретические модели, которые использовались для описания таких лазеров, исключали саму возможность уменьшения длительности импульса ниже указанного предела.

Автор активно занялся проработкой идеи о том, что преодолеть указанные выше ограничения, которые накладывают ширины линий поглотителя и усилителя на длительность импульса, можно в режиме, когда взаимодействие света с ними происходит когерентно. Действительно эффект самоиндуцированной прозрачности (СИП), открытый Мак Колом и Ханом, возникает, когда длительность импульса мала, меньше времени  $T_2$ , т.е. спектр такого импульса шире, чем ширина линии поглощения (при однородном уширении линий). Эта идея не вызвала в то время одобрения и поддержки в научном сообществе. Среди аргументов против нее были, в частности, и такие. Например, экспериментальные сложности, которые сопровождали наблюдение эффекта СИП в различных средах, которые не позволяют его применить во внутррезонаторном варианте. Также имели место и методические сложности у исследователей-экспериментаторов, связанные с пониманием механизмов когерентного взаимодействия излучения с веществом. Прежде всего, это тот факт, что в таком случае формально спектр импульса оказывается шире спектра поглощения поглотителя. Наконец, отсутствие на тот момент каких-либо успешных

экспериментальных работ в этом направлении также не способствовало развитию интереса у исследователей к этой тематике. Эти проблемы отображены в недавнем обзоре соискателя журнале “Квантовая электроника” [65a] (здесь и далее буква “a” после номера публикации означает, что данная ссылка содержится в списке публикации автора диссертации. В противном случае процитированная публикация содержится в общем списке литературы).

В то время имели место лишь немногочисленные теоретические работы, в которых делались попытки убедительного теоретического обоснования таких режимов в лазере. Здесь надо отметить работу В.В. Козлова [101], который рассмотрел однородную смесь из двухуровневого поглотителя и усилителя, который моделировал реальный лазер, и показал возможность возникновения импульса с длительностью короче времени  $T_2$  за счет формирования  $2\pi$  импульса СИП в поглотителе и  $\pi$  импульса в усилителе при двукратной разнице дипольных моментов перехода в поглотителе и усилителе. Словосочетание “coherent mode-locking” (CML) и его русский перевод «когерентная синхронизация мод» (КСМ) из названия статьи стало потом общеупотребительным термином в научной литературе для названия данного типа синхронизации мод.

Однако, помимо оптимистического вывода о снятии ограничения на длительность, другой вывод был крайне неприятен – автор утверждал, что такой режим не может быть самостартующим и для развития генерации в режиме когерентной синхронизации мод необходимым является дополнительный лазер, который создавал бы затравочный импульс для возникновения режима. Такой вывод в случае реализации режима требовал бы значительного усложнения эксперимента. В сравнении с уже имевшимися титан-сапфировыми лазерами, где при отсутствии самостарта режим коротких импульсов в несколько циклов колебаний удалось получить без внешнего инициирующего лазера лишь за счет начальной модуляции параметров резонатора, режим когерентной синхронизации мод уже не вызывал значительного интереса исследователей.

Первым шагом, который удался соискателю, это теоретическая демонстрация самостартующего характера режима когерентной синхронизации мод (КСМ), причем не в экзотической ситуации смеси поглощающей и усиливающей среды, а в случае реального лазера, где поглотитель и усилитель имеют конечные размеры и разнесены в пространстве в кольцевом и линейном резонаторе конечной длины [6a, 10a, 11a]. Для описания самостарта и устойчивости режима в лазере с разнесенными поглотителем и усилителем конечной длины была применена диаграммная техника, основанная на теореме площадей Мак Кола и Хана [11a, 69a]. Результаты этих публикаций вошли в диссертационную работу. Их

результаты вселили оптимизм для дальнейших, в том числе экспериментальных исследований в этом направлении, которые вошли в эту диссертацию.

Одновременно с преодолением ограничений на длительность импульса, накладываемых временем  $T_2$ , и возможностью подойти к одноцикловому импульсу в лазере с режимом КСМ стал вопрос о дальнейшем сокращении длительности импульсов.

Идея дальнейшего сокращения длительности импульсов свелась к укорочению импульса, содержащего один период колебаний, за счет удаления из него одной полуволны. Эта мысль вызвала еще большее неприятие, чем возможность генерации лазером излучения со спектром шире, чем ширина линии усиления. Действительно, учебники и монографии по нелинейной оптике и лазерной физике не рассматривали подобное излучение. Тем не менее существовали отдельные малоцитируемые и малоизвестные работы, в которых подобные униполярные всплески поля упоминались в той или иной контексте. Упомянем давнюю работу Бюлоу и Ахмада по униполярному солитону СИП ([19], см. также работы С.В. Сазонова, А.И. Маймистова, Е.Г. Бессонова, Е.М. Беленова и соавторов [24-29]). И работы Н.Н. Розанова (ссылки [22-23]) начала 2000 х г.г., в которых было впервые сформулировано Правило сохранения электрической площади импульса. Соискатель обратился к Н.Н. Розанову, который подключил его к исследованиям в этой области.

Отметим, что 10 лет назад работы по униполярным импульсам воспринимались крайне критически и к ним относились скорее, как к формальным математическим работам. Кроме того, часто ставилась под сомнение не только возможность существования униполярных импульсов, но и возможность их распространения. Все эти вопросы подробно разобраны в обзоре ([65a]). Благодаря работам соискателя под руководством Н.Н. Розанова удалось не только обосновать, что существование униполярных импульсов не противоречит каким-либо известным физическим принципам, но и показать, какие условия для их получения необходимо выполнить. Впервые показано, что наряду со спектральными, энергетическими и поляризационными параметрами, электрическая площадь коротких световых импульсов также является их важной характеристикой. Для электрической площади действует закон сохранения электрической площади. В соавторстве с Н.Н. Розановым впервые были получены фундаментальные результаты – новые законы сохранения в электродинамике диссипативных сред продемонстрированы в оптических задачах распространения субцикловых и униполярных импульсов ([44a, 121a]). Впервые было продемонстрировано фундаментальное значение законов сохранения на примере мысленного эксперимента по наблюдению оптического эффекта Ааронова-Бома ([60a]).

Показано, что воздействие субцикловых и униполярных импульсов на среды определяется новой физической величиной – электрической площадью импульса, а не энергией импульса ([45a, 79a, 86a, 91a, 108a, 110a, 119a, 126a]). Введено новое понятие в физике взаимодействия света с веществом – «атомная мера» площади униполярного импульса, характеризующая степень воздействия униполярного импульса на квантовые системы [79a]. Введено понятие «интерференция электрических площадей импульсов» [81a, 92a, 111a].

В настоящий момент, униполярные импульсы уже обсуждаются в работах большего числа авторов и исследуется их возможное применение в нескольких научных группах. Отношение к этим работам изменилось. Это произошло благодаря усилиям научного коллектива, в котором участвует соискатель, публикациям по этой теме, число которых в последние годы сильно выросло, а также выступлениям с приглашенными докладами на конференциях. В 2021 году работа «Одноцикловый, субцикловый и униполярный свет: получение и применения» поддержана грантом РФФ, где соискатель является руководителем. С 2022 года на хорошо известной конференции “Всероссийская Школа-семинар «Волновые явления: физика и применения имени профессора А.П. Сухорукова”, проводимой МГУ им. М.В. Ломоносова, при непосредственном участии соискателя была организована отдельная секция “Оптика предельно коротких импульсов”, на которой представляются результаты последних исследований в области униполярных импульсов. Проведенные исследования привели к развитию и созданию нового направления в современной физике, которое получило название “Оптика униполярного и субциклового света” (см. обзор [98a]) и в последние является активно развивающейся областью современной физики и нелинейной оптики.

### **Степень достоверности и независимые экспертные оценки результатов**

Достоверность результатов соискателя обеспечивается использованием современного оборудования при проведении экспериментов, многократным их повторением, выполнением контрольных экспериментов. В теоретических исследованиях программы расчетов тщательно проверялись, расчеты, проводимые численно при математическом моделировании, сравнивались со значениями, полученными аналитически для частных случаев. Аналитические выкладки проверялись численным моделированием.

Результаты данной работы опубликованы в 133 статьях в рецензируемых изданиях, из которых более половины работ опубликованы в журналах первого и второго квартиля. Полный список работ представлен ниже.

### **Апробация**

Представленные результаты были удостоены приглашенных докладов и лекций на международных и всероссийских научных школах и конференциях (более бти лекций и приглашенных докладов), а также более 30 устных докладов на международных конференциях.

Приглашенные доклады и лекции были сделаны на следующих мероприятиях-

- XXXIV Всероссийская Школа-семинар “Волновые явления: физика и применения» имени профессора А.П. Сухорукова” (Волны-2023), с 28 мая по 2 июня 2023 г., приглашенная лекция “Особенности излучения уединенного импульса поляризации, движущегося со световой и сверхсветовой скоростями” (<http://waves.phys.msu.ru/>)

- II Конгресс молодых ученых в г. Сочи, 1 по 3 декабря 2022 года в Парке науки и искусства «Сириус», приглашенный доклад на школе грантополучателей РНФ “Импульсы света предельно короткой длительности: последние результаты и перспективы” (<https://rscf.ru/news/found/bolee-250-pobediteley-prezidentskoj-programmy-rnf-prinyali-uchastie-v-shkole-fonda-na-kongresse-molo/>)

- Приглашенная лекция, "Одноцикловые и униполярные полумодульные световые импульсы". "XXXIII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2022») с 5 по 10 июня 2022 г.

- XVII Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» имени А.П. Сухорукова («Волны-2020»), 23 - 28 августа 2020 г, МГУ им. Ломоносова, онлайн-формат, приглашенный доклад – “Голография при отсутствии взаимной когерентности между опорным и предметным пучками” (<http://waves.phys.msu.ru/files/docs/2020/Waves20Program.pdf>).

- XX International Conference Foundations & Advances in Nonlinear Science September, 28 - October 2, Minsk 2020, онлайн-формат, приглашенный доклад "Self-induced transparency

mode-locking: theoretical analysis, experimental observation and single-cycle pulse generation" (<http://fans.j-npcs.org/programme.pdf>).

- The 19th International Conference Laser Optics ICLO 2020, Санкт-Петербург, Россия, 2-6 ноября 2020 года, онлайн формат. "Self-induced transparency mode-locking: towards to single-cycle pulses"- приглашенный доклад;

-XII международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики – 2020», Санкт-Петербург, 19-23 октября 2020 год, "Экспериментальное наблюдение экстремальных событий в генерации титан-сапфирового лазера с когерентным поглотителем"- приглашенный доклад.

- 4th Smart Nanomaterials: Advances, Innovations and Applications Conference, 7-10 December 2021, Paris, France, online format. Приглашенный доклад "Advances in Optics of Subcycle and Unipolar Pulses".

-Устный доклад на научном семинаре в Институте спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), Троицк. Название доклада: "Униполярный, субцикловый и одноцикловый свет – текущее состояние и перспективы", 22 апреля 2021 года. ([https://isan.troitsk.ru/novosti/novosti/novost-2021/nauchnyij-seminar-isan-\(22-aprelya-2021\).html](https://isan.troitsk.ru/novosti/novosti/novost-2021/nauchnyij-seminar-isan-(22-aprelya-2021).html)). Данный доклад был приурочен к присуждению автору в ноябре 2020 г. медали имени В.С. Летохова Российского оптического общества имени Д.С. Рождественского для молодых ученых (до 35 лет включительно) за новаторские работы в области лазерной физики и спектроскопии и их приложений.

### **Независимые экспертные оценки результатов работ**

Вошедшие в состав диссертации результаты стали были удостоены следующих престижных наград за научные достижения в области оптики и физики.

- 2023 год - первая премия имени Ю.И. Островского ФТИ им. А.Ф. Иоффе (совместно с М.В. Архиповым, А.В. Пахомовым и Н.Н. Розановым) за лучшие научные работы в области оптической голографии и интерферометрии за работу "Интерферометрия и голография с

предельным временным разрешением без когерентности опорного и предметного пучков” (<http://ostrovsky-award.ru/novosti/>).

- 2023 год- работа «Самоостановка предельно коротких световых импульсов в однородной среде» была удостоена диплома РАН и отмечена экспертным советом РАН в числе важнейших результатов в области оптики и фотоники за 2022 год в ходе специальной научной секции в рамках 17-й Международной специализированной выставки лазерной, оптической и оптоэлектронной техники ([www.photonics-expo.ru](http://www.photonics-expo.ru)) (<http://single-molecule.ru/wp-content/uploads/2023/04/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0-%D0%BD%D0%B0%D1%83%D1%87%D0%BD%D0%BE%D0%B9-%D1%81%D0%B5%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8.pdf>), а также вошла в число достижений, отмеченных ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН

(<https://new.ioffe.ru/ru/nauka/rezultaty/dostizheniya/205/>)

- 2020 год - Премия им. Л. Эйлера Правительства Санкт-Петербурга и Санкт-Петербургского научного центра Российской академии наук за выдающиеся научные результаты в области науки и техники, номинация "естественные и технические науки", за цикл работ по поиску новых путей получения одноцикловых и униполярных предельно коротких световых импульсов.

- 2020 год- медаль имени проф. В.С. Летохова Оптического общества имени Д.С. Рождественского за новаторские работы по лазерной физике, спектроскопии и их приложениям для молодых ученых за цикл работ “Униполярный, субцикловый и одноцикловый свет”.

- 2020 год - первая премия имени Ю.И. Островского ФТИ им. А.Ф. Иоффе (совместно с М.В. Архиповым, А.В. Пахомовым и Н.Н. Розановым) за лучшие научные работы в области оптической голографии и интерферометрии за работу «Интерференция волн поляризации с предельно короткими световыми импульсами для сверхбыстрого создания и стирания светоиндуцированных решеток в резонансных средах» (<http://ostrovsky-award.ru/novosti/>)

Представленные результаты были выполнены при финансовой поддержке грантов РФФИ, РНФ и фонда “Базис”. Результаты прошли экспертизу экспертами научных фондов на этапе

получения грантов и при ежегодных отчетах. В четырех грантах соискатель являлся руководителем.

1. Фонд развития теоретической физики «БАЗИС», "Разработка теории когерентной синхронизации мод в лазерах" грант «Ведущий ученый (Теоретическая физика)», руководитель, 2022-настоящий момент.
2. Грант РФФИ 21-72-10028 "Одноцикловый, субцикловый и униполярный свет: получение и применения", руководитель, 2021-2024.
3. Грант РФФИ 19-72-00012 "Получение предельно-коротких оптических импульсов в лазерах за счет явления самоиндуцированной прозрачности и их применение для сверхбыстрого когерентного управления параметрами резонансных сред", 2019-2021 годы - руководитель.
4. Грант РФФИ "Стабильность" 20-32-70049 "Получение униполярных и квазиуниполярных субцикловых импульсов в оптическом и терагерцовом диапазоне частот: теория и эксперимент", 2019-2021 годы, руководитель.

### **Практическая значимость**

Результаты имеют фундаментальное и прикладное значение. Выделяя основное из представленных выше пунктов защищаемых положений и пунктов раздела новизны, можно сказать, что результаты имеют практическую значимость в фундаментальном и прикладном плане.

В плоскости фундаментального значения, главное состоит в том, что полученные результаты обосновывают существование и демонстрируют возможности получения униполярных и субцикловых импульсов. Показывают отличия воздействия униполярных импульсов на квантовые объекты от биполярных мало- и многоцикловых импульсов и возможности их сверхбыстрого воздействия на квантовые системы. Демонстрируют значение величины электрической площади импульса, показывают роль законов сохранения электрической площади. Соискателем предсказан эффект самоостановки света.

В прикладном плане полученные результаты показывают перспективы режима когерентной синхронизации мод (КСМ) для создания компактных лазерных источников предельно коротких импульсов со сверхвысокой частотой повторения. Важную роль играет

первая экспериментальная реализация режима КСМ в лазерах. Обоснована возможность получения генерации с длительностью в один цикл колебаний поля в режиме КСМ. Предложены схемы для самокомпрессии одноцикловых импульсов. Предложен способ получения негармонических импульсов за счет излучения импульса «остановленной поляризации». Предложена схема сверхбыстрой голографической записи информации об объекте с использованием униполярного света; см. также и другие результаты, которые описаны выше в защищаемых положениях и приведенном ниже научном докладе.

### **Цели и задачи исследования**

В настоящее время ведутся интенсивные теоретические и экспериментальные исследования различных способов получения предельно коротких импульсов (ПКИ) с длительностью порядка периода колебания электромагнитной волны в различных диапазонах спектра - от терагерцового до ультрафиолетового и рентгеновского. Запрос на их получение и актуальность таких работ связаны с теми уникальными возможностями, которые открываются перед исследователями при их использовании импульсов в различных областях науки и современных технологий. Во-первых, ввиду малой длительности такие ПКИ являются уникальным инструментом для изучения и управления сверхбыстрыми процессами в веществе. Такие импульсы могут следовать со сверхвысокой частотой повторения (до десятков ТГц), что позволяет их использовать для сверхбыстрой передачи и обработки данных. Во-вторых, при их фокусировке удается добиться значений напряженности электрического поля, превышающей внутриатомное значение ( $\sim 10^9$  V/cm). В таком режиме экстремальной нелинейной оптики открываются новые возможности в генерации предельно коротких импульсов когерентного рентгеновского излучения, управления ядерными реакциями, возможности экспериментального наблюдения нелинейных эффектов квантовой электродинамики и т.д. Исследования в области взаимодействия ПКИ с различными средами имеют не только прикладное, но и фундаментальное значение, так как они позволяют изучать различные процессы в веществе и более глубоко понимать их природу.

Следующим этапом на пути сокращения длительности импульсов является переход к одноцикловым и субцикловым импульсам, в частности к униполярным импульсам, содержащим одну полуволну поля. На сегодняшний день получение униполярных импульсов является очень сложной практической задачей. Во-первых, фактически отсутствуют источники униполярных импульсов в оптическом и прилегающих к нему диапазонах. Во-вторых, слабо изучено их взаимодействие с веществом.

Целью проводимого исследования являлось развитие новых подходов к генерации предельно коротких одноцикловых и субцикловых импульсов и изучение их взаимодействия с веществом.

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

(в данном пункте в каждом положении приведены ссылки из списка работ соискателя, далее они будут помечаться символом “а” после номера ссылки и в остальных частях текста диссертации).

1. Существование квазиуниполярных субцикловых импульсов, обладающих ненулевой электрической площадью, не противоречит уравнениям Максвелла. Ненулевая электрическая площадь подчиняется правилу сохранения электрической площади в средах с поглощением и с усилением [25а, 26а, 34а, 39а, 44а, 48а, 65а, 75а].
2. Для квантовых систем, включая атомы, молекулы, наноразмерные структуры, вероятность возбуждения и ионизации предельно коротким импульсом, длительность которого меньше характерного времени, связанного с энергией частицы в основном состоянии, определяется отношением электрической площади импульса к ее атомной мере -  $\hbar/ea$  (где  $\hbar$  - приведенная постоянная Планка,  $e$  - заряд электрона,  $a$  - характерный размер квантовой системы) [79а, 86а, 88а, 119а, 121а, 126а, 131а]. При воздействии нескольких коротких униполярных импульсов на квантовую систему их суммарное действие определяется интерференцией электрических площадей импульсов [81а, 92а, 111а]. Последовательность нерезонансных коротких униполярных импульсов селективно возбуждает квантовую систему, несмотря на нерезонансный характер действия каждого из них по отдельности [56а, 59а, 67а].
3. При использовании униполярных импульсов в интерферометрии и голографии достигается предельное временное разрешение и не требуется когерентность между опорной и предметной волной, в отличие от общеизвестных методов интерферометрии и голографии [62а]. В протяженной резонансной среде короткие униполярные импульсы позволяют создавать решетки населенности с управляемым шагом и стирать их [18а, 19а, 29а, 30а, 31а, 33а, 36а, 43а, 50а, 56а, 59а, 66а, 67а, 70а, 76а, 80а].

4. Униполярные импульсы не могут обеспечить оптический эффект Ааронова-Бома в электронном интерферометре Ааронова-Бома из-за безвихревого характера векторного поля электрической площади [60a].
5. Униполярность импульсов экспериментально количественно зарегистрирована у импульсов излучения, полученных за счет оптического выпрямления фемтосекундных импульсов в кристалле ниобата лития, и у импульсов излучения филаментов, сгенерированных мощными фемтосекундными импульсами в жидкости - воде. Униполярность излучения, полученного в указанных чисто оптических экспериментах, регистрируется радиотехническими средствами и обработкой временной зависимости напряженности поля терагерцовых импульсов, регистрируемых стандартным электрооптическим способом [87a].
6. Диаграммный метод описания режима когерентной синхронизации мод позволяет найти предельные циклы в лазере, проанализировать их устойчивость, предсказать динамические режимы в лазерной системе, не прибегая к сложным расчетам [11a,69a]. При когерентной синхронизации мод существуют самостартующие сценарии развития режима, не требующие внешнего инициирования [6a,10a,11a,69a,98a]. Режим когерентной синхронизации мод обеспечивает генерацию одноцикловых импульсов с терагерцовой частотой повторения [89a].
7. Для лазеров, содержащих поглотитель и усилитель, существуют правила подобия, которые устанавливают соответствие между характеристиками излучения при взаимосвязанном изменении основных параметров системы: длина резонатора и сред, времена релаксации сред [69a, 89a].
8. В лазерах: на красителе Родамин 6G с поглотителем – пары молекулярного йода экспериментально реализуется режим когерентной синхронизации мод [7a,40a]. В титан-сапфировом лазере с поглотителем – пары рубидия и пары цезия также экспериментально реализуется режим когерентной синхронизации мод. В режиме когерентной синхронизации мод при увеличении мощности генерации длительность импульса сокращается [47a, 49a, 51a, 52a, 55a].

9. В излучении титан-сапфирового лазера с поглотителем – пары рубидия или цезия возникают экстремальные события – крайне редкие кратковременные всплески интенсивности, превышающие средний уровень более чем в три раза [84a].
10. В оптически плотной резонансной двухуровневой среде у одноцикловых импульсов при определенных условиях наблюдается самокомпрессия, их длительность сокращается и пропорционально уменьшается период цикла [68a,73a]. В таких средах одно- и малоцикловый импульс может замедляться, останавливаться и превращаться в неподвижный осциллон [93a].

### Основные научные результаты

(данный пункт оформлен согласно текущим правилам оформления диссертаций в СПбГУ.

Цитируемые публикации в журналах первого и второго квартала, Q1 и Q2, выделены жирным шрифтом)

1. Впервые систематически исследован вопрос о возможности получения униполярных и субцикловых импульсов, обладающих ненулевой электрической площадью, и предложены схемы для их реализации [**25a, 26a, 34a, 48a, 65a, 75a, 117a, 118a**]. Подтверждено правило сохранения электрической площади в задачах распространения коротких униполярных импульсов в резонансных средах, как с поглощением, так и усилением [**39a, 44a, 75a, 121a**]. Проведена экспериментальная демонстрация существования униполярности излучения, предложены методы его регистрации [**87a**].
2. Впервые предложены способы получения униполярных субцикловых импульсов негармонической формы за счет сверхизлучения «остановленной поляризации» [14a, **15a, 16a, 17a, 20a, 41a, 46a, 57a, 71a, 94a, 95a, 103a, 118a, 127a**].
3. Впервые в физику взаимодействия ультракоротких импульсов с веществом введено понятия «атомной меры» электрической площади короткого униполярного импульса и дано ее количественное определение [**79a, 86a, 88a, 91a, 119a, 121a, 126a, 131a**].

4. Впервые введено понятие «интерференции электрических площадей» в физике взаимодействия электромагнитного излучения с квантовыми системами [81а, 92а, 111а].
5. Впервые показано, что для коротких униполярных импульсов вероятность возбуждения и ионизации в квантовых системах определяется электрической площадью импульсов, а не его энергией [45а, 64а, 79а, 86а, 88а, 110а, 119а, 120а, 121а, 126а, 131а]. Особенности излучения протяженных сред из таких систем рассмотрены в статьях [9а, 82а].
6. Впервые продемонстрировано, что последовательность коротких субцикловых импульсов способна оказывать селективное воздействие на резонансные квантовые переходы, несмотря на нерезонансный характер их воздействия на квантовые объекты [56а, 59а, 67а].
7. Впервые показано, что возможна голография с использованием некогерентных предметного и опорного пучков [62а]. Требование когерентности между опорной и предметной волной, считающееся безусловным в голографии, не является обязательным, если использовать ультракороткие униполярные импульсы.
8. Впервые показана невозможность использования униполярных субцикловых импульсов для наблюдения оптического эффекта Ааронова-Бома [60а].
9. Впервые предложены схемы интегрирования и дифференцирования временной зависимости напряженности электрического поля от времени ультракоротких импульсов [77а, 83а].
10. Впервые экспериментально реализован режим когерентной синхронизации мод в лазерах с когерентным поглотителем [7а, 40а, 47а, 49а, 51а, 52а, 55а].
11. Впервые теоретически предсказан и экспериментально продемонстрирован самостартующий характер режима когерентной синхронизации мод под управлением когерентного поглотителя [6а, 10а, 11а, 47а, 49а, 51а, 52а, 55а, 99а, 112а, 123а], особенности управления импульсами излучения синхронизации мод в без выраженной когерентности в среде изучены в [8а, 12а, 21а, 63а].

12. Впервые в системе диссипативных солитонов самоиндуцированной прозрачности экспериментально обнаружены экстремальные события, солитонный газ и солитонные молекулы [22а, 84а].
13. Впервые использован диаграммный метод для описания режима когерентной синхронизации мод в лазерах за счет явления самоиндуцированной прозрачности в поглощающей среде [11а, 69а]. Найдены предельные циклы в системе, проанализирована их устойчивость.
14. Впервые предсказана генерация одноцикловых импульсов с терагерцовой частотой повторения за счет режима когерентной синхронизации мод в двухсекционном лазере с ультракоротким резонатором [89а].
15. Впервые показано наведение, стирание и сверхбыстрое управление решетками разности населенностей в резонансной среде с помощью последовательности субцикловых импульсов, когерентно взаимодействующих со средой и не перекрывающихся в резонансной среде [18а, 19а, 29а, 30а, 31а, 50а, 70а, 76а, 80а, 101а, 116а, 132а].
16. Впервые рассмотрен компрессор одноцикловых импульсов на основе оптически плотной резонансной среды [73а].
17. Впервые для импульса в несколько циклов колебаний теоретически предсказан эффект самоостановки света в однородной резонансной среде [93а].

#### **Список публикаций с основными научными результатами соискателя**

Результаты по теме данной работы опубликованы в 133 статьях в высокорейтинговых журналах, индексируемых в базах данных Web of Science, Scopus и РИНЦ [1а-133а] и одной главе в коллективной монографии [134а]. Они также резюмированы в более чем 8 обзорных статьях в представленном ниже списке литературы. В большинстве публикаций соискатель является первым или последним автором, что подчеркивает его решающую роль в проводимых исследованиях. В разделах научного

доклада цитированная литература берется из общего списка, куда также входят работы соискателя, этот список дублируется ссылками на работы из списка работ соискателя из приведенного ниже списка с добавлением буквы “а” после номера ссылки.

1. Архипов М. В., Архипов Р. М., Толмачев Ю. А. Излучение пространственно-модулированной резонансной среды, возбуждаемой со сверхсветовой скоростью // Оптика и спектроскопия. – 2012. – Т. 112. – №. 2. – С. 268-268. [Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Tolmachev Yu. A. Emission of a spatially modulated resonant medium excited with superluminal velocity // Optics and Spectroscopy. – 2012. – Vol. 112. – P. 243-248].
2. Архипов М. В., Архипов Р. М., Пулькин С. А. Эффекты генерации без инверсии в двухуровневых средах с точки зрения особенностей пространственно-временной динамики распространения излучения // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т. 114. – №. 6. – С. 912-912. [Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Pulkin S. A. Effects of inversionless lasing in two-level media from the point of view of specificities of the spatiotemporal propagation dynamics of radiation // Optics and Spectroscopy. – 2013. – V. 114. – P. 831-837].
3. Arkhipov R., Pimenov A., Radziunas M., Rachinskii D., Vladimirov, A. G., Arsenijević, D., Schmeckeber H., Bimberg D. Hybrid mode locking in semiconductor lasers: simulations, analysis, and experiments // IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics. – 2012. – Vol. 19. – №. 4. – P. 1100208-1100208.
4. Arkhipov R. M. Babushkin I., Lebedev M. K., Tolmachev Y. A., Arkhipov M. V. Transient Cherenkov radiation from an inhomogeneous string excited by an ultrashort laser pulse at superluminal velocity // Physical Review A. – 2014. – Vol. 89. – №. 4. – P. 043811.
5. Joshi S., Chimot N., Radziunas M., Arkhipov R., Barbet S., Accard A., Ramdane A., Lelarge F. Quantum dash based single section mode locked lasers for photonic integrated circuits // Optics Express. – 2014. – Vol. 22. – №. 9. – P. 11254-11266.
6. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И. В. О когерентной синхронизации мод в двухсекционном лазере // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 101. – №. 3. – С. 164-169. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I. V. On coherent mode-locking in a two-section laser // JETP Letters. – 2015. – Vol. 101. – №. 3. – P. 149-153].

7. Архипов М. В., Архипов Р.М., Шимко А.А., Бабушкин И. Синхронизация мод в лазере с когерентным поглотителем // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 101. – №. 4. – С. 250-253. [Arkhipov M. V., Arkhipov R.M., Shimko A.A., Babushkin I. Mode-locking in a laser with a coherent absorber // JETP Letters. – 2015. – Vol. 101. – №. 4. – P. 232-235].
8. Arkhipov R. M., Amann A., Vladimirov A. G. Pulse repetition-frequency multiplication in a coupled cavity passively mode-locked semiconductor lasers // Applied Physics B. – 2015. – Vol. 118. – P. 539-548.
9. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И. В., Толмачев Ю. А. Переходное излучение кольцевой резонансной среды в условиях возбуждения ультракоротким импульсом, перемещающимся со сверхсветовой скоростью // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45. – №. 6. – С. 590-596. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I. V., Tolmachev Y. A. Transient radiation from a ring resonant medium excited by an ultrashort superluminal pulse // Quantum Electronics. – 2015. – Vol. 45. – №. 6. – P. 590].
10. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I. Self-starting stable coherent mode-locking in a two-section laser // Optics Communications. – 2016. – Vol. 361. – P. 73-78.
11. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I., Rosanov N. N. Self-induced transparency mode locking, and area theorem // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41. – №. 4. – P. 737-740.
12. Arkhipov R. M., Habruseva T., Pimenov A., Radziunas M., Hegarty S. P. Huyet G., Vladimirov A. G. Semiconductor mode-locked lasers with coherent dual-mode optical injection: simulations, analysis, and experiment // JOSA B. – 2016. – Vol. 33. – №. 3. – P. 351-359.
13. Архипов Р. М., Архипов М. В., Белов П. А., Бабушкин И., Толмачев Ю. А. Управление параметрами излучения резонансной среды, возбуждаемой последовательностью ультракоротких импульсов со сверхсветовой скоростью // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 120. – №. 3. – С. 442-454. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V. Belov P. A., Babushkin I., Tolmachev Yu. A. Controlling the Radiation Parameters of a Resonant Medium Excited by a Sequence of Ultrashort Superluminal Pulses // Optics and Spectroscopy. – 2016. – Vol. 120. – P. 423-433].
14. Архипов Р. М. Особенности излучения комбинационно-активной среды, возбуждаемой со сверхсветовой скоростью // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 120. – №. 5. – С. 802-806. [Arkhipov R. M. Particular features of the emission of radiation by a superluminally excited Raman-active medium // Optics and Spectroscopy. – 2016. – Vol. 120. – P. 756-759].

15. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Belov P. A., Tolmachev Y. A., Babushkin I. Generation of unipolar optical pulses in a Raman-active medium // *Laser Physics Letters*. – 2016. – Vol. 13. – №. 4. – P. 046001.
16. Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Babushkin I. V., Rosanov N. N., Arkhipov M. V. Few-cycle pulse-driven excitation response of resonant medium with nonlinear field coupling // *Laser Physics Letters*. – 2016. – Vol. 13. – №. 12. – P. 126001.
17. Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Babushkin I. V., Arkhipov M. V., Tolmachev Yu. A., Rosanov N. N. Generation of unipolar pulses in a circular Raman-active medium excited by few-cycle optical pulses // *JOSA B*. – 2016. – Vol. 33. – №. 12. – P. 2518-2524.
18. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Создание и стирание решеток разности заселенностей при когерентном взаимодействии резонансной среды с предельнокороткими оптическими импульсами // *Оптика и спектроскопия*. – 2016. – Т. 121. – №. 5. – С. 810-816. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V. Babushkin I., Rosanov N. N. Formation and erasure of population difference gratings in the coherent interaction of a resonant medium with extremely short optical pulses // *Optics and Spectroscopy*. – 2016. – Vol. 121. – P. 758-764].
19. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N. Ultrafast creation and control of population density gratings via ultraslow polarization waves // *Optics Letters*. – 2016. – Vol. 41. – №. 21. – P. 4983-4986.
20. Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Babushkin I. V., Arkhipov M. V., Tolmachev Yu. A., Rosanov N. N. All-optical control of unipolar pulse generation in a resonant medium with nonlinear field coupling // *Physical Review A*. – 2017. – Vol. 95. – №. 1. – P. 013804.
21. Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Molevich N. E. Stabilization of class-B broad-area laser emission by external optical injection // *JOSA B*. – 2017. – Vol. 34. – №. 4. – P. 756-763.
22. Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Babushkin I., Tolmachev Yu. A., Rosanov N. N. Radiation of a resonant medium excited by few-cycle optical pulses at superluminal velocity // *Laser Physics*. – 2017. – Vol. 27. – №. 5. – P. 053001.
23. Архипов М. В., Бабушкин И. В., Пулькин Н. С., Архипов Р. М., Розанов Н. Н. Об излучении одиночного колеблющегося металлического зеркала // *Оптика и спектроскопия*. – 2017. – Т. 122. – №. 4. – С. 689-693. [Arkhipov M. V., Babushkin I., Pul'kin N. S., Arkhipov R. M., Rosanov N. N. On the emission of radiation by an isolated vibrating metallic mirror // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 122. – P. 670-674].
24. Архипов Р. М., Пахомов А. В. Излучение неоднородной резонансной среды, возбуждаемой с переменной сверхсветовой скоростью // *Оптика и спектроскопия*. –

2017. – Т. 122. – №. 5. – С. 792-797. [Arkhipov R. M., Pakhomov A. V. Emission of radiation by a resonance medium excited with a variable superluminal velocity // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 122. – P. 768-773].
25. Архипов Р. М., Пахомов А. В., Архипов М. В., Бабушкин И. В., Толмачев Ю. А., Розанов Н. Н. Генерация униполярных импульсов в нелинейных средах // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2017. – Т. 105. – №. 6. – С. 388-400. [Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Babushkin I., Tolmachev Yu. A., Rosanov N. N. Generation of unipolar pulses in nonlinear media // *JETP Letters*. – 2017. – Vol. 105. – P. 408-418].
26. Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Babushkin I. V., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N. Generation of unipolar half-cycle pulses via unusual reflection of a single-cycle pulse from an optically thin metallic or dielectric layer // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42. – №. 11. – P. 2189-2192.
27. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов А. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Устройства нелинейной фотоники на базе когерентного взаимодействия оптического излучения с резонансными средами (обзор) // *Оптика и спектроскопия*. – 2017. – Т. 122. – №. 6. – С. 993-999. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Babushkin I., Rosanov N. N. Nonlinear-photonics devices on the basis of the coherent interaction of optical radiation with resonant media (a review) // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 122. – P. 949-954].
28. Розанов Н. Н., Архипов М. В., Архипов Р. М., Пахомов А. В., Бабушкин, И. В. О диагностике сред с помощью предельно коротких импульсов терагерцового излучения // *Оптика и спектроскопия*. – 2017. – Т. 123. – №. 1. – С. 105-109. [Rosanov N. N., Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Babushkin I. V. On diagnostics of media using extremely short terahertz radiation pulses // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 123. – P. 100-104].
29. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И. В., Пахомов А. В., Розанов Н. Н. Решетки разности населенностей, создаваемые униполярными импульсами длительностью менее одного периода поля в резонансной среде // *Квантовая электроника*. – 2017. – Т. 47. – №. 7. – С. 589-592. [Arkhipov R. M., Arkhipov, M. V., Babushkin I., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Population difference gratings produced by unipolar subcycle pulses in a resonant medium // *Quantum Electronics*. – 2017. – Vol. 47. – №. 7. – P. 589].

30. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Babushkin I., Rosanov N. N. Light-induced spatial gratings created by unipolar attosecond pulses coherently interacting with a resonant medium // *Laser Physics Letters*. – 2017. – Vol. 14. – №. 9. – P. 095402.
31. Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N. Population density gratings induced by few-cycle optical pulses in a resonant medium // *Scientific reports*. – 2017. – Vol. 7. – Article No. 12467.
32. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов А. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Столкновение униполярных субцикловых импульсов в нелинейной резонансно поглощающей среде // *Оптика и спектроскопия*. – 2017. – Т. 123. – №. 4. – С. 600-605. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Babushkin I., Rosanov N. N. Collisions of unipolar subcycle pulses in a nonlinear resonantly absorbing medium // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 123. – P. 610-614].
33. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N. Subwavelength population density gratings in resonant medium created by few-cycle pulses // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2017. – V. 917. – №. 6. – P. 062005.
34. Пахомов А. В., Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. О генерации предельно коротких световых импульсов в эффективно одномерных схемах // *Оптика и спектроскопия*. – 2017. – Т. 123. – №. 6. – С. 901-906. [Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I., Rosanov N. N. On the generation of extremely short light pulses in effectively one-dimensional schemes // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 123. – P. 913-917].
35. Архипов Р. М., Жигулева Д. О., Пахомов А. В., Архипов М. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Генерация предельно-коротких импульсов при возбуждении нелинейной резонансной среды световым зайчиком, движущимся со сверхсветовой скоростью // *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – Т. 124. – №. 4. – С. 505-509. [Arkhipov R. M., Zhiguleva D. O., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Babushkin I., Rosanov N. N. Generation of Extremely Short Pulses upon Excitation of a Resonant Medium by a Superluminal Light Spot // *Optics and Spectroscopy*. – 2018. – Vol. 124. – P. 536-540].
36. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов А. В., Жигулева Д.О., Розанов Н.Н. Столкновение одноцикловых и субцикловых аттосекундных световых импульсов в нелинейной резонансной среде // *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – Т. 124. – №. 4. – С. 510-517. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Zhiguleva D. O., Rosanov N. N. Collisions of Single-Cycle and Subcycle Attosecond Light Pulses in a

- Nonlinear Resonant Medium // Optics and Spectroscopy. – 2018. – Vol. 124. – P. 541-548].
37. Архипов Р. М., Розанов Н. Н. О расщеплении субциклового импульса при когерентном распространении в резонансной среде // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 124. – №. 5. – С. 691-694. [Arkhipov R. M., Rosanov N. N. On the splitting of a subcycle pulse upon its coherent propagation in a resonant medium // Optics and Spectroscopy. – 2018. – Vol. 124. – P. 726-729].
38. Tzenov P., Babushkin I., Arkhipov R., Arkhipov M., Rosanov N., Morgner U., Jirauschek C. Passive and hybrid mode locking in multi-section terahertz quantum cascade lasers // New Journal of Physics. – 2018. – Vol. 20. – №. 5. – P. 053055.
39. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И. В., Пахомов А. В., Розанов Н. Н. Распространение импульса света с длительностью менее одного периода в усиливающей резонансной среде // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48. – №. 6. – С. 532-536. [Arkhipov R. M., Arkhipov M.V., Babushkin I., Pakhomov A.V., Rosanov N.N. Propagation of a light pulse with a duration of less than one period in a resonant amplifying medium // Quantum Electronics. – 2018. – Vol. 48. – №. 6. – P. 532].
40. Arkhipov M. V., Shimko A. A., Arkhipov R. M., Babushkin I., Kalinichev A. A., Demircan A., Morgner U.U., Rosanov N. N. Mode-locking based on zero-area pulse formation in a laser with a coherent absorber // Laser Physics Letters. – 2018. – Vol. 15. – №. 7. – P. 075003.
41. Ziguleva D. O., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Babushkin I., Rosanov N. N. Laser beam deflector based generation of few-cycle electromagnetic pulses in a circular nonlinear medium // Optics Communications. – 2018. – Vol. 424. – P. 170-176.
42. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Rosanov N. N. Conservation of the electric field area in the problems of light propagation in a resonant medium // 2018 International Conference Laser Optics (ICLO). – IEEE, 2018. – С. 314-314.
43. Архипов Р. М., Пахомов А. В., Архипов М. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Светоиндуцированные решетки, создаваемые с помощью пары коротких терагерцевых импульсов, не перекрывающихся в резонансной среде // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125. – №. 4. – С. 564-567. [Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M.V., Babushkin I., Rosanov N. N. Population difference gratings induced in a resonant medium by a pair of short terahertz nonoverlapping pulses // Optics and Spectroscopy. – 2018. – Vol. 125. – P. 586-589].

44. Розанов Н. Н., Архипов Р. М., Архипов М. В. О законах сохранения в электродинамике сплошных сред (к 100-летию Государственного оптического института им. СИ Вавилова) // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – №. 12. – С. 1347-1353. [Rosanov N. N., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V. On laws of conservation in the electrodynamics of continuous media (on the occasion of the 100th anniversary of the SI Vavilov State Optical Institute) // *Physics-Uspekhi*. – 2018. – Vol. 61. – №. 12. – P. 1227].
45. Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N. Unipolar subcycle pulse-driven nonresonant excitation of quantum systems // *Optics Letters*. – 2019. – Vol. 44. – №. 5. – P. 1202-1205.
46. Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N., Babushkin I. Unusual terahertz waveforms from a resonant medium controlled by diffractive optical elements // *Scientific reports*. – 2019. – Art. № 7444. – P. 1-12.
47. Архипов М. В., Архипов, Р. М., Шимко А. А., Бабушкин И. В., Розанов Н. Н. Синхронизация мод в титан-сапфировом лазере за счет когерентного поглотителя // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2019. – Vol. 109. – №. 10. – P. 657-661. [Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Shimko A. A., Babushkin I., Rosanov N. N. Mode Locking in a Ti: Sapphire Laser by Means of a Coherent Absorber // *JETP Letters*. – 2019. – Vol. 109. – №. 10.- P. 634–637].
48. Розанов Н.Н., Архипов М.В., Р.М. Архипов Р.М., Веретенев Н.А., Пахомов А.В., Федоров С.В. Экстремальная и топологическая нелинейная оптика открытых систем // Оптика и спектроскопия. – 2019. – Vol. 127. – №. 1. – P.82-93. [Rosanov N. N., Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Veretenov N. A., Pakhomov A. V., Fedorov S. V. Extreme and topological nonlinear optics of open systems // *Optics and Spectroscopy*. – 2019. – Vol. 127. – P. 77-87].
49. Архипов Р. М., Архипов, М. В., Шимко, А. А., Пахомов, А. В., Розанов Н. Н. Предельно короткие оптические импульсы и их генерация в резонансных средах (Миниобзор) // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2019. – Т. 110. – №. 1. – С. 9-20. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Shimko A. A., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Ultrashort optical pulses and their generation in resonant media (scientific summary) // *JETP Letters*. – 2019. – Vol. 110. – P. 15-24].
50. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов, А. В., Розанов Н. Н. Решетки населенностей, создаваемые в квантовой системе с помощью пары субцикловых импульсов // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – №. 10. – С. 958-962. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Population gratings produced in

- a quantum system by a pair of sub-cycle pulses // *Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 49. – №. 10. – P. 958].
51. Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Shimko A. A., Babushkin I., Rosanov N. N. Experimental study of self-induced transparency mode-locking in Ti: sapphire laser // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1410. – №. 1. – P. 012102.
52. Архипов Р. М., Архипов М. В., Шимко А. А., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Синхронизация мод в лазерах за счет явления самоиндуцированной прозрачности: новые теоретические и экспериментальные результаты // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2020. – Т. 84. – №. 1. – С. 30-34. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Shimko A. A., Babushkin I., Rosanov N. N. Mode Locking in Lasers due to Self-Induced Transparency: New Theoretical and Experimental Results // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*. – 2020. – Vol. 84. – P. 23-26].
53. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И., Пахомов А. В., Розанов Н. Н. Генерация аттосекундного импульса в газообразной среде атомов гелия, возбуждаемого полуволновыми рентгеновскими импульсами // *Оптика и спектроскопия*. – 2020. – Т. 128. – №. 4. – С. 541-547. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Generation of an Attosecond Pulse in Helium Excited by Half-Cycle X-Ray Pulses // *Optics and Spectroscopy*. – 2020. – Vol. 128. – P. 529-535].
54. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И., Пахомов А. В., Розанов Н. Н. Генерация аттосекундного импульса на основе коллективного спонтанного излучения слоя трехуровневых атомов, возбуждаемых парой униполярных импульсов // *Оптика и спектроскопия*. – 2020. – Т. 128. – №. 11. – С. 1723-1731. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Generation of an attosecond pulse based on collective spontaneous emission of a layer of three-level atoms excited by a pair of unipolar pulses // *Optics and Spectroscopy*. – 2020. – Vol. 128. – №. 11. – P. 1723-1731].
55. Arkhipov M. V., Shimko A. A., Rosanov N. N. Babushkin I., Arkhipov R. M. Self-induced transparency mode locking in a Ti: sapphire laser with an intracavity rubidium cell // *Physical Review A*. – 2020. – Vol. 101. – №. 1. – P. 013803.
56. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов А. В., Розанов Н. Н. О некоторых новых возможностях управления квантовыми системами с помощью униполярных предельно коротких импульсов // *Оптика и спектроскопия*. – 2020. – Т. 128. – №. 1. – С. 106-109. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. On

- some new possibilities for controlling quantum systems using unipolar extremely short pulses // *Optics and Spectroscopy*. – 2020. – Vol. 128. – P. 102-105].
57. Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N., Babushkin I. Coherently controlled generation of single-cycle terahertz pulses from a thin layer of nonlinear medium with low-frequency resonances // *Physical Review A*. – 2020. – Vol. 101. – №. 4. – P. 043838.
58. Архипов Р. М., Розанов Н. Н. Взаимодействие прямоугольного униполярного импульса с двухуровневой резонансной средой // *Оптика и спектроскопия*. – 2020. – Т. 128. – №. 5. – С. 638-642. [Arkhipov R. M., Rosanov N. N. Interaction of a rectangular unipolar pulse with a two-level resonant medium // *Optics and Spectroscopy*. – 2020. – Vol. 128. – P. 630-634].
59. Arkhipov R., Pakhomov A., Arkhipov M., Demircan A., Morgner U., Rosanov N., Babushkin I. Selective ultrafast control of multi-level quantum systems by subcycle and unipolar pulses // *Optics Express*. – 2020. – Vol. 28. – №. 11. – P. 17020-17034.
60. Архипов М. В., Архипов Р. М., Розанов Н. Н. Оптический эффект Ааронова–Бома // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2020. – Т. 111. – №. 12. – С. 794-797. [Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Rosanov N. N. Optical Aharonov—Bohm Effect // *JETP Letters*. – 2020. – Vol. 111. – №. 12. – P. 668-671].
61. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N. Generation of sub cycle terahertz pulses via coherent control of nonlinear medium by femtosecond pulses // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2020. – Vol. 1571. – №. 1. – P. 012009.
62. Архипов Р. М., Архипов М. В., Розанов Н. Н. О возможности голографической записи в отсутствие взаимной когерентности опорного и предметного пучков // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2020. – Vol. 111. – №. 9. – С. 586-590. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Rosanov N. N. On the possibility of holographic recording in the absence of coherence between a reference beam and a beam scattered by an object // *JETP Letters*. – 2020. – Vol. 111. – P. 484-488].
63. Melchert O., Brée C., Tajalli A., Pape A., Arkhipov R., Willms S., Babushkin I., Skryabin D., Steinmeyer G., Demircan A. All-optical supercontinuum switching // *Communications Physics*. – 2020. – Vol. 3. – №. 1. – P. 146.
64. Arkhipov R., Pakhomov A., Arkhipov M., Rosanov N. Excitation of molecular rotational levels by unipolar subcycle pulses // *Laser Physics Letters*. – 2020. – Vol. 17. – №. 10. – P. 105301.

65. Архипов Р. М., Архипов М. В., Розанов Н. Н. Униполярный свет: существование, получение, распространение, воздействие на микрообъекты // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – №. 9. – С. 801-815. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Rosanov N. N. Unipolar light: existence, generation, propagation, and impact on microobjects // Quantum Electronics. – 2020. – Vol. 50. – №. 9. – P. 801].
66. Архипов Р. М. Решетки населенностей, создаваемые парой униполярных аттосекундных импульсов в трехуровневой атомарной среде // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128. – №. 11. – С. 1732-1736. [Arkhipov R. M. Population Gratings Created by a Pair of Unipolar Attosecond Pulses in a Three-Level Atomic Medium // Optics and Spectroscopy. – 2020. – Vol. 128. – P. 1865-1869].
67. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов А. В., Жукова М. О., Цыпкин А. Н., Розанов Н. Н. Селективное возбуждение и создание инверсной населенности в квантовых системах с помощью униполярных аттосекундных и терагерцовых импульсов // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128. – №. 12. – С. 1905-1911. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Zhukova M. O., Tsytkin A. N., Rosanov N. N. Selective Excitation and Creation of Population Inversion in Quantum Systems Using Unipolar Attosecond and Terahertz Pulses // Optics and Spectroscopy. – 2021. – Vol. 129. – P. 120-126].
68. Архипов Р. М., Архипов М. В., Федоров С. В., Розанов Н. Н. Получение изолированных аттосекундных импульсов с большой электрической площадью в плотной резонансной среде // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. – №. 10. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Fedorov S. V., Rosanov N. N. Generation of isolated attosecond pulses with large electric area in a dense resonant medium // Optics and Spectroscopy. – 2022. – Vol. 130. – №. 13. – P. 2020-2025].
69. Arkhipov R., Pakhomov A., Arkhipov M., Babushkin I., Rosanov N. Stable coherent mode-locking based on  $\pi$  pulse formation in single-section lasers // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Art. №1147.
70. Arkhipov R., Pakhomov A., Arkhipov M., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. Population difference gratings created on vibrational transitions by nonoverlapping subcycle THz pulses // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Art. № 1961.
71. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов А. В., Жукова М. О., Цыпкин А. Н., Розанов Н. Н. Генерация предельно коротких аттосекундных и терагерцовых импульсов на основе коллективного спонтанного излучения тонкой резонансной среды (Миниобзор) // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. –

2021. – Т. 113. – №. 4. – С. 237-247. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Zhukova M. O., Tsyupkin A. N., Rosanov N. N. Generation of Ultrashort Attosecond and Terahertz Pulses Based on the Collective Spontaneous Emission from a Thin Resonant Medium (Brief Review) // JETP Letters. – 2021. – Vol. 113. – №. 4. – P. 242-251].
72. Архипов Р. М., Розанов Н. Н. Генерация предельно коротких импульсов терагерцового излучения на основе сверхизлучения трехуровневой резонансной среды // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. – №. 3. – С. 319-326. [Arkhipov R. M., Rosanov N. N. Generation of Extremely Short Pulses of Terahertz Radiation Based on Superradiation of a Three-Level Resonant Medium // Optics and Spectroscopy. – 2021. – Vol. 129. – №. 3. – P. 289–296].
73. Arkhipov R., Arkhipov M., Demircan A., Morgner U., Babushkin I., Rosanov N. Single-cycle pulse compression in dense resonant media // Optics Express. – 2021. – Vol. 29. – №. 7. – P. 10134-10139.
74. Архипов Р.М., Архипов М.В., И.В. Бабушкин, Розанов Н.Н. Самоостановка света в однородной среде // Труды школы-семинара «Волны-2021». Когерентная и нелинейная оптика. 2021. – стр.5-7.
75. Arkhipov R., Arkhipov M., Babushkin I., Pakhomov A., Rosanov N. Coherent propagation of a half-cycle unipolar attosecond pulse in a resonant two-level medium // JOSA B. – 2021. – Vol. 38. – №. 6. – P. 2004-2011.
76. Архипов Р. М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Артемьев Ю.М., Розанов Н.Н. Решетки населенностей, создаваемые в газе атомов водорода с помощью ультрафиолетовых аттосекундных импульсов // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. – №. 5. – С. 627-633. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Artem'ev Y. M., Rosanov N. N. Creation of Population Gratings in a Gas of Hydrogen Atoms Using Ultraviolet Attosecond Pulses // Optics and Spectroscopy. – 2021. – Vol. 129. – №. 6. – P. 605–611].
77. Pakhomov A., Arkhipov R., Arkhipov M., Rosanov N. Temporal differentiation and integration of few-cycle pulses by ultrathin metallic films // Optics Letters. – 2021. – Vol. 46. – №. 12. – P. 2868-2871.
78. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N. Population density gratings creation and control in resonant medium by half-cycle terahertz pulses // Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2021. – Vol. 1984. – №. 1. – С. 012011.
79. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов, А. В., Розанов Н. Н. Атомная мера электрической площади униполярного светового импульса // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 114. – №. 3. – С. 156-159.

- [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Atomic Scale of an Electrical Area for Unipolar Light Pulses // JETP Letters. – 2021. – Vol. 114. – P. 129-131].
80. Архипов Р. М. Электромагнитно индуцированные решетки атомных населенностей, создаваемые с помощью предельно коротких световых импульсов (Миниобзор) // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 113. – №. 10. – С. 636-649. [Arkhipov R. M. Electromagnetically induced gratings created by few-cycle light pulses (brief review) // JETP Letters. – 2021. – Vol. 113. – P. 611-621].
81. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И. В., Пахомов А. В., Розанов Н. Н. Особенности возбуждения квантовых систем малоцикловыми аттосекундными световыми импульсами–интерференция площадей огибающей и электрической площади импульса // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 114. – №. 5. – С. 298-303. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Envelope Area and Electric Pulse Area Interference in Excitation of Quantum Systems by Few-cycle Attosecond Light Pulses // JETP Letters. – 2021. – Vol. 114. – №. 5. – P. 250-255].
82. Pakhomov A., Arkhipov R. Frequency-tunable transient Cherenkov radiation from an inhomogeneous medium // Physical Review A. – 2021. – Vol. 104. – №. 3. – С. 033509.
83. Пахомов А. В., Архипов Р. М., Архипов М. В., Розанов Н. Н. Временное интегрирование и дифференцирование униполярных импульсов необычной формы // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – №. 11. – С. 1000-1003. [Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Rosanov N. N. Time integration and differentiation of unipolar pulses of unusual shape // Quantum Electronics. – 2021. – Vol. 51. – №. 11. – P. 1000].
84. Розанов Н. Н., Александров И. А., Архипов М. В., Архипов Р. М., Бабушкин И., Веретеннов Н. А., Дадеко А. В., Тумаков Д. А., Федоров С. В. Диссипативные аспекты экстремальной нелинейной оптики // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – №. 11. – С. 959-969. [Rosanov N. N., Aleksandrov I. A., Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Babushkin I., Veretenov N. A., Dadeko A. V., Tumakov D. A., Fedorov S. V. Dissipative aspects of extreme nonlinear optics // Quantum Electronics. – 2021. – Vol. 51. – №. 11. – P. 959].
85. Архипов М. В., Архипов Р. М., Розанов Н. Н. Получение униполярных импульсов в дальней зоне источника // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. – №. 9. – С. 1173-1175. [Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Rosanov N. N. Obtaining Unipolar Pulses at Far

- Field Zone of the Source // *Optics and Spectroscopy*. – 2021. – Vol. 129. – №. 11. – P. 1193–1195].
86. Rosanov N., Tumakov D., Arkhipov M., Arkhipov R. Criterion for the yield of micro-object ionization driven by few-and subcycle radiation pulses with nonzero electric area // *Physical Review A*. – 2021. – Vol. 104. – №. 6. – P. 063101.
87. Архипов М. В., Цыпкин А. Н., Жукова М. О., Исмагилов А. О., Пахомов А. В., Розанов Н. Н., Архипов Р. М. Экспериментальное определение униполярности импульсного терагерцового излучения // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2022. – Т. 115. – №. 1. – С. 3-9. [Arkhipov M. V., Tsyupkin A. N., Zhukova M. O., Ismagilov A. O., Pakhomov A. V., Rosanov N. N., Arkhipov R. M. Experimental Determination of the Unipolarity of Pulsed Terahertz Radiation // *JETP Letters*. – 2022. – Vol. 115. – №. 1. – P. 1-6].
88. Архипов Р. М., Белов П. А., Архипов М. В., Пахомов А. В., Розанов, Н. Н. Управление свойствами наноструктур с помощью предельно коротких световых импульсов // *Квантовая электроника*. – 2022. – Т. 52. – №. 7. – С. 610-614. Arkhipov R. M., Belov P. A., [Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Control of the properties of nanostructures using few-cycle pulses // *Kvantovaya Elektronika*. – 2022. – Vol. 52. – №. 7. – P. 610-614].
89. Arkhipov R., Arkhipov M., Pakhomov A., Babushkin I., Rosanov N. Single-cycle-pulse generation in a coherently mode-locked laser with an ultrashort cavity // *Physical Review A*. – 2022. – Vol. 105. – №. 1. – P. 013526.
90. Arkhipov R., Arkhipov M., Pakhomov A., Babushkin I., Rosanov N. Half-cycle and unipolar pulses (Topical Review) // *Laser Physics Letters*. – 2022. – Vol. 19. – №. 4. – P. 043001.
91. Pakhomov A., Arkhipov M., Rosanov N., Arkhipov R. Ultrafast control of vibrational states of polar molecules with subcycle unipolar pulses // *Physical Review A*. – 2022. – Vol. 105. – №. 4. – P. 043103.
92. Arkhipov R., Arkhipov M., Pakhomov A., Rosanov N. Interference of areas of subcycle light pulses // *Laser Physics*. – 2022. – Vol. 32. – №. 6. – P. 066002.
93. Arkhipov M., Arkhipov R., Babushkin I., Rosanov N. Self-Stopping of Light // *Physical Review Letters*. – 2022. – Vol. 128. – №. 20. – P. 203901.
94. Пахомов А. В., Архипов М. В., Розанов Н. Н., Архипов Р. М. Сверхизлучение протяженной резонансной среды, возбуждаемой полуволновыми аттосекундными импульсами // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2022. – Т. 116. – №. 3. – С. 151-158. [Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Rosanov N. N.,

- Arkhipov R. M. Superradiance of an Extended Resonant Medium Excited by Half-Cycle Attosecond Pulses // *JETP Letters*. – 2022. – Vol. 116. – №. 3. – P. 149-155].
95. Pakhomov A., Arkhipov M., Rosanov N., Arkhipov R. Generation of waveform-tunable unipolar pulses in a nonlinear resonant medium // *Physical Review A*. – 2022. – Vol. 106. – №. 5. – P. 053506.
96. Архипов М.В., Пахомов А.В., Дьячкова О.О., Розанов Н.Н. Негармонические пространственные структуры разности населенностей, создаваемые униполярными прямоугольными импульсами в резонансной среде // *Оптика и спектроскопия*. – 2022. – Т. 130. – №. 11. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Dyachkova O. O., Rosanov N. N. // Nonharmonic Spatial Population Difference Structures Created by Unipolar Rectangular Pulses in a Resonant Medium // *Optics and Spectroscopy*. – 2022. – Vol.130. –№11. – P.1443].
97. Архипов Р. М., Белов П.А., Архипов М.В., Пахомов А.В. Розанов Н.Н. Когерентное управление и создание решеток населенностей парой аттосекундных импульсов в резонансной среде на основе одномерных прямоугольных квантовых ям // *Оптика и спектроскопия*. – 2022. – Т. 130. – №. 6. – С.969. [Arkhipov R. M., Belov P.A., Arkhipov M.V., Pakhomov A.V., Rosanov N.N., Coherent control and creation of population gratings for a pair of attosecond pulses in a resonant medium based on one-dimensional rectangular quantum wells // *Optics and Spectroscopy*. – 2022. – Vol. 130. – №. 6. –P. 772].
98. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов А. В., Образцов П. А., Розанов Н. Н. Униполярные и субцикловые предельно короткие импульсы: последние результаты и перспективы (Миниобзор) // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2023. – Т. 117. – №. 1. – С. 10-28. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Obratsov P. A., Rosanov N. N. Unipolar and Subcycle Extremely Short Pulses: Recent Results and Prospects (Brief Review) // *JETP Letters*. – 2023. – Vol. 117. – №. 1. – P. 8].
99. Pakhomov A., Arkhipov M., Rosanov N., Arkhipov R. Self-starting coherent mode locking in a two-section laser with identical gain and absorber media // *Physical Review A*. – 2023. – V. 107. – №. 1. – P. 013510.
100. Dyachkova O. O., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Population density gratings produced by a pair of nonharmonic unipolar rectangular attosecond pulses in a resonant medium // *Laser Physics*. – 2023. – V. 33. – №. 4. – P. 045301.

101. Diachkova O. O., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Light-induced dynamic microcavities created in a resonant medium by collision of non-harmonic rectangular 1-fs light pulses // *Optics Communications*. – 2023. – Vol. 538. – P. 129475.
102. Дьячкова О.О., Архипов Р.М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Розанов Н.Н. Интерференция площадей предельно коротких импульсов: обобщения и следствия. Труды школы-семинара "Волны-2023". – Оптика предельно коротких импульсов. – С.1-4.
103. Архипов М. В., Архипов Р. М., Розанов Н. Н. Генерация униполярных импульсов терагерцового излучения с большой электрической площадью // *Оптика и спектроскопия*. – 2022. – Т. 130. – №. 8. – С.1216-1222. [Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Rosanov N. N. Generation of unipolar pulses of terahertz radiation with a large electric area // *Optics and Spectroscopy*. – 2022. – Vol. 130. – №. 8. – P.980-985].
104. Архипов Р. М., Архипов М. В., Розанов Н. Н. Особенности поведения волн поляризации при возбуждении протяженной резонансной среды перекрывающимися предельно короткими световыми импульсами // *Оптика и спектроскопия*. – 2022. – Т. 130. – №. 9. [Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Rosanov N. N. Peculiaritie of polarization waves behavior under excitation of an extended resonant medium by overlapping extremely short light pulses // *Optics and Spectroscopy*. – 2022. – Vol. 130. – №. 9. – P.1121].
105. Архипов Р.М., Архипов М.В., Розанов Н.Н. Самокомпрессия и самоостановка световых импульсов в тонкой пленках резонансной среды // *Нанопфизика и наноэлектроника. Труды XXVII международного симпозиума*. – 2023. – Т. 2. – С.525.
106. Пахомов А.В., Архипов М.В., Розанов Н.Н., Архипов Р.М. Когерентная синхронизация мод в лазерах» // *I Самарцевские Чтения (ФЭКС/IWQO-2023): Сборник тезисов*. г. Светлогорск, 18 – 22 сентября 2023 г. / под ред. д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН А.А. Калачева и д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН А.В. Наумова [Электронное издание]. – Москва: Тровант, 2023. – с. 151 – 154.
107. Архипов Р.М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Дьячкова О.О., Розанов Н.Н. Излучение уединенного импульса поляризации, движущегося со скоростью света // *Письма в ЖЭТФ*. – 2023. – Т.117. №. 8. – С.580. [Arkhipov R. M., Arkhipov M.V., Pakhomov A. V., Diachkova O. O., Rosanov N. N. Radiation of a Solitary Polarization Pulse Moving at the Speed of Light // *JETP Letters*. – 2023. – V.117. – №. 8. – P. 574].
108. Архипов Р. М., Архипов М. В., Белов П. А., Пахомов А. В., Розанов Н. Н. Особенности возбуждения частицы в одноуровневой квантовой яме предельно

- коротким аттосекундным импульсом // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131. – №. 1.– С. 72. [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Belov P.A., Pakhomov A. V., Diachkova O. O., Rosanov N. N. Peculiarities of Excitation of a Particle in a Single-Level Quantum Well by an Extremely Short Attosecond Pulse // Optics and Spectroscopy. – 2023. – Vol. 131. – №. 1. – P. 69].
109. Архипов Р. М., Пахомов А. В., Архипов М. В., Розанов Н. Н. Сверхизлучение импульса остановленной поляризации в тонком слое пятиуровневой среды, возбуждаемой субцикловыми аттосекундными импульсами // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131. – №. 1. – С. 77. [Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Rosanov N. N. Superradiance of a Stopped Polarization Pulse in a Thin Layer of a Five-Level Medium Excited by Subcycle Attosecond Pulses // Optics and Spectroscopy. – 2023. – Vol. 131. – №.1. – P. 73].
110. Belov P. A., Arkhipov R. M. Formation of the stopped polarization pulse in a rectangular quantum well // Micro and Nanostructures. – 2023. – Vol. 180. – P. 207607.
111. Архипов Р.М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Дьячкова О.О., Розанов Н.Н. Интерференция электрических площадей и площадей огибающей сверхкоротких световых импульсов в квантовых системах // Изв. вузов. Радиоп физика. – 2023. – Т. 66. – № 4. – С. 317–336. [Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Pakhomov A.V., Diachkova O.O., Rosanov N.N. Interference of the Electric and Envelope Areas of Ultrashort Light Pulses in Quantum Systems // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2023. – Vol. 66. – №. 4. – P.286].
112. Pakhomov A., Arkhipov M., Rosanov N., Arkhipov R. Area theorem in a ring laser cavity // Physical Review A. – 2023. – V.108. – № 2. – P. 023506.
113. Пахомов А.В., Архипов М.В., Розанов Н.Н., Архипов Р.М. Генерация предельно коротких импульсов в лазере с когерентной синхронизацией мод // Сборник трудов XXXIV Всероссийской школы-семинара «Волновые явления: физика и применения» имени А.П. Сухорукова («Волны-2023»), Секция «Оптика предельно коротких импульсов». – с. 17-18.
114. Архипов М. В., Шимко А. А., Архипов Р. М., Розанов Н. Н. Захват частоты генерации титан-сапфирового лазера линиями резонансного поглощения ячейки с парами цезия, размещенными в резонаторе // Журнал прикладной спектроскопии. – 2023. – Т. 90. – №. 2. – С. 149-155. [Arkhipov M. V., Shimko A. A., Arkhipov R. M., Rosanov N. N. Frequency Locking of the Titanium–Sapphire Laser by Resonant Absorption Lines of a Cesium-Vapor Cell in a Cavity // Journal of Applied Spectroscopy. – 2023. – V. 90. – №. 2. – P. 251-256].

115. Архипов Р. М., Архипов М. В., Дьячкова О.О., Пахомов А.В., Розанов Н. Н. Сравнение параметров генерации лазера в режиме когерентной и некогерентной синхронизации мод // Оптика и спектроскопия. – 2023. – Т. 131. – №. 7.– С.933. [Arkhipov R.M., Arkhipov M.V., Dyachkova O.O., Pakhomov A.V., Rosanov N.N. Comparison of the laser generation parameters in the coherent and in the standard incoherent passive mode locking regime // Optics and Spectroscopy. – 2023. – V. 131. – № 7. – P. 884].
116. Diachkova O. O. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Optical microcavity formation and ultrafast control using half-cycle attosecond pulses in two-and three-level media // Optics Communications. – 2024. – Vol. 565. – P. 130666.
117. Arkhipov M., Pakhomov A., Arkhipov R., Rosanov N. Generation of an ultrahigh-repetition-rate optical half-cycle pulse train in the nested quantum wells // Optics Letters. – 2023. – Vol. 47. – №. 16. – P. 4637.
118. Pakhomov A., Rosanov N., Arkhipov M., Arkhipov R. Sub-10 fs unipolar pulses of a tailored waveshape from a multilevel resonant medium // Optics Letters. – 2023. – V. 48. – №. 24. – P. 6504.
119. Arkhipov R., Belov P., Pakhomov A., Arkhipov M., Rosanov N. Excitation and control of level populations in rectangular quantum wells by unipolar half-cycle attosecond pulses // JOSA B. – 2024. – V. 41. – №. 1. – P. 285.
120. A. Pakhomov, N. Rosanov, M. Arkhipov, R. Arkhipov. Coherent control of a multilevel resonant medium by subcycle pulses // JOSA B. – 2024. – V. 41. – №. 1. – P. 46.
121. Пахомов А.В., Розанов Н.Н., Архипов М.В., Архипов Р. М. Правило сохранения электрической площади и применимость различных моделей распространения предельно коротких импульсов // Письма в ЖЭТФ. – 2024. – Т.119. – №.2. – С.100. [Pakhomov A. V., Rosanov N. N., Arkhipov M.V., Arkhipov R. M. Electric Area Conservation Rule and the Validity of Some Models of Subcycle Pulse Propagation // JETP Letters. – 2024. – V. 119. – №. 2. – P. 94].
122. Arkhipov R. M., Diachkova O. O., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Dynamics of microcavities created by nonharmonic unipolar light pulses in a resonant medium // Applied Physics B. – 2024. – V. 130. – №. 3. – P. 52.
123. Pakhomov A., Arkhipov R. Model of coherent passive mode locking in a two-section ring-cavity laser // Phys. Rev. A. – 2024. – V. 130. – №. 3. – P. 52.
124. Архипов Р. М., Дьячкова О. О., Белов П. А., Архипов М. В., Пахомов А.В., Розанов Н.Н. Когерентное управление населенностями связанных состояний в

- квантовых ямах парой полупериодных аттосекундных импульсов // ЖЭТФ. – 2024 (в печати) [Arkhipov R.M., Diachkova O.O., Belov P.A., Arkhipov M.V., Pakhomov A.V., Rozanov N.N. Coherent control of the populations of bound states in quantum wells by a pair of half-cycle attosecond pulses // ЖЭТФ. – 2024 (in press)].
125. Архипов Р. М., Пахомов А.В., Архипов М.В., Розанов Н.Н. Когерентное распространение полужиклового светового импульса в трехуровневой среде // ЖЭТФ. – 2024 (в печати) [Arkhipov R.M., Pakhomov A.V., Arkhipov M.V., Rosanov N.N. Coherent propagation of a half-cycle light pulse in a three-level medium // ЖЭТФ. – 2024 (in press)].
126. Архипов Р. М., Пахомов А.В., Архипов М.В., Розанов Н.Н. Возбуждение и ионизация частицы в двойной квантовой яме предельно коротким световым импульсом // Оптика и спектроскопия. – 2024. – Т. 132. – № 2. – С. 153–160 [Arkhipov R.M., Pakhomov A.V., Arkhipov M.V., Rosanov N.N. Excitation and ionization of a particle in a double quantum well by an extremely short light pulse // Optics and Spectroscopy. – 2024. – V. 132. – No. 2. (in press)].
127. Пахомов А.В., Розанов Н.Н., Архипов М.В., Архипов Р.М., Генерация униполярных фемтосекундных импульсов заданной формы в слое атомарного водорода // Оптика и спектроскопия. – 2024. – Т.132. – № 2. – С.146-152 [Pakhomov A.V., Rosanov N.N., Arkhipov M.V., Arkhipov R.M., Generation of unipolar femtosecond pulses of a given shape in a layer of atomic hydrogen // Optics and Spectroscopy. – 2024. – V.132. – No. 2. (in press)].
128. Розанов Н.Н., Пахомов А.В., Архипов М.В., Архипов Р.М., Электрическая площадь импульса в слое среды с электрической проводимостью // Оптика и спектроскопия. – 2024. – Т.132. – № 2. – С.142-145 [Rosanov N.N., Pakhomov A.V., Arkhipov M.V., Arkhipov R.M. Electrical pulse area in a layer of a medium with electrical conductivity // Optics and Spectroscopy. – 2024. – V.132. – No. 2. (in press)].
129. Архипов Р. М., Архипов М.В., Розанов Н.Н. Сравнение динамики решеток разности населенностей, создаваемых в двухуровневой и трехуровневой среде полужикловыми световыми импульсами // Оптика и спектроскопия. – 2024. – Т.132. – № 4. – С.434-439 [Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Rosanov N. N. Comparison of the dynamics of population difference gratings created in a two-level and three-level medium by half-cycle light pulses // Optics and Spectroscopy. – 2024 (in press)].
130. Архипов Р. М., Розанов Н.Н. Создание динамического микрорезонатора при столкновении полужикловых световых импульсов в резонансной среде // Оптика и спектроскопия. – Т. 132. – No.5.– 2024 (в печати) [Arkhipov R. M., Rosanov N. N.

- Creation of a dynamic microcavity by collision of half-cycle light pulses in a resonant medium // *Optics and Spectroscopy*. –V.132. – No.5. – 2024 (in press)].
131. Arkhipov R. Electromagnetically induced gratings created by extremely short non-overlapping pulses of light in a three-level resonant medium // *Laser Physics*. –2024. – V.34. – No.6. –P. 065301.
132. Arkhipov R., Pakhomov A., Diachkova O., Arkhipov M., Rosanov N. Bragg-like microcavity formed by collision of single-cycle self-induced transparency light pulses in a resonant medium // *Opt. Lett.* –2024. – V.49. – No. 10. – P. 2549.
133. Пахомов А. В., Архипов М.В., Розанов Н.Н., Архипов Р.М. Распространение униполярного полуволнового импульса в усиливающей трёхуровневой среде // *Оптика и спектроскопия*. – 2024. – Т. 132. – No.4. – С.440-447 [Pakhomov A.V., Arkhipov M.V., Rosanov N.N., Arkhipov R.M. Propagation of a unipolar half-cycle pulse in a three-level amplifying medium // *Optics and Spectroscopy*. – V.132. – No.4. – 2024 (in press)].
134. Розанов Н. Н., Архипов М. В., Архипов Р. М., Пахомов А. В. Униполярные и квазиуниполярные терагерцовые и оптические импульсы // Коллективная монография «Терагерцовая фотоника». – Под ред. В. Я. Панченко, А. П. Шкуринов. – Москва. – Российская академия наук. – 2023. – стр. 360-393 [Rosanov N. N., Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Pakhomov A. V. Unipolar and quasi-unipolar terahertz and optical pulses // *Collective monograph “Terahertz Photonics”*. – Ed. V. Ya. Panchenko V. Ya., A. P. Shkurinov A. P. – Moscow. – The Russian Academy of Sciences. – 2023. – pp. 360-393].

## Часть II

### Научный доклад

#### Введение

Излучение квантовых систем (атомов, молекул, наноструктур, твердых тел) в процессе спонтанного излучения или их стимулированное излучение в случае лазерных источников имеет вид многоцикловых связанных между собой гармонических волн напряженности электрического и магнитного поля. В любой точке пространства на пути такого света интеграл по времени от напряженности электрического поля,

$$S_E(x, y, z, t) = \int E(x, y, z, t) dt, \quad (1)$$

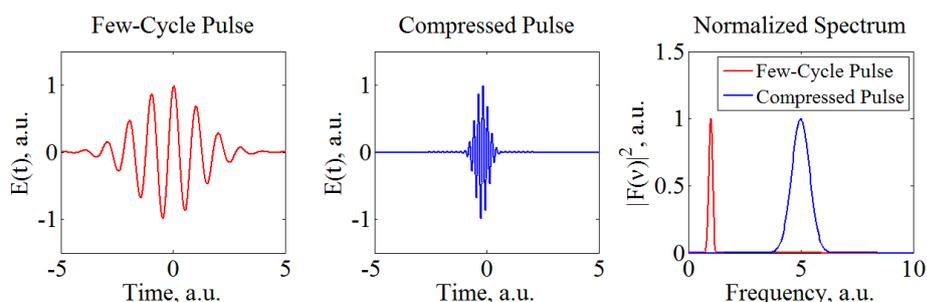
всегда равен нулю [1].

Неосуществимой кажется ситуация, когда в отсутствие статических полей от зарядов значение этого интеграла было бы отличным от нуля. В классических и современных учебниках по оптике не найти упоминания о световых полях с негармонической зависимостью, приводящей к ненулевому значению данного интеграла. Исключение составляет, по-видимому, классический учебник Дж. Джексона “Классическая электродинамика”, в котором электрическая площадь импульса называется «интегралом от поля по времени» [2]. В нем была показана возможность существования импульсов поля с ненулевой электрической площадью при релятивистском движении заряда. Также возможность генерации последовательности импульсов, имеющих характерную субцикловую форму, в синхротронном излучении показана в классических обзорах и монографиях академика В.Л. Гинзбурга и соавторов [3-5], опубликованных в середине прошлого столетия.

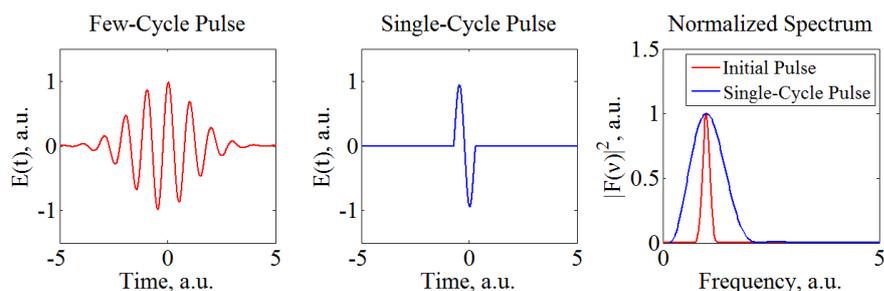
Причина кажущейся неосуществимости импульсов с ненулевой электрической площадью связана с отсутствием на данный момент источников излучения с ненулевой электрической площадью в видимой области и примыкающей к нему диапазонам спектра. Такая ситуация, с нашей точки зрения, и привела к распространенному среди физиков мнению о невозможности существования таких волн для электромагнитных полей.

В последние годы в практике физического эксперимента стали доступны импульсы вплоть до одного цикла колебаний [6-12]. В отдельных работах были получены импульсы, которые обладали выраженным интенсивным всплеском поля одной полярности и осцилляциями малой амплитуды на переднем и заднем фронте противоположной полярности [13-18], которые компенсирует короткий униполярный всплеск и обнуляют интеграл (1). Подобные ситуации наводят на мысли, можно ли оставить в излучении только всплеск одной полярности? Однако, такое излучение будет обладать ненулевой электрической площадью, что вызывает, как мы уже упоминали, определенные сомнения. Тем не менее одиночные разрозненные работы, скорее математического характера и не получившие широкого признания, появлялись в разные годы. Трансформации формы электромагнитных импульсов, происходящие при их сокращении, иллюстрирует рис.1. Примеры таких работ, это эффект самоиндуцированной прозрачности в двухуровневой системе под действием полуволны с ненулевым интегралом от напряженности электрического поля по времени, был изучен теоретически в работе 1971 года Бюллоу и Ахмада [19]. В российской литературе Н.Г. Бессонов применительно к неравномерному движению заряженной частицы рассмотрел вопрос о полях с ненулевым интегралом от напряженности поля по времени [20, 21]. Необычность таких импульсов выразилось в названии, которое Н.Г. Бессонов дал таким волнам - “странные волны”.

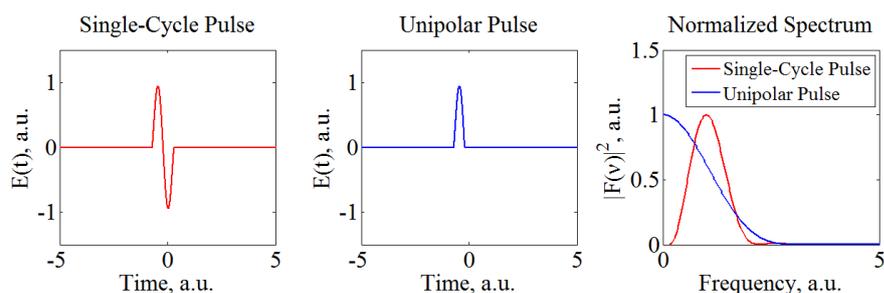
В первом десятилетии XXI столетия Н.Н. Розанов был одним из первых, кто вплотную занялся вопросом о волнах с ненулевым интегралом от напряженности поля [22] (обзор более ранних работ приведен в [23-29]). В работе [22] им было обнаружено, что величина упоминаемого интеграла при определенных условиях подчиняется правилам, которые можно рассматривать, как законы сохранения. Введен термин “электрическая площадь импульса”. Т.о., интеграл (1) связан с физическим законом сохранения и поэтому, имеет особый и важный физический смысл. Он не только отражает факт принадлежности к униполярному или биполярному излучению.



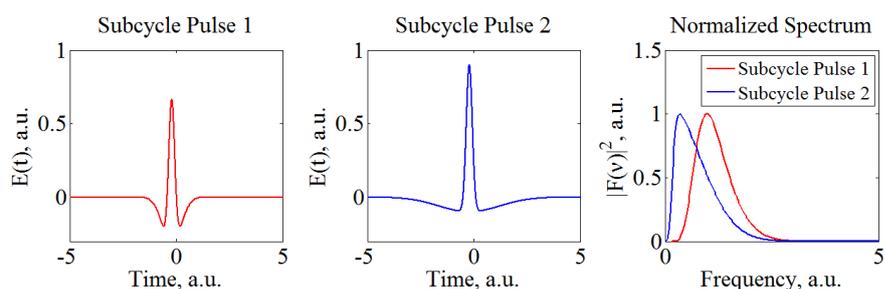
А) Сокращение длительности происходит за счет увеличения частоты несущей при сохранении количества циклов колебаний поля в импульсе. В таком случае спектр излучения смещается в коротковолновую область.



В) Сокращение длительности за счет уменьшения числа циклов вплоть до одного. Спектр импульса уширяется, его максимум не смещается.



С) Устранение из одноциклового импульса одной из полуциклов поля. Импульс становится полуцикловым (используется также термин субцикловый). В спектре появляется компонента на нулевой частоте. Электрическая площадь импульса не равна нулю.



Д) Субцикловый импульс не обязательно является униполярным. Он может иметь длинные хвосты с малой амплитудой. За счет их присутствия электрическая площадь равна нулю. И отсутствует компонента спектра на нулевой частоте.

**Рис. 1.** Варианты изменений формы импульса при сокращении его длительности. В ситуации А и В импульсы биполярны. В случае С импульс униполярен, в D квазиуниполярен. Термин “квазиуниполярен” применяется, чтобы отметить присутствие короткого всплеска поля большой амплитуды одной полярности, которое делает импульс похожим на униполярный, но из-за наличия хвостов он таковым не является.

## О существовании униполярных импульсов в оптике

Перечисленные выше работы не привлекли внимания научного сообщества. Они вызывали непонимание и рассматривались как формальные математические вычисления, не имеющие значимого физического смысла и практического значения. Более того, высказывалось мнение о невозможности самого существования такого излучения, его получения и распространения подобных импульсов в пространстве (см., например, [30-31] и цитируемую литературу).

Для понимания и решения проблемы униполярного излучения надо выделить следующие аспекты.

Первый. Необходимо строгое в рамках классической электродинамики обоснование возможности существования униполярных импульсов, описание их распространения в пространстве.

Второй. Предложить принципы получения таких импульсов.

Третий. Практический аспект униполярности. Здесь важно понимание того, что излучение может не обладать униполярностью в строгом соответствии со строгим математическим определением этого понятия по формуле (1). Интеграл равен нулю. Но само излучение может иметь вид коротких всплесков напряженности поля в противоположных направлениях, интервал во времени между которыми, например, достаточно велик. Или иметь вид одного всплеска с длинным задним фронтом малой амплитуды. При этом действие таких импульсов может оказаться эквивалентным воздействию униполярного импульса.

Строгое обоснование существования импульсов с ненулевой электрической площадью существует. Оно сделано в работах [32-38] ([25а, 65а]). Примеры получения таких импульсов приведены в работах соискателя [14а-17а, 20а, 26а, 68а, 87а, 95а, 103а, 117а, 118а, 127а], см. также обзоры [37-40] ([25а, 48а, 54а, 65а, 90а, 98а, 134а]) и цитируемую литературу). Более того, недавно появились как экспериментальные работы, в которых показана возможность получения униполярных импульсов в радиодиапазоне [41,42], так и работа соискателя, в которых показано наличие униполярности в терагерцовом диапазоне [43] ([87а]).

### **Электрическая площадь импульса, ее физический смысл**

Привычной ситуацией в линейной и нелинейной оптике является резонансное взаимодействие излучения с веществом. Даже вдали от линий поглощения многоцикловое излучение вызывает пусть и малое, но периодическое движение зарядов, заставляя частоту колебаний поляризации среды следовать за частотой вынуждающего поля. Понятно, что выработанные теоретические подходы и выводы теории взаимодействия такого излучения с веществом не применимы для униполярного излучения. Короткий униполярный импульс обладает широким спектром, обладающим ненулевой составляющей на нулевой частоте спектра. Подобное излучение будет одновременно воздействовать на все переходы в квантовой системе (атома, молекулы, твердого тела и т.п.), частоты которых покрывают спектр такого униполярного импульса.

С точки зрения воздействия на квантовую систему короткий униполярный импульс передает механический импульс квантовой системе в одном выделенном направлении. Здесь не столь важна ширина и форма спектра, как его электрическая площадь. После чего система оказывается в суперпозиционном состоянии. Она остается в нем в течение времени фазовой релаксации, а распределение заселенностей по уровням будет в первую очередь зависеть от дипольных моментов и расположения энергетических уровней.

С точки зрения электродинамики короткий униполярный импульс при распространении будет подчиняться правилам сохранения электрической площади. Заметим, что вопрос об электрической площади в оптике многоцикловых импульсов не возникал, так же не было задач трансформации многоцикловых импульсов в униполярные.

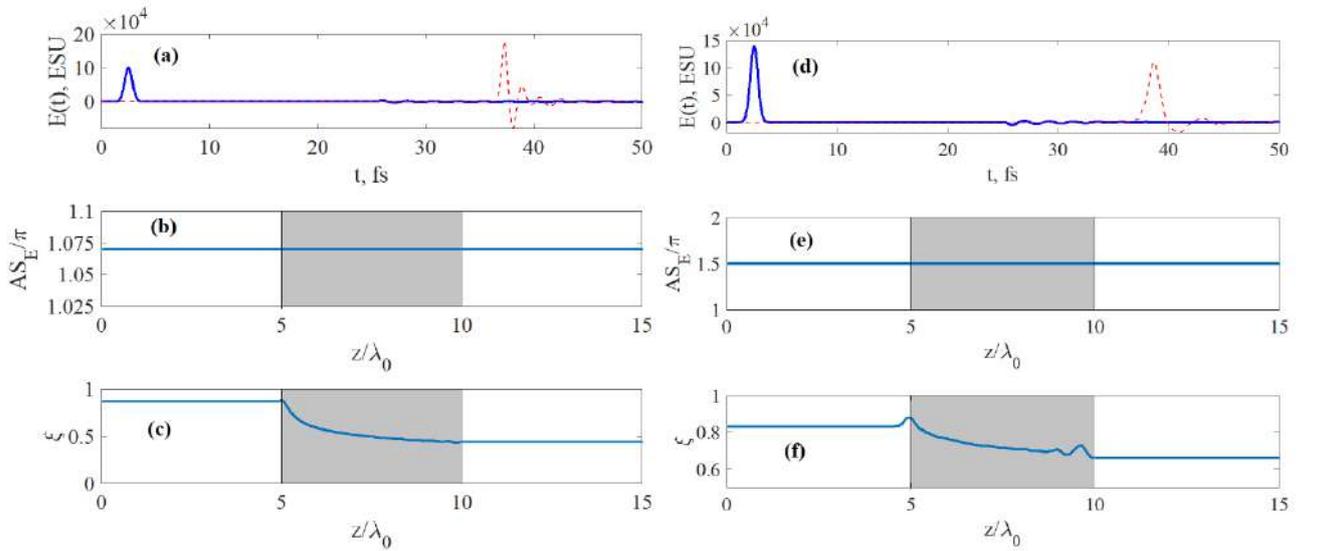
### **Правило сохранения электрической площади и его проверка**

Впервые формулировка Правила сохранения электрической площади импульса была дана Н.Н. Розановым в работе [22]. Для величины электрической площади излучения в диссипативной системе  $\text{rot } \mathbf{S}_E = 0$ . В одномерном случае это выражение принимает вид  $\frac{d}{dz} \mathbf{S}_E = 0$ . Одномерная модель наиболее часто применяется в нелинейной оптике и лазерной физике. Это правило противоречит на первый взгляд физической интуиции.

Выполнение этого правила показано в численных расчетах, которые приведены в работах [44-46] ([29а, 44а, 75а, 121а, 133а]) для распространения короткого импульса света в поглощающей и в усиливающей среде. Также в этих работах показано, что правило сохранения площадей обладает предсказательной силой. Другим следствием этого правила

является то, что униполярные импульсы могут формироваться из биполярного путем разделения последнего на субимпульсы противоположной полярности [68a]. Также возможно формирование униполярного импульса в одномерной геометрии при отражении падающего одноциклового импульса от границ среды [47] ([26a]). Надо отметить, что, несмотря на проработанность вопроса о возможности существования униполярных импульсов, дискуссии вокруг этого вопроса и терминологии продолжаются [48].

Примеры расчетов, показывающих выполнение правила сохранения электрической площади и поведение степени униполярности в случае усиливающей и поглощающих сред приведены на рис. 2.



**Рис.2.** Распространение униполярного импульса с начальной электрической площадью  $S_E \cong 1.07\pi/A$  в двухуровневой усиливающей среде (a)-(c). (a): Зависимость напряженности электрического поля от времени на входе в усиливающую среду (синяя линия) и на выходе из среды (красная линия), (b): Зависимость электрической площади от координаты на трассе распространения, параметр  $A = 2d_{12}/\hbar$ , (c): Зависимость степени униполярности  $\xi$  от координаты на трассе распространения. Усиливающая среда расположена между точками  $z_1 = 5\lambda_0$  и  $z_2 = 10\lambda_0$ . Область, в которой располагается среда, отмечена серым фоном на рис. (b), (c).

Параметры расчета: длина волны резонансного перехода  $\lambda_0 = 700$  nm, дипольный момент перехода  $d_{12} = 20$  D, времена релаксации  $T_1 = 50$  fs,  $T_2 = 5$  fs, концентрация усиливающих частиц  $N_0 = 10^{20}$  cm<sup>-3</sup>, амплитуда возбуждающего импульса  $E_0 = 10^5$  ESU, длительность импульса  $\tau = 500$  as.

(d)-(f): Распространение униполярного импульса с начальной электрической площадью  $S_E = 1.5\pi/A$  в двухуровневой поглощающей среде. (d): Зависимость напряженности электрического поля от времени на входе в поглощающую среду (синяя линия) и на выходе из среды (красная линия), (e): Зависимость электрической площади от координаты на трассе распространения, параметр  $A = 2d_{12}/\hbar$ , (f): Зависимость степени униполярности  $\xi$  от координаты на трассе распространения. Поглощающая среда расположена между точками  $z_1 = 5\lambda_0$  и  $z_2 = 10\lambda_0$ . Область, в которой располагается среда, отмечена серым фоном на рис. (e) и (f). амплитуда возбуждающего импульса  $E_0 = 1.4 \cdot 10^4$  ESU. Остальные параметры такие же, как на рис.2a-c.

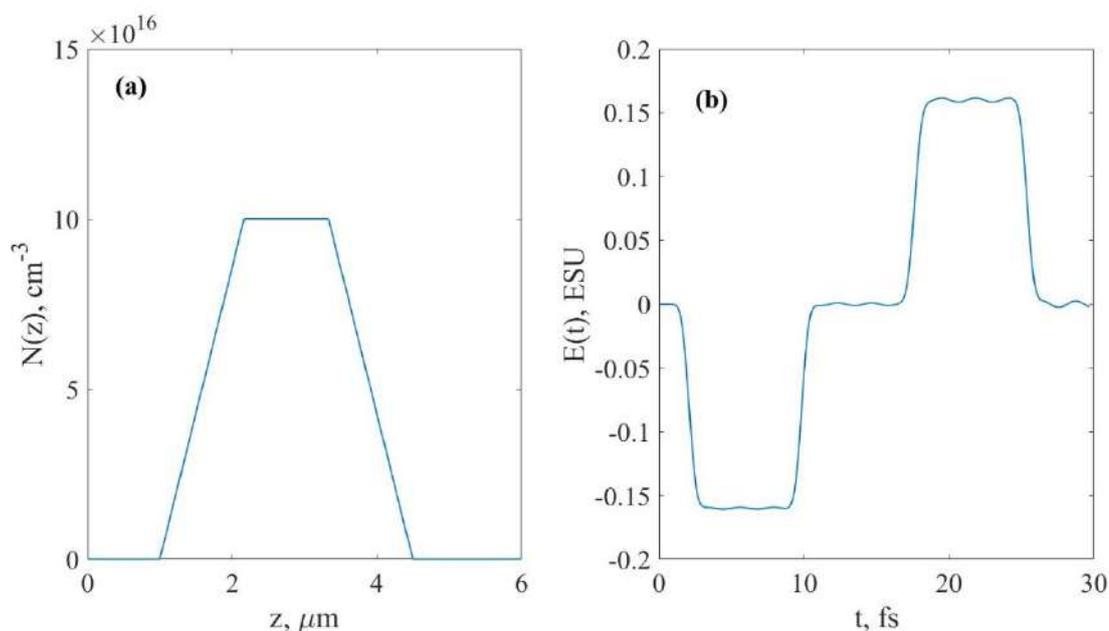
## Получение квазиуниполярных импульсов

Если и получение “чистых” униполярных импульсов, содержащих только один всплеск поля, и вызывает пока практические сложности, то формирование импульсов,

имеющих один интенсивный всплеск и малоамплитудные осцилляции противоположной полярности на фронтах этого всплеска, сводящие электрическую площадь к нулю, не имеет тех ограничений, которые есть при получении “чистых” униполярных импульсов. Такие импульсы также имеют практическую ценность, так как их воздействие может не отличаться от воздействия чисто униполярных импульсов [59а]. В нелинейных процессах основную роль будет играть короткий интенсивный всплеск. Спектр короткого всплеска шире, чем спектр осцилляций поля с противоположной полярностью. Поэтому в круг рассматриваемых вопросов включены и субцикловые импульсы, электрическая площадь которых может быть равна 0.

Одноцикловый биполярный импульс с нулевой площадью, имеющий один период колебаний поля, также является интересным объектом, который можно трансформировать в квазиуниполярный и униполярный импульс. Поэтому получение такого излучения и его трансформации входили в круг интересов проведенного исследования. Соискателем предложен ряд способов получения униполярных и квазиуниполярных импульсов, например, при отражении одноциклового импульса от тонкой металлической или диэлектрической пленки [47] ([26а]). Теоретически показана возможность получения квазиуниполярных импульсов необычной формы (прямоугольной, треугольной) за счет сверхизлучения импульса остановленной поляризации, как в однородной, так и пространственно-неоднородной среде [49-57] ([14а-17а, 20а, 95а, 103а, 118а, 127а]). Примеры временной формы таких импульсов приведены на рис. 3.

Показана возможность преобразования униполярных импульсов за счет временного интегрирования и дифференцирования напряженности электрического поля при взаимодействии с тонкими металлическими пленками (подобные операции ранее можно было осуществлять в радиотехнике с электрическими сигналами в RC-цепочках или с огибающими длинных многоцикловых импульсов) [77а,83а]. Экспериментально получены ненулевые значения электрической площади у терагерцового излучения различных источников [43] ([87а]).



**Рис. 3.** Пример, иллюстрирующий возможность излучения униполярных импульсов необычной временной формы (в данном примере прямоугольной) за счет излучения импульса остановленной поляризации в пространственно-неоднородной среде. (а): Пространственный профиль концентрации среды, (б): напряженность поля излучения, сформированная слоем среды. Пространственная плотность вещества на крае слоя толщиной 3.5 мкм нарастает по линейному закону, внутри среды постоянна на длине 1.3 мкм, на следующей границе среды спадает до нуля по линейному закону. Линейное нарастание и спад приводит к излучению пары приблизительно прямоугольных импульсов, противоположной полярности. Резонансная среда возбуждается парой полуволновых импульсов с амплитудой  $E_0 = 10^5$  ESU, длительностью  $\tau = 400$  as. Задержка между импульсами равна половине периода резонансного перехода среды,  $\frac{T_0}{2} = 1.2$  fs. В этом случае первый возбуждающий импульс создает колебания поляризации среды на частоте резонансного перехода, а второй импульс выключает эти колебания. Это приводит к тому, что в среде формируется так называемый импульс остановленной поляризации в форме полуволны, который распространяется по среде вместе возбуждающими импульсами и излучает назад пару прямоугольных импульсов, изображенных на правом рисунке. Подробнее см. [56-57] ([14a-17a, 20a, 95a, 103a, 118a, 127a]).

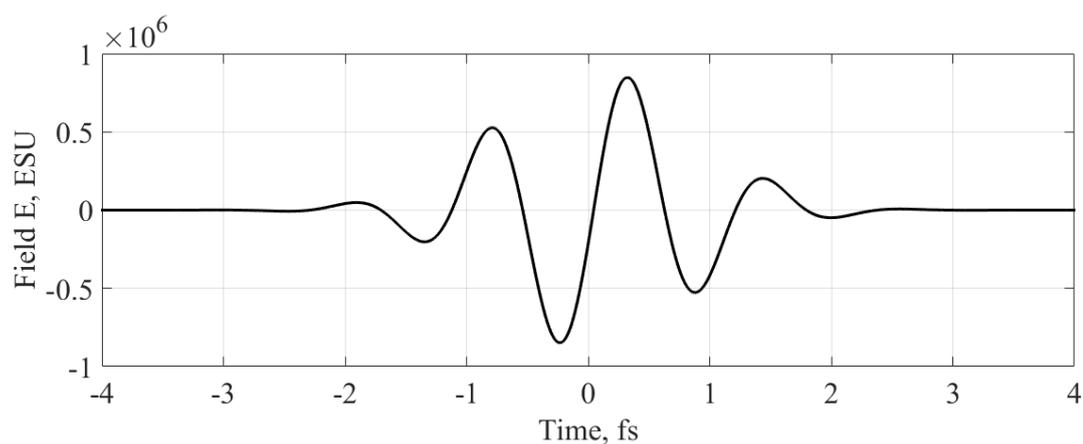
### Субцикловые импульсы в экстремальной нелинейной оптике – самокомпрессия и самоостановка света

Согласно сложившейся традиции, многие задачи нелинейной оптики решаются в двухуровневом приближении. С одной стороны, двухуровневая модель не обладает математической сложностью. С другой стороны, она, конечно, не всегда позволяет адекватно описать взаимодействие со сложными многоуровневыми системами. Полученные в ее рамках результаты имеют эвристическую ценность, указывают на некоторые интересные вопросы, требующие дальнейшего детального изучения. Уместно еще раз вспомнить работу Бюллоу [19], где униполярный импульс формировал солитон самоиндуцированной прозрачности. Другим примером является хорошо известная работа Каплана и соавторов [60], в которых показана возможность формирования униполярных

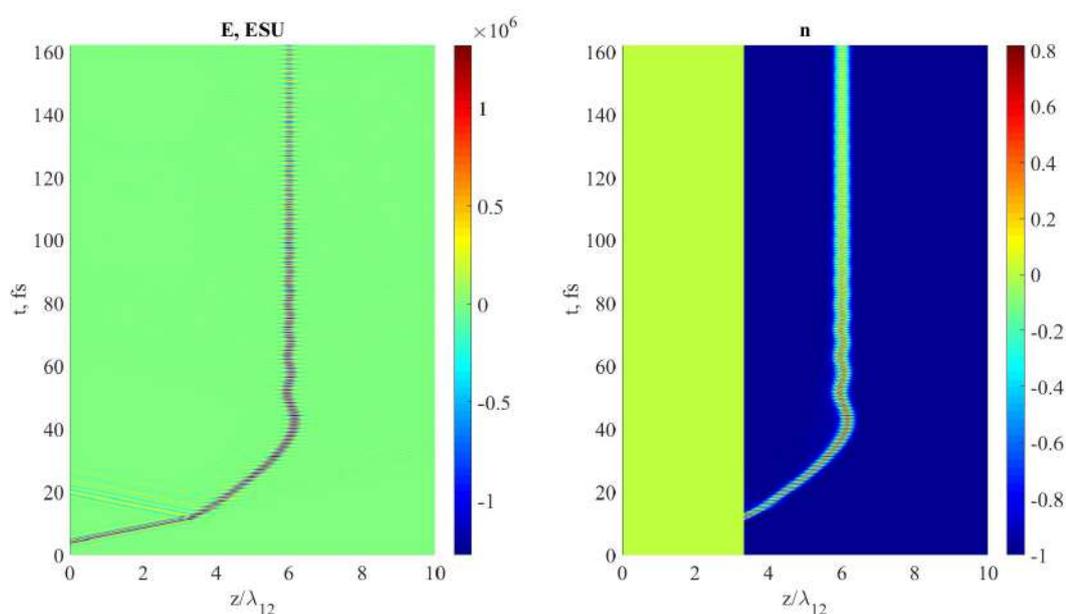
солитонов в газовой среде. В настоящий момент, например, в работах С.В. Сазонова, рассматриваются вполне реалистичные многоуровневые (и двухуровневые) среды, в которых такие солитоны имеют место быть [24, 28, 29, 61-64].

С эвристическим смыслом были выполнены и работы соискателя, в которых одноцикловый импульс в двухуровневой среде трансформировался в более короткий одноцикловый импульс – испытывал резонансную компрессию [65] ([73a]). Также одноцикловый импульс мог превращаться в субцикловый при столкновении с другим одноцикловым импульсом и при распространении в резонансной среде превращался в пару разнесенных во времени униполярных импульсов с противоположным направлением полярности [66] ([68a]).

Другой интересный эффект в двухуровневой среде — это эффект самоостановки света [67] ([93a, 98a]). Было обнаружено замедление импульса вплоть до его полной остановки и формирование локализованного осциллона, см. рис. 4. Короткий импульс начинает распространяться в режиме самоиндуцированной прозрачности, затем замедляется и останавливается. В области остановки происходит полный обмен энергией между средой и полем. Излучение полностью поглощается, среда возбуждается. Затем среда отдает энергию полю. В среде присутствует осциллирующая неподвижная полуволна поля. Структура имеет характер неподвижного осциллона. В области пространства с размером половина длины волны резонансного перехода, в неподвижном образовании происходил быстрый обмен энергией между полем и веществом. В моменты времени, когда поле равнялось нулю, вся энергия была в возбужденном веществе. Затем вся энергия уходила в поле из вещества и вещество было в невозбужденном состоянии. И так далее [93a, 98a].



(a)



(b)

**Рис.4.** Самоостановка света [93a].

- (a) - Зависимость напряженности электрического поля  $E$  в исходном импульсе.  
 (b) - Зависимость напряженности поля  $E$  и инверсии  $n$  от координаты и времени, демонстрирующая самоостановку импульса в плотной резонансной двухуровневой среде.

Концентрация поглощающих частиц  $N_0 = 1.8 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ , дипольный момент перехода 5 Дебай. Времена релаксации  $T_1 = T_2 = 10^{-13} \text{ с}$ . Длина волны перехода в среде  $\lambda_{12} = 0.7 \text{ мкм}$ .

Работа вызвала дискуссию. Может ли такое быть в реальных многоуровневых системах? На наш взгляд, ценность полученного результата состоит в том, что здесь продемонстрирован возможный сценарий эффекта самоостановки света в оптически плотных резонансных средах, в которых распространяются малоцикловые импульсы света.

Это замедление импульса, вследствие частичной потери энергии, а потом образование структуры, где происходит полный обратимый обмен энергией между полем импульса и средой. Если проводить аналогию с эффектом самоиндуцированной прозрачности, в котором передний фронт импульса отдает энергию, а задний фронт импульса забирает ее, то в момент остановки эти процессы происходят в одной области пространства, передние и задние фронты исчезают, а моменты обмена энергии разнесены во времени.

### Атомная мера электрической площади

Изучение вопросов взаимодействия униполярных и субцикловых импульсов с веществом ставит вопрос об оценке степени их воздействия на микрообъекты. Для характеристики воздействия униполярных импульсов на квантовые объекты соискателем была предложена новая физическая величина – «атомная мера» площади  $S_0$  [68-70] ([79а, 86а, 88а, 91а, 108а, 126а]). Она равна отношению постоянной Планка  $\hbar$  к характерному размеру микрообъекта  $a$ , умноженному на заряд электрона  $q$ ,  $S_0 = \hbar/aq$ . Данная величина является универсальной в том смысле, что она может быть использована для оценки степени эффективности действия предельно коротких импульсов на различные квантовые системы – атомы, молекулы, ионы, экситоны в твердом теле и т.д. Физический смысл  $S_0$  заключается в том, что она задает масштаб воздействия импульса на квантовую систему. В квантовой системе с характерным размером  $\sim a$  импульс, в силу соотношения неопределенности Гейзенберга, имеет порядок величины  $\hbar/a$ . С другой стороны, электрическая площадь импульса совпадает с изменением под его действием среднего квантовомеханического значения импульса, отнесенного к единичному электрическому заряду системы [71]. Тем самым, атомная мера электрической площади импульса отвечает вызванному им изменению импульса квантовой системы, равному характерному квантовомеханическому импульсу «свободной» системы.

Полученные выражения «меры площади» для простейших квантовых систем - водородоподобной системы, гармонического осциллятора, жесткого ротатора и частицы в потенциальном ящике – по физическому смыслу одинаковы. Для них мера электрической площади импульса обратно пропорциональна характерному размеру системы. Можно считать, что эта величина, как и боровский радиус и величина атомной напряженности поля, играющие роль масштаба атомных размеров и полей, имеет смысл масштаба воздействия предельно коротких униполярных импульсов на квантовые системы. Полученное соотношение имеет простой вид и смысл. Оно крайне удобно для оценок

параметров импульсного нерезонансного излучения, необходимого для возбуждения электронов в атомах, водородоподобных образованиях (экситонов) в твердых телах, возбуждения колебаний и вращения молекул. Его можно применить для оценки возможности возбуждения электронов в наночастицах, когда их движение хорошо аппроксимируется потенциалом типа “ящика” с высокими стенками.

### **Интерференция электрических площадей импульсов**

Площадь импульса является мерой воздействия на квантовые системы. Интересна ситуация, когда на систему воздействует несколько коротких униполярных импульсов. После каждого из них механический импульс системы меняется. Но при этом не происходит прямого суммирования импульсов. Это связано с тем, что в связанных состояниях в квантовой системе движение частицы сопровождается изменением направления и соответственно периодически меняется направление и величина импульса. При небольших возбуждениях системы допустима аналогия с классическим гармоническим осциллятором, амплитуда колебаний которого пропорциональна величине возбуждения. Если на осциллятор действовать двумя одинаковыми униполярными импульсами, то результат воздействия будет зависеть от интервала времени между импульсами. Если 2й импульс придет через половину периода колебаний осциллятора, то он остановит движение осциллятора. А если через период колебаний, то он увеличит амплитуду движения осциллятора. Эти рассуждения иллюстрируют основную идею интерференции электрических площадей при их воздействии на квантовую систему. В условиях применимости теории возмущений неважно, в какой последовательности действуют импульсы, а важно, какой временной интервал между ними. Строгие вычисления показывают, что формула для населенностей возбуждения квантовой системы внешне аналогична формуле интенсивности при интерференции двух монохроматических волн, только вместо интенсивностей волн стоят квадраты амплитуд электрических площадей импульсов [81a, 92a, 111a]. Идея электрических площадей импульсов применима и к интерференции электрической площади униполярного импульса с многоцикловым импульсом. Только в случае многоцикловых импульсов берется площадь их огибающей [81a, 92a, 111a].

## **Формирование решеток разности заселенностей и волн поляризации под действием униполярных и субцикловых импульсов**

Монохроматическое и импульсное квазимонохроматическое лазерное излучение активно используется для создания в резонансной среде пространственно-периодических решеток атомных заселенностей, возникающих при интерференции двух и более пучков света [74]. Однако, создание таких решеток может происходить и в случае, когда лазерные пучки одновременно не перекрываются в среде. Впервые данная возможность была продемонстрирована уже в первых экспериментах по наблюдению фотонного эха [75-76]. Теоретические основы данного явления применительно к фотонному эху в случае длинных многоцикловых импульсов были заложены Е.И. Штырковым с соавторами [77-78], резюмированы в обзоре Е.И. Штыркова [79]. Также ранние и последние результаты резюмированы в обзоре соискателя [80a]. Для создания решеток необходимо, чтобы взаимодействие импульсов со средой было когерентным, т.е. длительность импульсов и интервал времени между приходом их в область регистрации были бы значительно меньше времени релаксации поляризации  $T_2$  среды. Физический механизм создания решеток здесь связан с интерференцией падающего импульса с волной макроскопической поляризации среды, наведенной в среде предыдущим импульсом. А взаимодействие бегущей волны поляризации, которую создает после себя первый импульс, со вторым импульсом за счет интерференции электрических площадей (или площадей огибающих) падающих импульсов, приводит к созданию решеток населенностей.

Соискателем был детально исследован вопрос о применении униполярных и субцикловых импульсов для создания решеток [18a, 19a, 29a, 30a, 31a, 70a, 80a]. Наведение решеток с помощью таких импульсов обладает тем достоинством, что, ввиду малой длительности импульсов (порядка периода колебаний поля и менее), оно дает возможность управлять свойствами среды на аттосекундных временных масштабах. А это важно при разработке сверхбыстрых оптических устройств.

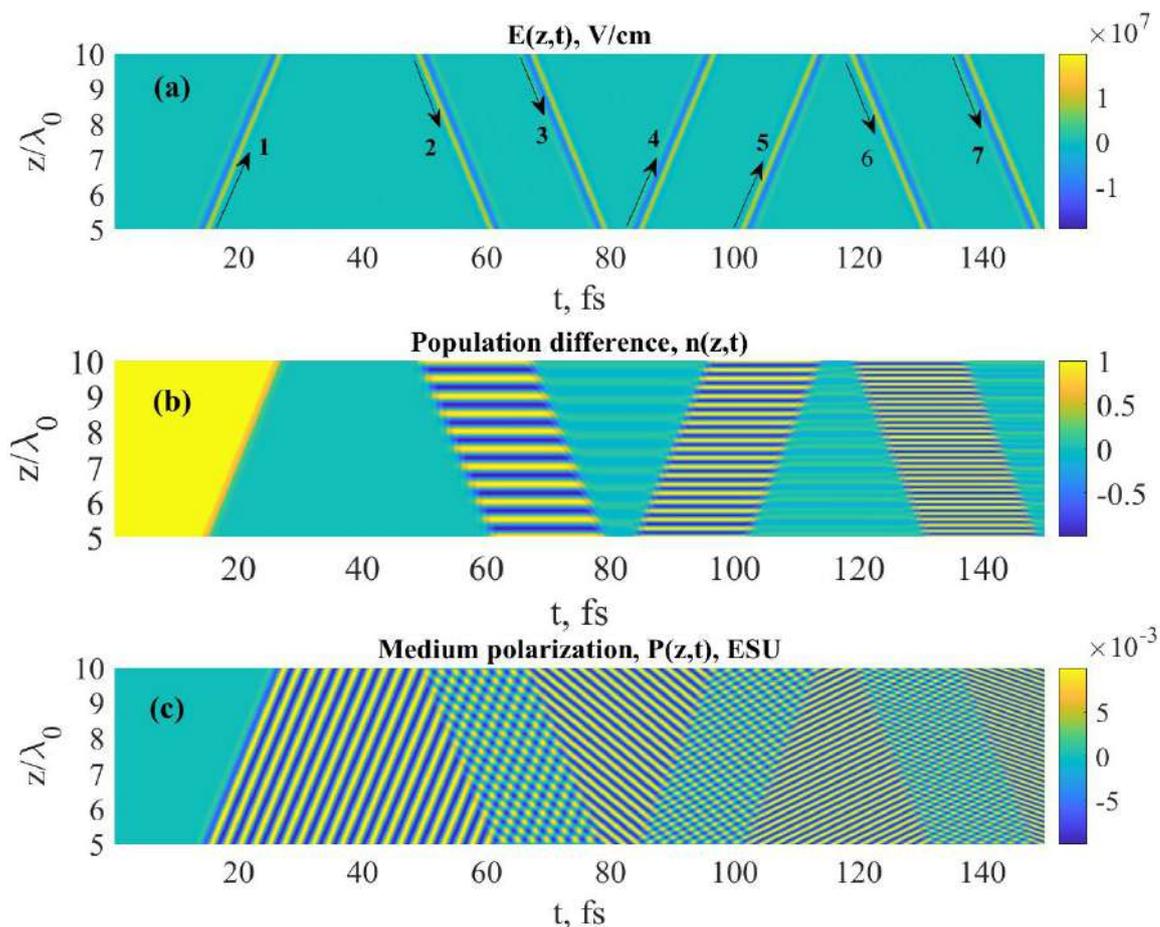
В исследовании соискателя *впервые* построена теория и показана возможность создания, наведения, стирания и сверхбыстрого управления решетками поляризации и разности населенностей с помощью последовательности аттосекундных субцикловых и униполярных импульсов, не перекрывающихся в среде. При этом, *в отличие от предыдущих исследований*, в которых для создания решеток использовались длинные наносекундные импульсы, в проведенных соискателем теоретических исследованиях:

- развита теория наведения решеток встречными предельно короткими импульсами, обладающими широким спектром [81-85] ([18a, 19a, 29a, 30a, 31a, 70a, 80a]), при воздействии на среду как биполярных одноцикловых импульсов, так и униполярных субцикловых ПКИ;
- показана возможность *сверхбыстро* (аттосекундные масштабы) создавать решетки и управлять их свойствами – стирать, мультиплицировать пространственную частоту [81-85,91] ([18a, 19a, 29a, 30a, 31a, 70a, 80a]);
- показана возможность существования медленных волн поляризации среды, распространяющихся со скоростью во много раз меньшей скорости света  $c$  [82] ([19a]);
- впервые изучен сценарий формирования решеток в условиях, когда предельно короткие импульсы встречаются в центральной области среды [86-87] [32a, 36a]. При этом показано, что состояние среды справа от области перекрытия импульсов может отличаться от состояния среды слева от этой области [36a]. Например, в них возникают волны поляризации с троекратно различающимся пространственным периодом. Эти волны бегут в противоположных направлениях с существенно различающимися фазовыми скоростями [36a];
- показана возможность наведения решеток с помощью коротких терагерцовых импульсов на колебательных переходах, частота которых также лежит в ТГц диапазоне [88, 91] ([43a, 70a]);
- показана возможность использования для наведения решеток ТГц импульсов с амплитудой, на несколько порядков меньше амплитуды аттосекундных импульсов, что свидетельствует о перспективности экспериментального наблюдения эффекта в ТГц диапазоне частот и ТГц голографии [91] ([70a]);
- впервые показана возможность наведения решеток в многоуровневой квантовой системе на основании решения уравнений Шредингера, в отличие от предыдущих исследований авторов, проведенных в двухуровневом приближении [89-93] ([50a, 59a, 70a, 97a, 100a, 124a]);

- показана возможность наведения решеток негармонической формы в виде светоиндуцированных каналов, своеобразных микрорезонаторов, с размером порядка длины волны резонансного перехода среды, параметры которых можно регулировать, например, амплитудой падающих импульсов [95-96] (96а, 101а, 122а). Данные структуры возникают при столкновении последовательности негармонических униполярных импульсов прямоугольной формы в резонансной среде. В работе соискатель вышел за рамки квазимонохроматических электромагнитных импульсов излучения. Предложены варианты получения импульсов негармонической формы, например, прямоугольной и треугольной, которые могут создавать негармонические формы решеток в виде каналов, микрорезонаторов;

- показана возможность голографической записи информации об объекте со сверхвысоким временным разрешением с помощью униполярных импульсов без взаимной когерентности между опорным и предметным пучком [97] ([62а]).

Рассмотренные способы создания решеток перспективны для создания полностью оптических дефлекторов лазерного излучения с исключительно высоким быстродействием. Это может найти применение в сверхбыстрых системах передачи и обработке информации. Типичные примеры динамики таких решеток приведены на рис. 5. Данный пример иллюстрирует возможность создания, стирания и мультиплицирования пространственного периода решетки в результате взаимодействия импульса с волной поляризацией, распространяющейся медленнее скорости света.



**Рис.5.** (а): Схема распространения одноцикловых световых импульсов, воздействующих на двухуровневую среду (направления их распространения в заданные моменты времени показаны стрелками, номера импульсов указаны цифрами), (b): пример пространственно-временной динамики поведения разности населенности  $n(z, t)$ , (с): поляризации среды  $P(z, t)$ . Результаты получены на основании численного решения системы уравнений Максвелла-Блоха для двухуровневой среды. Параметры расчета: падающий импульс имел форму:  $E(t) = E_0 e^{-\frac{t^2}{\tau^2}} \sin \omega_0 t$ . Амплитуда  $E_0 = 12 \cdot 10^6$  V/cm, длительность  $\tau = 1.1$  fs. Параметры двухуровневой среды: дипольный момент перехода:  $d_{12} = 20$  D, концентрация частиц:  $N_0 = 5 \cdot 10^{14}$  cm $^{-3}$ , времена релаксации  $T_1 = T_2 = 1$  ns, длина волны резонансного перехода  $\lambda_0 = 700$  nm.

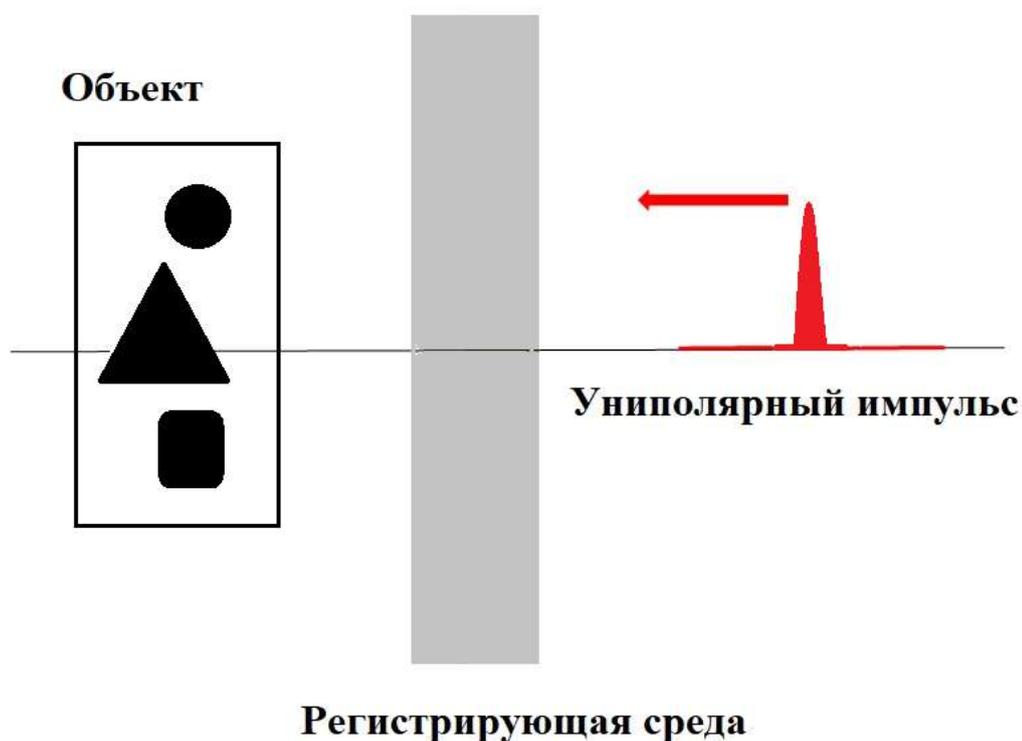
В этом примере в среде распространяются навстречу друг другу одноцикловые импульсы, одномоментно не перекрывающиеся в среде. Импульс 1 действует как  $\pi/2$ -подобный импульс, переводя среду в состояние с нулевой инверсией и формируя волну поляризации, распространяющуюся вслед за ним со скоростью света  $c$ . Встречный импульс 2 формирует решетку разности населенностей и создает стоячую волну поляризации. Импульс 3 стирает решетку, формируя медленную волну поляризации, движущуюся со скоростью  $\frac{c}{3}$  справа налево вслед за ним. Вслед за этим встречный импульс 4 в результате взаимодействия с данной волной поляризации создает решетку с удвоенной

пространственной частотой и т.д. Этот процесс можно продолжить, если посылать в среду следующие импульсы в определенный момент времени. Детальные подробности приведены в работах [81-85] ([18а, 19а, 29а, 30а, 31а, 70а, 80а]).

### **Применение униполярных импульсов в голографии**

Соискателем предложено применение униполярных импульсов в голографии [97] ([62а]). Как известно, для голографической записи информации об объекте используется интерференционная картина, создаваемая опорной волной и волной, рассеянной объектом. Необходимым в традиционной голографии является требование взаимной когерентности опорного и предметного пучков. Осуществить голографическую запись информации об объекте можно, как показано соискателем, без когерентности между ними, даже воспользовавшись излучением от разных источников. Подобная запись может быть осуществлена с применением коротких импульсов субциклового или униполярного излучения, когда в качестве записывающей среды используется резонансная среда с большим временем фазовой памяти  $T_2$ . Схема голографической записи приведена на рис. 6.

В таком случае в среде регистрируется картина интерференции отраженного от объекта субциклового или униполярного импульса с волной поляризации среды, созданной таким же коротким импульсом см. рис. 5. Когерентность обеспечивается волной поляризации, которая при взаимодействии с отраженным от объекта излучением наведет в среде решетку заселенностей. Эта решетка будет повторять картину интерференции в аналогичном голографическом процессе с монохроматическим источником с длиной волны, равной длине волны резонансного перехода в среде.



**Рис. 6.** Схема записи голограммы с использованием униполярного импульса и резонансной поглощающей среды [97] ([62a]). Униполярный импульс проходит регистрирующую среду. В среде с длиной волны резонансного перехода  $\lambda$  возникает волна (или несколько волн в случае нескольких переходов) поляризации, которая движется в направлении объекта. Отраженный от объекта импульс взаимодействует с волной поляризации и возникает решетка заселенностей. Максимумы заселенности в точности совпадают с максимумами интерференционной картины, которую создавала бы монохроматическое излучение с длиной волны  $\lambda$ . Представленная на рисунке схема соответствует записи голограмм во встречных пучках.

### Оптический эффект Ааронова-Бома и униполярные импульсы

Соискателем затронут ряд фундаментальных вопросов, которые вытекают из свойств униполярных импульсов. Униполярные импульсы обладают ненулевой электрической площадью, а, следовательно, меняют векторный потенциал в пространстве. В 1959 г. в работе Ааронова и Бома [98] теоретически были рассмотрены эксперименты, в которых можно было бы продемонстрировать физическую значимость электромагнитных потенциалов, которые в классической электродинамике играют роль математически вводимых вспомогательных величин, а физический смысл имеют напряженности электрического и магнитного полей, определяющие силы, действующие на заряды и токи.

По мнению авторов [98], в квантовой механике потенциалы играют особую, даже первичную роль. Для этого они предложили схемы экспериментов, где, в отличие от классической механики, можно обнаружить воздействие электромагнитных потенциалов на заряженную квантовую частицу, даже если в области, где она находится, все поля и, следовательно, силы, действующие на частицу, в классическом понимании исчезают.

Подобные ситуации приводят к парадоксальным выводам в случае с униполярными импульсами. На первый взгляд, пространство должно запомнить факт прохождения униполярного импульса. Интерферометр Ааронова-Бома должен определить факт существования потенциала в отсутствие поля. Эта ситуация была разобрана соискателем в работе [99] ([60a]). Показано, что за счет безвихревого характера электрической площади, сдвига фаз в интерферометре зафиксировано не будет. Поэтому бессмысленно обсуждать какие-либо варианты улучшения интерферометра. Факт существования потенциала после прохождения униполярного импульса не проявит себя в воздействии на квантовые системы. Этот вывод можно расширить - у пустого пространства отсутствует память о происходивших в нем электромагнитных явлениях.

## **Режим когерентной синхронизации мод в лазерах – теория и эксперимент**

### **Теоретическое описание режима когерентной синхронизации мод (КСМ)**

Когерентная синхронизация мод позволяет получать импульсы с длительностью короче времени релаксации  $T_2$  усиливающей и поглощающей сред в отличие от лазеров с насыщающимся поглотителем. История развития идей представлена в первой части нашего обзора [100] ([84a]). Кратко отметим здесь, что пассивная синхронизация мод в двухсекционном лазере, содержащем усиливающую и поглощающую среду, за счет нелинейных свойств поглощающей среды при эффекте самоиндуцированной прозрачности, обсуждались еще в начале лазерной эпохи. Однако, как упомянуто в обзоре, первые эксперименты были неудачными. С практической точки зрения более простым оказалось использование насыщающихся поглотителей.

Появление отдельных теоретических работ в области КСМ не вызывало энтузиазма у экспериментаторов провести эксперименты по предлагаемым схемам для реализации КСМ. В работах рассматривались труднореализуемые ситуации, когда усиливающая и поглощающая среды были перемешаны в объеме резонатора. Самостарт генерации, согласно результатам этих работ, отсутствовал [101-105].

В работах соискателя впервые был рассмотрен случай, когда поглощающая и усиливающая среда не равномерно перемешаны в объеме резонатора, а разделены в пространстве [106-111] ([6а, 10а, 11а, 69а, 89а, 99а]). Рассмотрены случаи однонаправленной генерации в режиме бегущей волны в кольцевом резонаторе и генерации двух встречных волн, что характерно для линейного резонатора. Эти задачи решались как в приближении медленных огибающих, так и без приближения медленных огибающих. Впервые теоретически было показано, что режим КСМ является самостартующим, в отличие от первых работ, в которых был сделан неутешительный вывод, что для запуска режима требуется инжекция от внешнего источника.

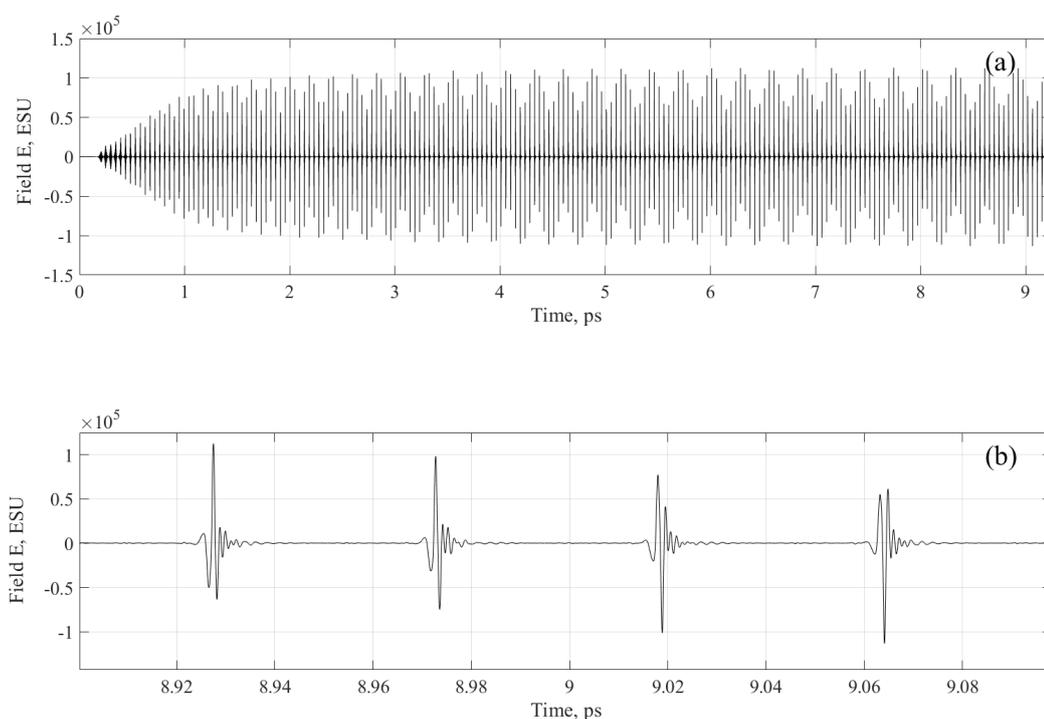
Теоретическое описание лазера в режиме КСМ – сложная задача, не поддающаяся наглядному и простому теоретическому описанию. Тем не менее для наглядного понимания процессов, идущих в таком режиме, соискателем был разработан диаграммный метод, основанный на правилах теоремы площадей Мак Кола и Хана [108] ([11а]). Он показывает, как происходит эволюция величины площади огибающей импульса в резонаторе лазера в зависимости от параметров усилителя, поглотителя и потерь в резонаторе. Метод позволяет построить предельные устойчивые циклы. Применение диаграммного метода для КСМ сделано в трех публикациях [108,109,111] ([11а, 69а, 99а]). Всего теоретических работ по КСМ, результаты которых вошли в защищаемые положения 10-11, у соискателя 6 [106-111] ([6а, 10а, 11а, 69а, 89а, 99а]).

### **Правила подобия для лазеров**

Поскольку существуют известные сложности описания режима КСМ, единственным методом анализа остается численное моделирование. На первый взгляд, оно применимо только к той области параметров, для которой оно проведено. Однако, в физике известны ситуации, когда область применимости расчетов расширяется за счет действия правил подобия. Для лазеров они сформулированы соискателем в работах [109-110] ([69а, 89а]). Основываясь на правиле для лазеров в модели медленных огибающих сделан вывод, что сокращение длительности импульса и приближение его к одноцикловому требует сокращения длины резонатора, а не увеличения мощности накачки, как это представляется на первый взгляд из связи частоты Раби с амплитудой электрического поля импульса [109] ([69а]). Если же увеличивать мощность генерации не меняя длину резонатора, то от режима, когда в резонаторе присутствует один импульс, произойдет переход к режимам с увеличивающимся числом импульсов одновременно присутствующих в резонаторе.

### **Генерация предельно коротких импульсов за счет режима КСМ в лазерах с ультракоротким резонатором**

Приближение медленных огибающих не применимо для описания взаимодействия излучения с длительностью порядка одного цикла колебаний с резонансным веществом. Анализ режимов генерации одноцикловых импульсов в лазере с ультракоротким резонатором был выполнен с использованием полной системы уравнений Максвелла-Блоха без приближения медленных огибающей в работе соискателя [110] ([89a]). Показано существование таких режимов и влияния параметров релаксации лазерных сред на режим. Результат этой работы вошел в защищаемые положения номер 6. Примеры решений показаны на рис. 7. Отметим, что генерация в таком режиме также имеет самостартующий характер.



**Рис. 7.** Результат моделирования самостартующего режима КСМ с генерацией одноцикловых импульсов в линейном резонаторе с длиной  $6.65 \mu\text{m}$ .

- (а) Напряженность поля на выходе из лазера в зависимости от времени от момента самостарта до установления стационарного режима КСМ.  
 (б) Фрагмент в стационарном режиме.

### Параметры модели

	Усиливающая среда	Поглотитель
Длина	$2.8 \mu\text{m}$	$1.75 \mu\text{m}$
Концентрация	$2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$
Дип. момент перехода	$4 D$	$8 D$
$T_1$	$1 \cdot 10^{-13} \text{ s}$	$1 \cdot 10^{-13} \text{ s}$
$T_2$	$1 \cdot 10^{-14} \text{ s}$	$1 \cdot 10^{-14} \text{ s}$

Параметры металлических зеркал линейного резонатора: толщина слоя  $0.035 \mu\text{m}$ , концентрация свободных электронов  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ , время релаксации электронов в модели Друде  $10^{13} \text{ s}^{-1}$ .

Сокращение длительности импульса генерации в режиме КСМ требует сокращения длины резонатора [110] ([89а]).

## Эксперименты по демонстрации режима КСМ

Получив теоретические результаты, которые показывали возможность самостартующего КСМ в лазере с разнесенными поглотителем и усилителем, промоделировав эти режимы, соискатель перешел к практической демонстрации данного режима в лазерах различных типов. Первая задача была продемонстрировать действие когерентного поглотителя, как нелинейного модулятора потерь, приводящего к режиму синхронизации мод в лазерах.

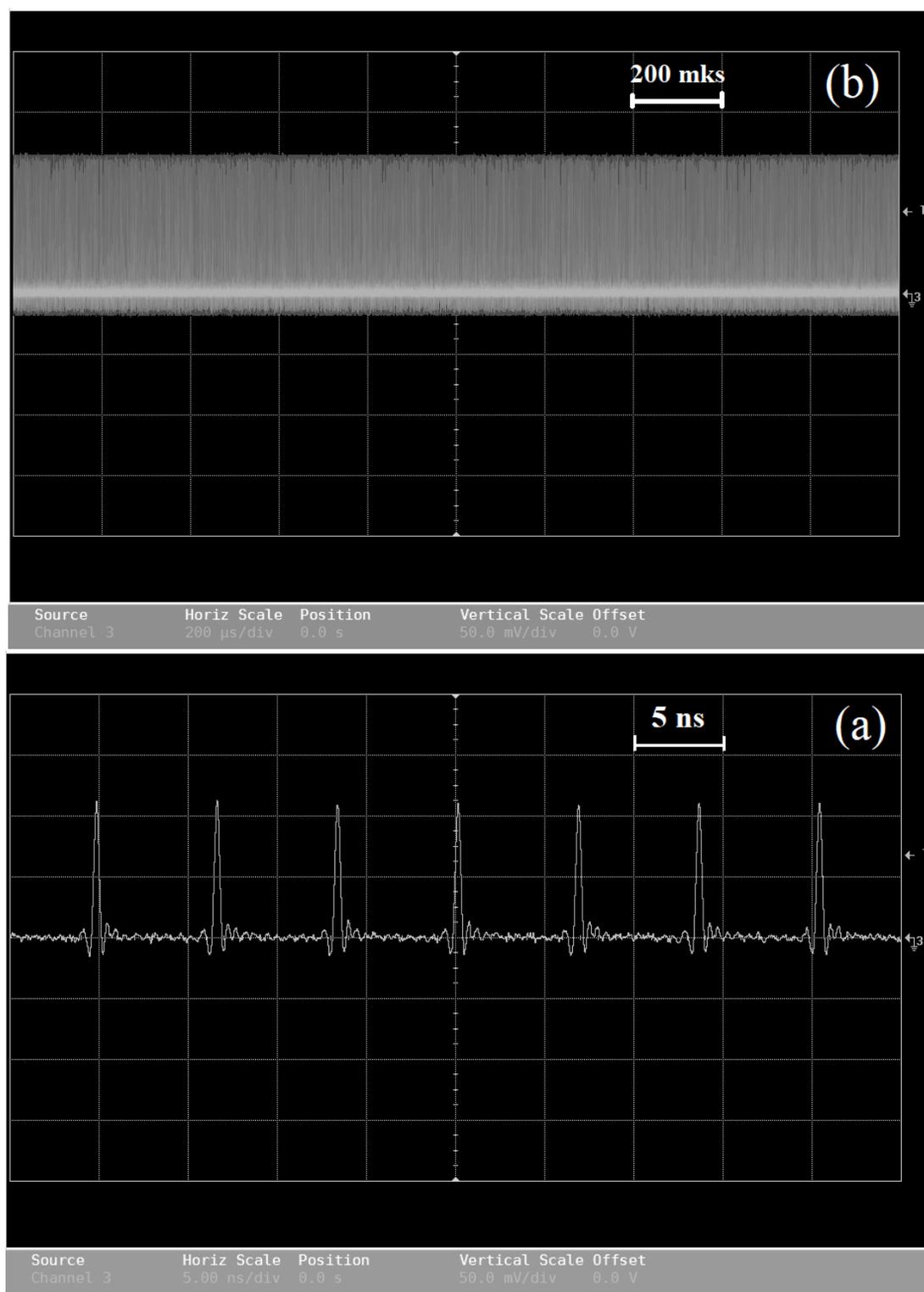
Первые эксперименты были в непрерывном струйном лазере на красителе. Активная среда была Родамин 6G [112,113] ([7a, 40a]). В качестве когерентного поглотителя были использованы пары молекулярного йода. Они обладали переходами, лежащими в области генерации красителя, и большим временем фазовой релаксации  $T_2$  в несколько сотен нс. Ширина линии усиления красителя на порядки превосходила ширины переходов в молекулярном йоде. Лазер на красителе с ячейкой, содержащий пары йода, не демонстрировал режимы синхронизации мод если спектр его генерации не совпадал с линиями поглощения, захвата частоты линиями поглощения не происходило. Поэтому в резонаторе были размещены спектрально селективные элементы, которые позволяли настраивать генерацию на линии поглощения.

В этих экспериментах при настройке на линии поглощения нам отчетливо удалось продемонстрировать синхронизацию мод под действием когерентного поглотителя. Однако, вопреки ожидаемому возникновению  $2\pi$  импульсов самоиндуцированной прозрачности, можно было утверждать лишь наличие  $0\pi$  импульсов. Экспериментальный результат был неутешителен для соискателя. Понимая, что все модели режима КСМ не учитывают особенности реальных экспериментов, многочисленных параметров реальных параметров усилителя и поглотителя, получение режима самоиндуцированной прозрачности с генерацией  $2\pi$  импульсов действительно неосуществимо на практике из-за многочисленных трудностей, на которые указывали скептики и оппоненты.

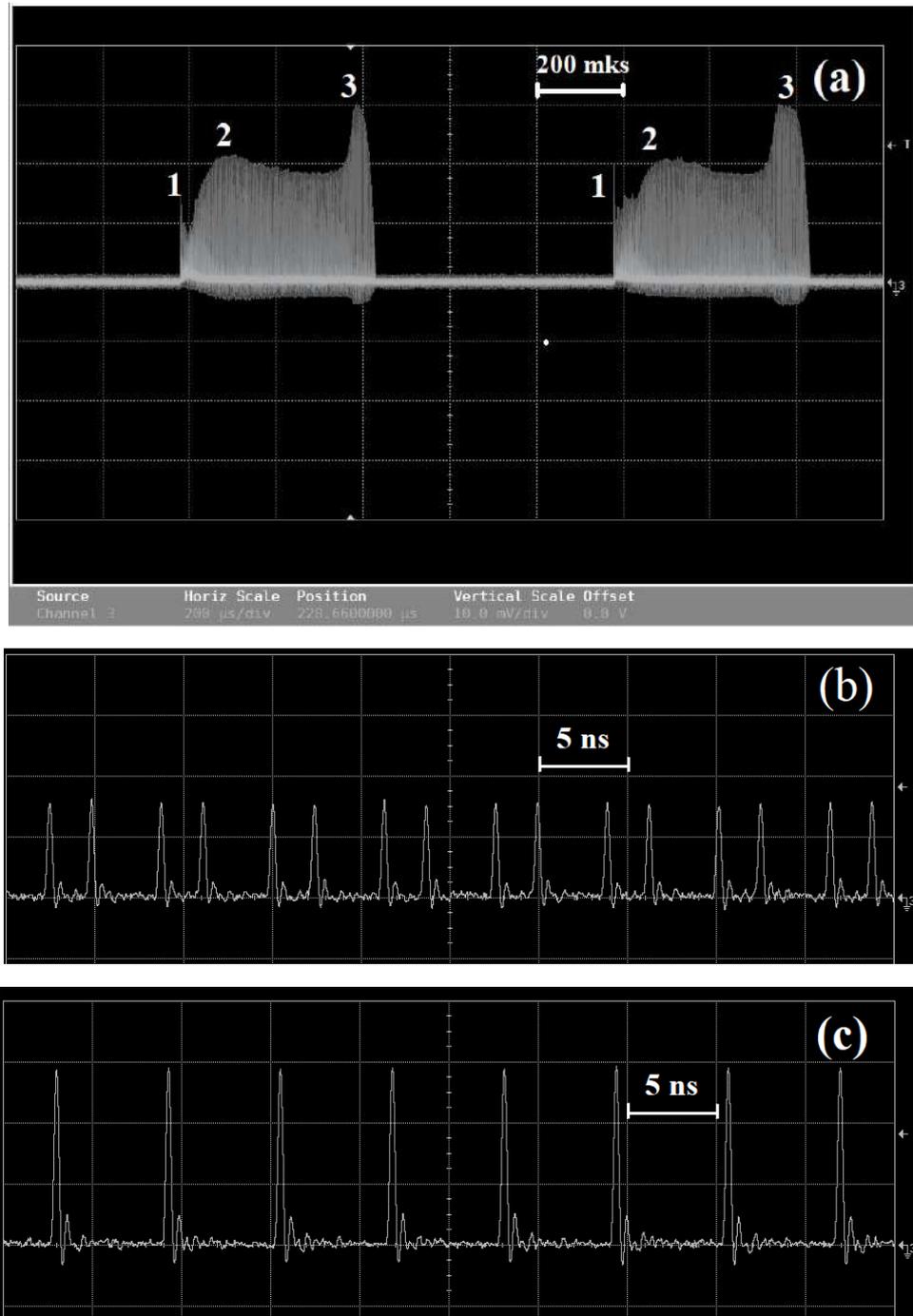
В работе [114], где в титан-сапфировом лазере с насыщающимся поглотителем, который обеспечивал режим синхронизации мод с длительностью импульса 1 ps, была размещена ячейка с парами рубидия, проведена демонстрация внутррезонаторного когерентного пленения населенности в рубидии, но режим КСМ получен не был. А при настройке на линии поглощения наблюдалось увеличение длительности импульса синхронизации мод, уменьшение периода следования импульса, которое авторы

интерпретировали, как трансформацию импульса синхронизации мод в импульс самоиндуцированной прозрачности в рубидии. Возникновение самосинхронизации мод в отсутствие насыщающегося поглотителя при наличии паров рубидия в резонаторе авторы не обнаружили. Соискатель с коллегами на оборудовании Лазерного центра СПбГУ провел эксперименты с титан-сапфировым лазером, в резонаторе которого отсутствовали какие-либо модуляторы, кроме ячеек с парами рубидия или цезия [115-120] ([47а, 49а, 51а, 52а, 55а, 114а]). Резонансные переходы этих атомов попадают в полосу генерации титан-сапфирового лазера.

Как и в случае с лазером на красителе, автоматического захвата частоты генерации парами цезия и рубидия не происходило, в резонаторе надо было разместить селективные элементы и настраивать частоту генерации на линии поглощения рубидия или цезия. Во всех случаях на каждой из двух компонент резонансного дублета цезия или рубидия был зафиксирован самостартующий режим когерентной синхронизации мод с генерацией  $2\pi$  импульсов самоиндуцированной прозрачности. Подробное описание принципиальных основных результатов экспериментов дано в публикации [116] ([55а]). Это самостарт генерации, сокращение длительности импульса с ростом мощности генерации, постоянство площади импульса при изменении мощности. Результаты этих экспериментов приведены на рис. 8 и 9. Рис.8 показывает пример полученных осциллограмм генерации. Самостартующий характер режима КСМ показан на рис.9.



**Рис. 8.** Пример экспериментально полученной осциллограммы режима когерентной синхронизации мод в титан-сапфировом лазере на переходе DII линии рубидия. Длина линейного резонатора 96 см. (a) – фрагмент осциллограммы, масштаб 5 нс/дел, (b) – осциллограмма, демонстрирующая устойчивость данного режима генерации, масштаб 200 мкс/дел. Мощность генерации 50 мвт.



**Рис. 9.** Пример осциллограмм генерации, показывающей самостартующий характер режима когерентной синхронизации мод в титан-сапфировом лазере на поглощающем переходе DII рубидия. Механический прерыватель – вращающийся диск с отверстиями, периодически с частотой 1000 герц перекрывал излучение накачки. В моменты, когда прерыватель открывал пучок, в титан-сапфировом лазере развивалась генерация, рис 9а. На этой осциллограмме в начале генерации, обозначенной 1, отчетливо наблюдались пички, которые характерны для твердотельных лазеров в переходном процессе в начале генерации. Далее развивался режим когерентной синхронизации мод. Сначала в резонаторе одновременно присутствовало два импульса, область отмечена 2, затем оставался только один импульс, область отмечена 3. Эти осциллограммы даны на рис. 9б и рис. 9с.

## **Особенности режима КСМ в титан-сапфировом лазере**

В эксперименте всегда выявляются детали, которые не предсказываются теорией. Были обнаружены режимы автомодуляции релаксационных колебаний в титан-сапфировом лазере в режиме КСМ. Также был обнаружен режим синхронизации мод при самомодуляции добротности (Q-switch mode-locking). Когерентный поглотитель одновременно с синхронизацией мод действовал, как модулятор добротности резонатора. Причиной тому были три обстоятельства. Первое. В титан-сапфировом лазере за счет керровской нелинейности возможна синхронизация мод. Однако, этот режим не самостартующий и требует инициализации. Второе. Титан-сапфировый лазер — это твердотельный лазер с медленным временем релаксации, склонный к релаксационным колебаниям в переходных процессах и допускающий реализацию режима модулированной добротности. Третье. Процесс развития КСМ, как показали наши эксперименты, не развивается мгновенно, а занимает некоторое время. Поэтому синхронизация мод за счет когерентного поглотителя сопровождается нарастанием керровской нелинейности, которая не может перейти в режим керровской синхронизации мод из-за наличия в резонаторе когерентного поглотителя, не допускающего радикального сокращения длительности импульса. При этом она ведет к увеличению добротности резонатора, что дает более быстрое опустошение верхнего лазерного уровня. Для твердотельного лазера это является механизмом модуляции излучения на частоте релаксационных колебаний. Что и наблюдалось в эксперименте. Когда глубина модуляции релаксационных колебаний становилась крайне большой, режим КСМ срывался, и переходил в режим модулированной добротности. Здесь мы дали общее описание картины возникающих явлений. Как показали наши эксперименты, динамика лазера с реальным нелинейным поглотителем крайне сложна, что демонстрируют результаты следующего раздела.

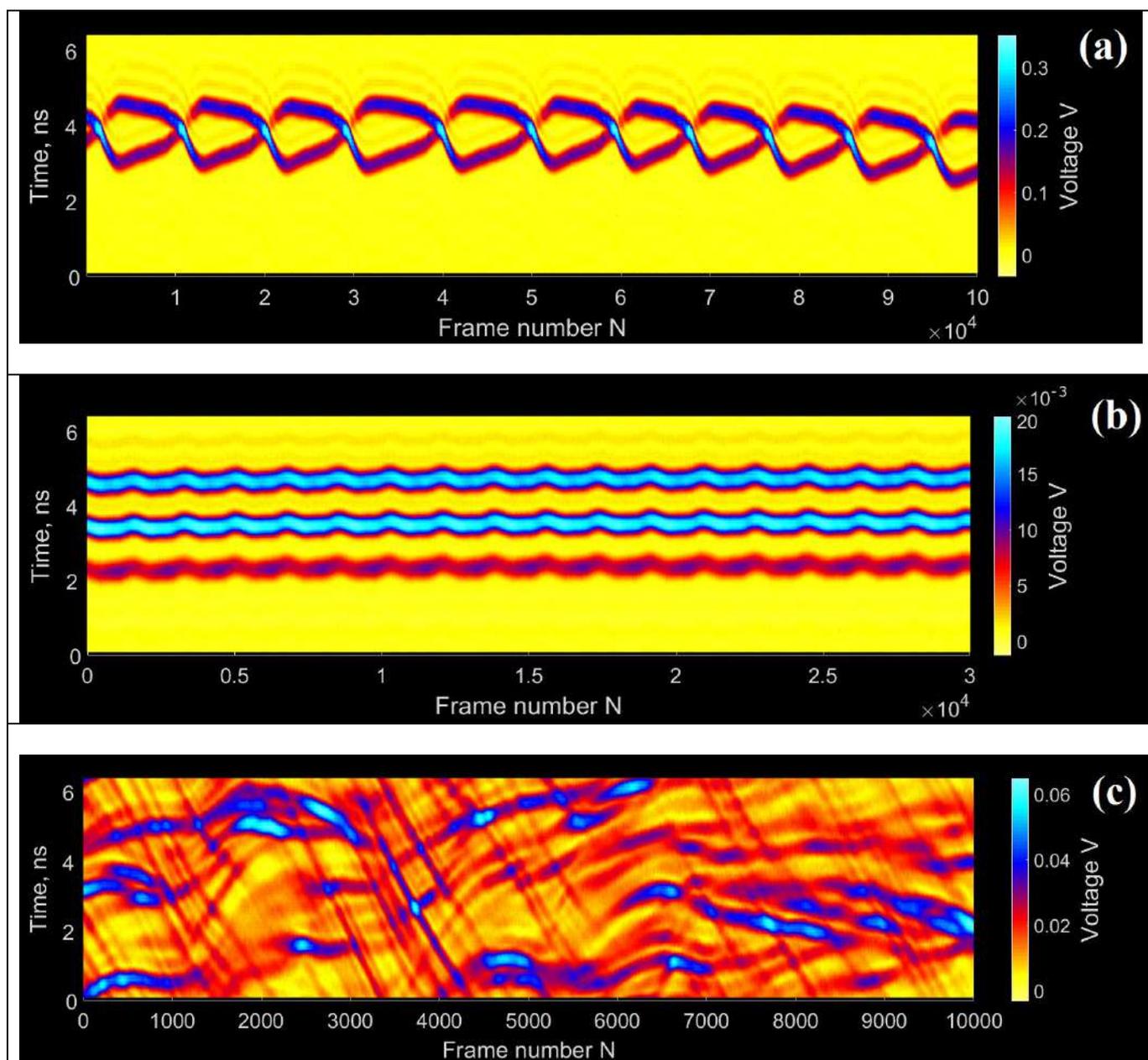
## **Экстремальные события в системе диссипативных солитонов самоиндуцированной прозрачности. Эксперимент и теория.**

Выше были приведены результаты экспериментов, демонстрировавшие регулярные режимы синхронизации мод. Наряду с ними проводились эксперименты, связанные с возникновением нерегулярных режимов. В резонаторе лазера могло находиться более одного импульса синхронизации мод. Их амплитуды и число могло меняться. Анализировать такую систему оказалось возможным, по мнению соискателя, с точки зрения концепции диссипативных солитонов, выдвинутой Н.Н. Розановым [121]. В данной

ситуации речь идет о диссипативных солитонах самоиндуцированной прозрачности. Соискатель впервые экспериментально продемонстрировал существование солитонных молекул, солитонного газа, и что крайне интересно, существование экстремальных событий в системе диссипативных солитонов самоиндуцированной прозрачности (СИП) [84а]. Интересно отметить, что экстремальные события и солитонные молекулы наблюдались экспериментально ранее в оптических волокнах и волоконных лазерах [122-125]. Примеры солитонных молекул и экстремальных событий даны на рис. 10 и 11 соответственно.

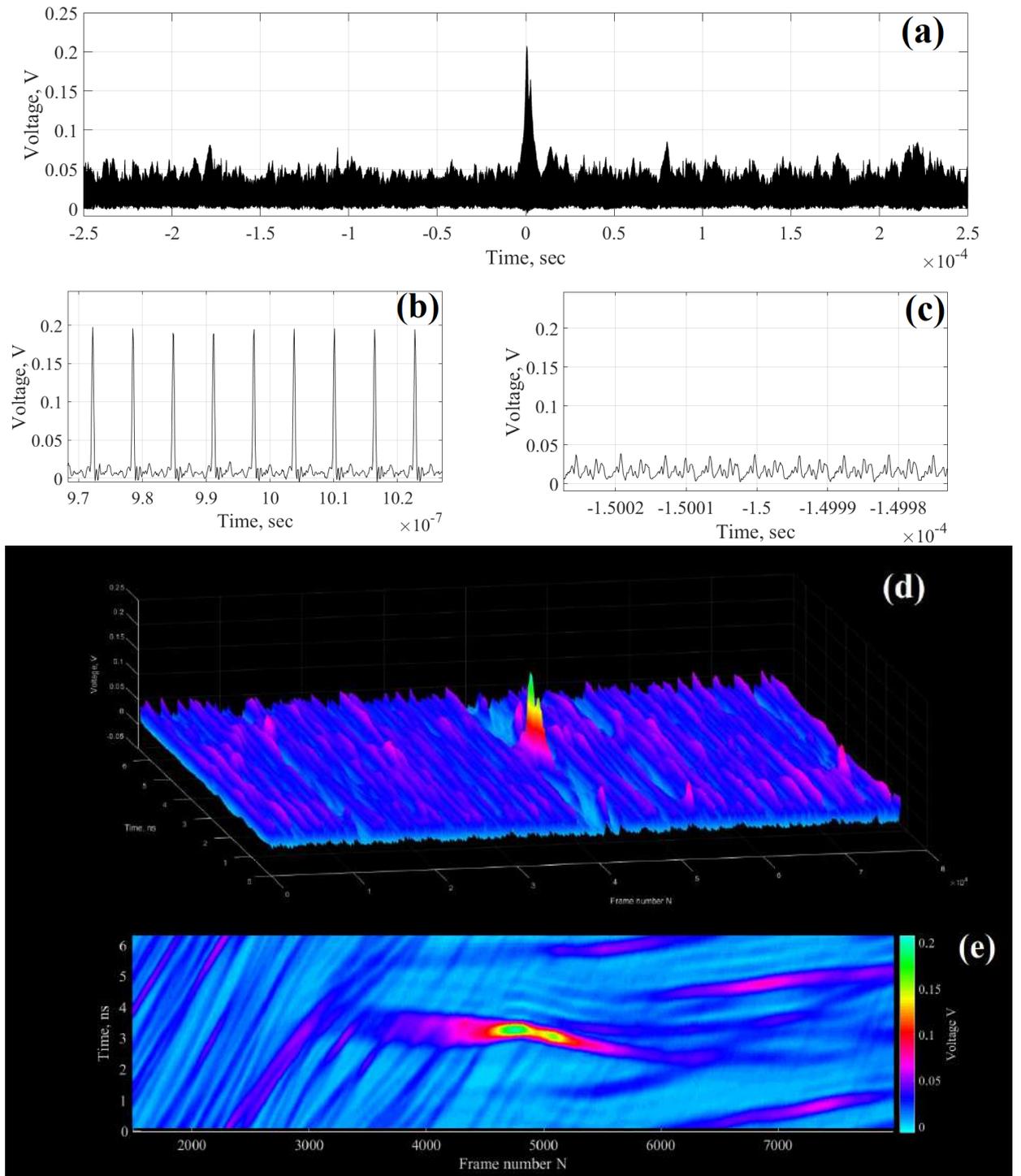
В генерации титан-сапфирового лазера с когерентным поглотителем (пары Rb, Cs) существуют режимы, в зависимости от мощности накачки, положения поглотителя, настройки резонатора, когда в резонаторе одновременно может присутствовать два и более импульса. Импульсы могут быть различной амплитуды. Возможны две существенно отличающиеся ситуации. Первая, когда число импульсов не меняется во времени. Амплитуда импульсов и интервал времени между ними может изменяться регулярным образом. В этом случае наблюдаются так называемые солитонные молекулы и их внутренние колебания (рис.10(a) и (b)) Вторая – число импульсов велико и непостоянно, интервал между ними и их амплитуды меняются. Это случай так называемого газа диссипативных солитонов (рис. 10с). Соответствующие примеры покадровой картины генерации даны ниже на рис.10.

Было также показано, что в солитонном газе (солитонному газу соответствует ситуация, когда в резонаторе присутствует несколько импульсов СИП, движущихся с разными скоростями, сталкивающихся, сливающихся друг с другом в один солитон и распадающихся) крайне редко солитоны постепенно начинают сливаться друг с другом так, что остается только 1 солитон большой амплитуды и малой длительности. Он существует короткий интервал времен, а затем быстро распадается. Вновь образуется солитонный газ. В таком процессе картина поведения солитонов отчасти похожа на процесс возникновения экстремальных событий - волн-убийц на водной поверхности. Первоначально движется много волн с малой амплитудой, затем практически внезапно эта рябь пропадает и возникает одна волна-убийца с очень большой амплитудой. Ход возникновения экстремальных событий и интервал между ними, наблюдавшийся в экспериментах показаны на рис. 11.



**Рис.10.** Молекулы из двух и трех диссипативных солитонов СИП, газ диссипативных солитонов СИП.

- (a) – Двухсолитонная молекула, в которой солитоны притягиваются и отталкиваются.
- (b) - Трехсолитонная молекула, состоящая из трех солитонов разной амплитуды. Образование периодически смещается как целое.
- (c) - Солитонный газ, в котором присутствует в среднем десять солитонов.



**Рис. 11.** Экстремальное событие в генерации титан-сапфировом лазера при настройке длины волны генерации на линию поглощения ДП Cs. Мощность генерации 140 мвт. (a) - осциллограмма, содержащая экстремальное событие в центре осциллограммы. (b) - фрагмент осциллограммы (a) в области экстремального события. (c) - фрагмент осциллограммы (a) вне экстремального события. (d) - покадровая картина осциллограммы (a). (e) - процесс в окрестности экстремального события - покадровая картина трансформации газа диссипативных солитонов СИП в один солитон и его распад.

Отметим, что соискателем предложен простой и эффективный метод исследования диссипативных солитонов СИП – радиоспектроскопия диссипативных солитонов. Для этого наряду с наблюдением осциллограмм генерации, сигнал со скоростного фотодетектора поступает на анализатор радиоспектра (RSP-процессор), где в непрерывном режиме регистрируются спектры вблизи основной частоты обхода резонатора и его гармоник. Поскольку скорость диссипативных солитонов СИП сильно зависит от интенсивности импульса, то радиоспектр позволяет фиксировать наличие солитонов с разной амплитудой, фиксировать солитонные молекулы, наблюдать колебания в солитонных молекулах, фиксировать экстремальные события.

Ситуация в реальных экспериментах с парами рубидия и цезия достаточно сложная. Действительно, тонкая структура уровней влияет на режим генерации. Многообразие экспериментально наблюдавшихся режимов крайне велико. Оно не связано с какими-либо техническими факторами. А является следствием динамики сложной системы, где надо учитывать пространственные факторы, конкретную схему уровней когерентного перехода. Тем не менее, можно выделить существенные обстоятельства и дать физически правильную картину такому интересному эффекту, как экстремальные события. При наблюдении экстремальных событий и одновременной фиксации средней интенсивности генерации было 2 ситуации. В первой – в окрестности экстремальных событий интенсивность генерации не менялась, несмотря на изменение количества солитонов. Во втором случае в окрестности экстремальных событий наблюдались пульсации средней интенсивности. Корректно, учитывая нечувствительность интенсивности к числу солитонов, можно считать, что в таком случае, если мы знаем характерный интервал времени, на котором происходит слияние двух солитонов в один, можно не вдаваясь в динамику оценить статистическим методом вероятность слияния всех солитонов в один. Сделанные в таком подходе оценки совпадают с интервалом времени появления экстремальных событий в эксперименте.

### **Главные итоги работы и перспективы**

Подведем итог. Соискатель начал работы в направлениях, связанных с тематикой диссертации, с 2011 года. Основные темы исследований диссертации — это пути получения и свойства униполярного и субциклового, квазиуниполярного излучения, режим КСМ в лазере как путь к снятию ограничений на длительность импульсов генерации. На начальном этапе тематика работы вызывала серьезные возражения (хотя к тому моменту имелись немногочисленные работы в этих направлениях, которые упомянуты в наших обзорах),

вплоть до ее ненаучности, ошибочности и практической нереализуемости, при обсуждении связанных с тематикой идей. В процессе выполнения исследований и знакомства с ними научной общественности отношение к тематике менялось. Соискателю удалось продемонстрировать теоретическими и экспериментальными работами реалистичность и перспективность тематики униполярных импульсов. То же относится и к режиму когерентной синхронизации мод в лазерах. Работы были поддержаны грантами РФФИ, РНФ, удостоены наград и премий. К моменту написания диссертационного доклада отчётливо видна тенденция возрастания количества работ, посвященных субцикловому и униполярному свету, способам его получения и применению.

Соискатель позволит себе дать оценку перспективам данного направления. Интерес к направлению, будет, безусловно, связан со стремлением исследователей получать все более короткие импульсы не только за счет сокращения их длительности при одновременном увеличении частоты, а также за счет оставления в импульсе все меньшего числа циклов колебаний вплоть до одной половины цикла. Путь же сокращения длительности при увеличении частоты лишь переводит область применения и исследования таких импульсов в область больших энергий (изучение внутренних электронных оболочек атомов, ядерных процессов) при помощи многоцикловых импульсов, что не меняет нелинейного резонансного механизма в сопровождающих применение такого излучения физических процессов, которые лишь в случае униполярных и субцикловых импульсов будет иным в любом диапазоне частот и длительностей.

Оставаясь в области ТГц, ИК и видимого диапазона, при получении малоцикловых, субцикловых и униполярных импульсов исследователи будут стремиться к упрощению экспериментальной техники, поиску путей создания компактных и достаточно дешевых источников такого излучения.

Помимо применения такого излучения в исследовательских целях, основные усилия, по-видимому, будут связаны с перспективами применения еще более коротких импульсов в оптоэлектронных системах передачи и обработки информации. Движение начнется с освоения ТГц диапазона. Как показали исследования соискателя, здесь существует возможность управления формой импульсов, получения импульсов негармонической формы. Скорее всего, будут созданы компактные источники одноциклового лазерного излучения, действующие в режиме когерентной синхронизации мод на основе квантово-каскадных лазеров. Эти импульсы будут основой для формирования униполярных и квазиуниполярных импульсов негармонической формы. И от них с ТГц диапазона начнется движение в сторону униполярных импульсов ИК и оптического диапазона. Здесь будут

использованы идеи трансформации такого излучения в искусственных квантовых системах, подобно тому, как это продемонстрировано соискателем на примере вложенных квантовых ям. Наконец, широкое использование униполярных и квазиуниполярных субцикловых импульсов потребует решить проблему реализации стимулированного испускания для униполярных импульсов.

Последующие десять лет покажут справедливость сделанного прогноза.

Автор выражает благодарность своим коллегам Н.Н. Розанову, М.В. Архипову, А.В. Пахомову, А.А. Шимко за многолетнюю поддержку и сотрудничество.

**Список литературы**

1. Ахманов С. А., Никитин С. Ю. Физическая оптика. МГУ. – 2004. Akhmanov S. A., Nikitin S. Y. Physical optics. – Oxford University Press. – 1997.
2. Джексон Д. Классическая электродинамика. М.: Мир. – 1962. Jackson J. D. Classical electrodynamics. – John Wiley & Sons. – 2021.
3. Гинзбург В. Л., Сыроватский С. И. Космическое магнитотормозное (синхротронное) излучение // Успехи физических наук. – 1965. – Т. 87. – №. 9. – С. 65-111. Ginzburg V. L., Syrovatskiĭ S. I. Cosmic magnetic bremsstrahlung (synchrotron radiation) // Soviet Physics Uspekhi. – 1966. – Vol. 8. – №. 5. – P. 674.
4. Гинзбург В. Л., Сазонов В. Н., Сыроватский С. И. О магнитотормозном (синхротронном) излучении и его реабсорбции // Успехи физических наук. – 1968. – Т. 94. – №. 1. – С. 63-90. Ginzburg V. L., Sazonov V. N., Syrovatskiĭ S. I. Synchrotron radiation and its reabsorption // Soviet Physics Uspekhi. – 1968. – Vol. 11. – №. 1. – P. 34.
5. Гинзбург В. Л. Теоретическая физика и астрофизика. Дополнительные главы (2-е издание). – Рипол Классик, 1987. Ginzburg V. L. Theoretical physics and astrophysics. – Elsevier, 2013.
6. Krausz F., Ivanov M. Attosecond physics // Reviews of modern physics. – 2009. – Vol. 81. – №. 1. – P. 163.
7. Mourou G. Nobel Lecture: Extreme light physics and application // Reviews of Modern Physics. – 2019. – Vol. 91. – №. 3. – P. 030501.
8. Midorikawa K. Progress on table-top isolated attosecond light sources // Nature Photonics. – 2022. – Vol. 16. – №. 4. – P. 267-278.
9. Хазанов Е. А. Компрессия фемтосекундных лазерных импульсов с помощью фазовой самомодуляции: за 40 лет от киловатт до петаватт // Квантовая электроника. – 2022. – Vol. 52. – №. 3. – P. 208-226. Khazanov E. A. Post-compression of femtosecond laser pulses using self-phase modulation: from kilowatts to petawatts in 40 years // Quantum Electronics. – 2022. – Vol. 52. – №. 3. – P. 208.
10. Wei Z., Hebling J., Varjú K. Attosecond science and technology: introduction // JOSA B. – 2018. – Vol. 35. – №. 5. – P. AST1-AST1.
11. Gaumnitz T., Jain A., Pertot Y., Huppert M., Jordan I., Ardana-Lamas F., Wörner H. J. Streaking of 43-attosecond soft-X-ray pulses generated by a passively CEP-stable mid-infrared driver // Optics express. – 2017. – Vol. 25. – №. 22. – P. 27506-27518.

12. Brahms C., Belli F., Travers J. C. Infrared attosecond field transients and UV to IR few-femtosecond pulses generated by high-energy soliton self-compression // *Physical Review Research*. – 2020. – Vol. 2. – №. 4. – P. 043037.
13. Hassan M.T., Luu T.T., Moulet A., Raskazovskaya O., Zhokhov P., Garg M., Karpowicz N., Zheltikov A.M., Pervak V., Krausz F., Goulielmakis E. // *Nature*. – 2016. – Vol. 530. – P. 66.
14. Wu H. C., Meyer-ter-Vehn J. Giant half-cycle attosecond pulses // *Nature Photonics*. – 2012. – Vol. 6. – №. 5. – P. 304-307.
15. Xu J., Shen B., Zhang X., Shi Y., Ji L., Zhang L., Xu T. Terawatt-scale optical half-cycle attosecond pulses // *Scientific Reports*. – 2018. – Vol. 8. – №. 1. – P. 2669.
16. Reimann K. Table-top sources of ultrashort THz pulses // *Reports on Progress in Physics*. – 2007. – Vol. 70. – №. 10. – P. 1597.
17. Gao Y., Drake T., Chen Z., DeCamp M. F. Half-cycle-pulse terahertz emission from an ultrafast laser plasma in a solid target // *Optics letters*. – 2008. – Vol. 33. – №. 23. – P. 2776-2778.
18. Fülöp J. A., Tzortzakis S., Kampfrath T. Laser-driven strong-field terahertz sources // *Advanced Optical Materials*. – 2020. – Vol. 8. – №. 3. – P. 1900681.
19. Bullough R. K., Ahmad F. Exact solutions of the self-induced transparency equations // *Physical Review Letters*. – 1971. – Vol. 27. – №. 6. – P. 330.
20. Бессонов Е. Г. Об одном классе электромагнитных волн // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 1981. – Т. 80. – №. 3. – С. 852. Bessonov E. G. On a class of electromagnetic waves // *Sov. Phys. JETP*. – 1981. – Vol. 53. – №. 3. – P. 433.
21. Бессонов Е. Г. Условно-странные электромагнитные волны // *Квантовая электроника*. – 1992. – Vol. 19. – №. 1. – P. 35-39. Bessonov E. G. Conditionally strange electromagnetic waves // *Soviet journal of quantum electronics*. – 1992. – V. 22. – №. 1. – P. 27.
22. Розанов Н. Н. О площади предельно коротких световых импульсов // *Оптика и спектроскопия*. – 2009. – Т. 107. – №. 5. – С. 761-765. Rosanov N. N. Area of ultimately short light pulses // *Optics and Spectroscopy*. – 2009. – Vol. 107. – P. 721-725.
23. Kozlov V. V., Rosanov N. N., De Angelis C., Wabnitz S. Generation of unipolar pulses from nonunipolar optical pulses in a nonlinear medium // *Physical Review A*. – 2011. – Vol. 84. – №. 2. – P. 023818.

24. Пархоменко А.Ю., Сазонов С.В. Самоиндуцированная прозрачность многоуровневой квантовой среды при распространении предельно коротких импульсов // ЖЭТФ. – 1998. – Т. 114. – № 5. – С. 1595-1617. Parkhomenko A. Y., Sazonov S. V. Self-induced transparency for ultrashort pulses propagating in a multilevel quantum medium // Journal of Experimental and Theoretical Physics. – 1998. – Vol. 87. – №. 5. – P.864-874.
25. Беленов Э. М., Назаркин А. В. О некоторых решениях уравнений нелинейной оптики без приближения медленно меняющихся амплитуд и фаз // Письма в ЖЭТФ. – 1990. – Т. 51. – №. 5. – С. 252-255. Belenov E. M., Nazarkin A. V. Solutions of nonlinear-optics equations found outside the approximation of slowly varying amplitudes and phases // JETP Lett. – 1990. – V. 51. – P. 252.
26. Маймистов А. И. Некоторые модели распространения предельно коротких электромагнитных импульсов в нелинейной среде // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30. – №. 4. – С. 287-304. Maimistov A. I. Some models of propagation of extremely short electromagnetic pulses in a nonlinear medium // Quantum electronics. – 2000. – V. 30. – №. 4. – P. 287.
27. Маймистов А. И. Солитоны в нелинейной оптике // Квантовая электроника. – 2010. – Т. 40. – №. 9. – С. 756-781. Maimistov A. I. Solitons in nonlinear optics // Quantum electronics. – 2010. – Vol. 40. – №. 9. – P. 756.
28. Сазонов С. В. Униполярные солитоноподобные структуры в неравновесных средах с диссипацией // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 114. – №. 3. – С. 160-166. Sazonov S. V. Unipolar soliton-like structures in nonequilibrium dissipative media // JETP Letters. – 2021. – Vol. 114. – P. 132-137.
29. Сазонов С.В. К нелинейной оптике предельно коротких импульсов // Оптика и спектроскопия. – 2022. - Т. 130. – № .2. – С. 1846-1855. Sazonov S.V. On the nonlinear optics of extremely short pulses // Optics and spectroscopy. – V.130. – №12. – P.1573-1581.
30. Kim K. J. et al. Comment on “Coherent acceleration by subcycle laser pulses” // Physical Review Letters. – 2000. – Vol. 84. – №. 14. – P. 3210.
31. Kim K. J., McDonald K. T., Stupakov G. V., Zolotarev M. S. A bounded source cannot emit a unipolar electromagnetic wave // arXiv preprint physics/0003064. – 2000.
32. Розанов Н. Н. Формирование трехмерных униполярных импульсов при движении зарядов в вакууме // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128. – №. 1. – С. 95-97. Rosanov N. N. The Formation of Three-Dimensional Unipolar Pulses upon

- Motion of Charges in a Vacuum // Optics and Spectroscopy. – 2020. – Vol. 128. – P. 92-93.
33. Розанов Н. Н. Электрическая площадь импульса при разделении и слиянии зарядов в вакууме // Оптика и спектроскопия. – 2020. – Т. 128. – №. 4. – С. 502-504. Rosanov N. N. The Electric Area of a Pulse upon Separation and Merging of Charges in Vacuum // Optics and Spectroscopy. – 2020. – Vol. 128. – P. 490-492.
34. Розанов Н. Н. Электрическая площадь поля в вакууме с движущимися зарядами // Письма в Журнал технической физики. – 2020. – Т. 46. – №. 4. – С. 15-17. Rosanov N. N. The electric field area in a vacuum with moving charges // Technical Physics Letters. – 2020. – Vol. 46. – P. 165-167.
35. Розанов Н. Н. Униполярный импульс электромагнитного поля при равномерном движении заряда в вакууме // Успехи физических наук. – 2023. – Т. 193. – №. 4. – 1127-1133. Rosanov N. N. Unipolar pulse of electromagnetic field with a uniform motion of a charge in a vacuum // Physics-Uspekhi. – 2023. – Vol. 66. – №. 4. – P. 1059–1064.
36. Плаченов А.Б., Розанов Н.Н. Импульсы электромагнитного поля с ненулевой электрической площадью // Изв. вузов. Радиофизика. – 2022. – Т. 65. – № 12. – С. 1003–1014. Plachenov A. B., Rosanov N. N. Pulses of the electromagnetic field with a non-zero electric area // Radiophysics and Quantum Electronics. – 2023. – V. 65. – №. 12. – P. 911-921.
37. Архипов Р. М., Пахомов А. В., Архипов М. В., Бабушкин И. В., Толмачев Ю. А., Розанов Н. Н. Генерация униполярных импульсов в нелинейных средах // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2017. – Т. 105. – №. 6. – С. 388-400. Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Babushkin I., Tolmachev Yu. A., Rosanov N. N. Generation of unipolar pulses in nonlinear media // JETP Letters. – 2017. – Vol. 105. – P. 408-418.
38. Архипов Р. М., Архипов М. В., Розанов Н. Н. Униполярный свет: существование, получение, распространение, воздействие на микрообъекты // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – №. 9. – С. 801-815. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Rosanov N. N. Unipolar light: existence, generation, propagation, and impact on microobjects // Quantum Electronics. – 2020. – Vol. 50. – №. 9. – P. 801.
39. Arkhipov R., Arkhipov M., Pakhomov A., Babushkin I., Rosanov N. Half-cycle and unipolar pulses (Topical Review) // Laser Physics Letters. – 2022. – Vol. 19. – №. 4. – P. 043001.

40. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов А. В., Образцов П. А., Розанов Н. Н. Униполярные и субцикловые предельно короткие импульсы: последние результаты и перспективы (Миниобзор) // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2023. – Т. 117. – №. 1. – С. 10-28. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Obratsov P. A., Rosanov N. N. Unipolar and Subcycle Extremely Short Pulses: Recent Results and Prospects (Brief Review) // JETP Letters. – 2023. – Vol. 117. – №. 1. – P. 8-23.
41. Naumenko G., Shevelev M. First indication of the coherent unipolar diffraction radiation generated by relativistic electrons // Journal of Instrumentation. – 2018. – Vol. 13. – №. 05. – P. C05001.
42. Науменко Г., Шевелев М., Попов К. Е. Униполярное черенковское и дифракционное излучение релятивистских электронов // Письма в журнал Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2020. – Т. 17. – №. 6. – С. 781-790. Naumenko G., Shevelev M., Popov K. E. Unipolar Cherenkov and Diffraction Radiation of Relativistic Electrons // Physics of Particles and Nuclei Letters. – 2020. – Vol. 17. – P. 834-839.
43. Архипов М. В., Цыпкин А. Н., Жукова М. О., Исмагилов А. О., Пахомов А. В., Розанов Н. Н., Архипов Р. М. Экспериментальное определение униполярности импульсного терагерцового излучения // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 115. – №. 1. – С. 3-9. Arkhipov M. V., Tsypkin A. N., Zhukova M. O., Ismagilov A. O., Pakhomov A. V., Rosanov N. N., Arkhipov R. M. Experimental Determination of the Unipolarity of Pulsed Terahertz Radiation // JETP Letters. – 2022. – Vol. 115. – №. 1. – P. 1-6.
44. Розанов Н. Н., Архипов Р. М., Архипов М. В. О законах сохранения в электродинамике сплошных сред (к 100-летию Государственного оптического института им. СИ Вавилова) // Успехи физических наук. – 2018. – Т. 188. – №. 12. – С. 1347-1353. Rosanov N. N., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V. On laws of conservation in the electrodynamics of continuous media (on the occasion of the 100th anniversary of the SI Vavilov State Optical Institute) // Physics-Uspekhi. – 2018. – Vol. 61. – №. 12. – P. 1227.
45. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И. В., Пахомов А. В., Розанов Н. Н. Распространение импульса света с длительностью менее одного периода в усиливающей резонансной среде // Квантовая электроника. – 2018. – Т. 48. – №. 6. – С. 532-536. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Propagation of a light pulse with a duration of less than one period in a

- resonant amplifying medium // *Quantum Electronics*. – 2018. – Vol. 48. – №. 6. – P. 532.
46. Arkhipov R., Arkhipov M., Babushkin I., Pakhomov A., Rosanov N. Coherent propagation of a half-cycle unipolar attosecond pulse in a resonant two-level medium // *JOSA B*. – 2021. – Vol. 38. – №. 6. – P. 2004-2011.
  47. Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Babushkin I. V., Demircan A., Morgner U., Rosanov, N. N. Generation of unipolar half-cycle pulses via unusual reflection of a single-cycle pulse from an optically thin metallic or dielectric layer // *Optics Letters*. – 2017. – Vol. 42. – №. 11. – P. 2189-2192.
  48. Фещенко Р.М. Об интеграле по времени от электромагнитного поля // *ЖЭТФ*. – 2023. – Т.163. – № 6. – С. 461-466. Feshchenko R.M. On the Time Integral of Electromagnetic Field. // *J. Exp. Theor. Phys.* 2023.–Vol. 136. – №4 . – P.406–410.
  49. Архипов Р. М. Особенности излучения комбинационно-активной среды, возбуждаемой со сверхсветовой скоростью // *Оптика и спектроскопия*. – 2016. – Т. 120. – №. 5. – С. 802-806. Arkhipov R. M. Particular features of the emission of radiation by a superluminally excited Raman-active medium // *Optics and Spectroscopy*. – 2016. – Vol. 120. – №. 5. – P. 756-759.
  50. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Belov P. A., Tolmachev Y. A., Babushkin, I. Generation of unipolar optical pulses in a Raman-active medium // *Laser Physics Letters*. – 2016. – Vol. 13. – №. 4. – P. 046001.
  51. Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Babushkin I. V., Rosanov N. N., Arkhipov M. V. Few-cycle pulse-driven excitation response of resonant medium with nonlinear field coupling // *Laser Physics Letters*. – 2016. – Vol. 13. – №. 12. – P. 126001.
  52. Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Babushkin I. V., Arkhipov M. V., Tolmachev Yu. A., Rosanov N. N. Generation of unipolar pulses in a circular Raman-active medium excited by few-cycle optical pulses // *JOSA B*. – 2016. – Vol. 33. – №. 12. – P. 2518-2524.
  53. Архипов Р. М., Жигулева Д. О., Пахомов А. В., Архипов М. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Генерация предельно-коротких импульсов при возбуждении нелинейной резонансной среды световым зайчиком, движущимся со сверхсветовой скоростью // *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – Vol. 124. – №. 4. – P. 505-509. Arkhipov R. M., Zhiguleva D. O., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Babushkin I., Rosanov N. N. Generation of Extremely Short Pulses upon Excitation of a Resonant Medium by a Superluminal Light Spot // *Optics and Spectroscopy*. – 2018. – Vol. 124. – P. 536-540.

54. Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Babushkin I. V., Arkhipov M. V., Tolmachev Yu. A., Rosanov N. N. All-optical control of unipolar pulse generation in a resonant medium with nonlinear field coupling // *Physical Review A*. – 2017. – Vol. 95. – №. 1. – P. 013804.
55. Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N., Babushkin I. Unusual terahertz waveforms from a resonant medium controlled by diffractive optical elements // *Scientific reports*. – 2019. – Art. № 7444. – P. 1-12
56. Pakhomov A., Arkhipov M., Rosanov N., Arkhipov R. Generation of waveform-tunable unipolar pulses in a nonlinear resonant medium // *Physical Review A*. – 2022. – Vol. 106. – №. 5. – P. 053506.
57. Архипов Р.М., Архипов М.В., Пахомов А.В., Дьячкова О.О., Розанов Н.Н. Излучение уединенного импульса поляризации, движущегося со скоростью света // *Письма в ЖЭТФ*. – 2023. – Т.117. – С.580-589. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Diachkova O. O., Rosanov N. N. Radiation of a Solitary Polarization Pulse Moving at the Speed of Light // *JETP Letters*. – 2023. – Vol. 117. – P. 574–582.
58. Pakhomov A., Arkhipov R., Arkhipov M., Rosanov N. Temporal differentiation and integration of few-cycle pulses by ultrathin metallic films // *Optics Letters*. – 2021. – Vol. 46. – №. 12. – P. 2868-2871.
59. Пахомов А. В., Архипов Р. М., Архипов М. В., Розанов Н. Н. Временное интегрирование и дифференцирование униполярных импульсов необычной формы // *Квантовая электроника*. – 2021. – Т. 51. – №. 11. – С. 1000-1003. Pakhomov A. V., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Rosanov N. N. Time integration and differentiation of unipolar pulses of unusual shape // *Quantum Electronics*. – 2021. – Vol. 51. – №. 11. – P. 1000.
60. Kaplan A. E., Shkolnikov P. L. Electromagnetic “bubbles” and shock waves: unipolar, nonoscillating EM solitons // *Physical Review Letters*. – 1995. – Т. 75. – №. 12. – С. 2316.
61. Sazonov S. V. Soliton-like unipolar objects in nonequilibrium dissipative media // *Laser Physics Letters*. – 2021. – Vol. 18. – №. 10. – P. 105401.
62. Сазонов С. В., Устинов Н. В. Оптико-терагерцовые солитоны с наклонными фронтами // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2021. – Т. 114. – №. 7. – С. 437-443. Sazonov S. V., Ustinov N. V. Optical–Terahertz Solitons with Tilted Fronts // *JETP Letters*. – 2021. – Vol. 114. – P. 380-386.

63. Сазонов С. В. Локализованные диссипативные униполярные объекты в условиях вынужденного комбинационного рассеяния // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2022. – Т. 116. – №. 1. – С. 25-32. Sazonov S. V. Localized Dissipative Unipolar Objects under the Condition of Stimulated Raman Scattering // JETP Letters. – 2022. – Vol. 116. – №. 1. – P. 22-28.
64. Sazonov S. V. Soliton-like optical pulse in a gain medium with dissipation under conditions of intra-pulse Raman scattering // Laser Physics Letters. – 2022. – Vol. 19. – №. 11. – P. 115402.
65. Arkhipov R., Arkhipov M., Demircan A., Morgner U., Babushkin I., Rosanov N. Single-cycle pulse compression in dense resonant media // Optics Express. – 2021. – Vol. 29. – №. 7. – P. 10134-10139.
66. Архипов Р. М., Архипов М. В., Федоров С. В., Розанов Н. Н. Получение изолированных аттосекундных импульсов с большой электрической площадью в плотной резонансной среде // Оптика и спектроскопия. – 2021. – Т. 129. – №. 10. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Fedorov S. V., Rosanov N. N. Generation of isolated attosecond pulses with large electric area in a dense resonant medium // Optics and Spectroscopy. – 2022. – Vol. 130. – №. 13. – P. 2020-2025.
67. Arkhipov M., Arkhipov R., Babushkin I., Rosanov N. Self-Stopping of Light // Physical Review Letters. – 2022. – Vol. 128. – №. 20. – P. 203901.
68. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов, А. В., Розанов Н. Н. Атомная мера электрической площади униполярного светового импульса // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 114. – №. 3. – С. 156-159. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Atomic Scale of an Electrical Area for Unipolar Light Pulses // JETP Letters. – 2021. – Vol. 114. – P. 129-131.
69. Rosanov N., Tumakov D., Arkhipov M., Arkhipov, R. Criterion for the yield of micro-object ionization driven by few-and subcycle radiation pulses with nonzero electric area // Physical Review A. – 2021. – Vol. 104. – №. 6. – P. 063101.
70. Pakhomov A., Arkhipov, M., Rosanov N., Arkhipov R. Ultrafast control of vibrational states of polar molecules with subcycle unipolar pulses // Physical Review A. – 2022. – Vol. 105. – №. 4. – P. 043103.
71. Розанов Н. Н. Электрическая площадь предельно коротких импульсов и момент силы // Оптика и спектроскопия. – 2018. – Т. 125. – №. 6. – С. 818. Rosanov N. N. Electric Area of an Extremely Short Pulse and Moment of Force // Optics and Spectroscopy. – 2018. – Vol. 125. – P. 1012-1013.

72. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И. В., Пахомов А. В., Розанов Н. Н. Особенности возбуждения квантовых систем малоцикловыми аттосекундными световыми импульсами–интерференция площадей огибающей и электрической площади импульса // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 114. – №. 5. – С. 298-303. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Envelope Area and Electric Pulse Area Interference in Excitation of Quantum Systems by Few-cycle Attosecond Light Pulses // JETP Letters. – 2021. – Vol. 114. – №. 5. – P. 250-255.
73. Arkhipov R., Arkhipov M., Pakhomov A., Rosanov N. Interference of areas of subcycle light pulses // Laser Physics. – 2022. – Vol. 32. – №. 6. – P. 066002.
74. Eichler H. J., Günter P., Pohl D. W. Laser-induced dynamic gratings. – Springer, 2013. – Vol. 50.
75. Abella I. D., Kurnit N. A., Hartmann S. R. Photon echoes // Physical Review. – 1966. – Vol. 141. – №. 1. – P. 391.
76. Штырков Е. И., Лобков В. С., Ярмухаметов Н. Г. Индуцированная решетка, формируемая в рубине интерференцией атомных состояний // Письма в ЖЭТФ. – 1978. – Т. 27. – №. 12. – С. 685-688. Shtyrkov E. I., Lobkov V. S., Yarmukhametov N. G. Grating induces in ruby by interference of atomic states // Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. – 1978. – Vol. 27. – P. 648.
77. Штырков Е. И. Формирование интерферограмм в резонансной среде неперекрывающимися импульсами когерентного света // Оптика и спектроскопия. – 1978. – Т. 45. – С. 603-605. Shtyrkov E. I. Formation of interferograms in a resonant medium by nonoverlapping pulses of coherent light // Optics and Spectroscopy. – 1978. – V. 45. – №. 3. – P. 339-340.
78. Моисеев С. А., Штырков Е. И. Генерация переходных инверсионных решеток ультрамалого периода в средах с фазовой памятью при многоимпульсном взаимодействии // Квантовая электроника. – 1991. – Vol. 18. – №. 4. – P. 447-451; Moiseev S. A., Shtyrkov E. I. Generation of transient inversion gratings with an ultrashort period in media exhibiting a phase memory under multipulse interaction conditions // Soviet Journal of Quantum Electronics. – 1991. – Vol. 21. – №. 4. – P. 403.
79. Штырков Е. И. Оптическая эхо-голография // Оптика и спектроскопия. – 2013. – Т. 114. – №. 1. – С. 105-105. Shtyrkov E. I. Optical echo holography // Optics and Spectroscopy. – 2013. – Vol. 114. – P. 96-103.

80. Архипов Р. М. Электромагнитно индуцированные решетки атомных населенностей, создаваемые с помощью предельно коротких световых импульсов (Миниобзор) // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2021. – Т. 113. – №. 10. – С. 636-649. Arkhipov R. M. Electromagnetically induced gratings created by few-cycle light pulses (brief review) // JETP Letters. – 2021. – Vol. 113. – P. 611-621.
81. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Создание и стирание решеток разности заселенностей при когерентном взаимодействии резонансной среды с предельно короткими оптическими импульсами // Оптика и спектроскопия. – 2016. – Т. 121. – №. 5. – С. 810-816. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V. Babushkin I., Rosanov N. N. Formation and erasure of population difference gratings in the coherent interaction of a resonant medium with extremely short optical pulses // Optics and Spectroscopy. – 2016. – Vol. 121. – P. 758-764.
82. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N. Ultrafast creation and control of population density gratings via ultraslow polarization waves // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41. – №. 21. – P. 4983-4986.
83. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И. В., Пахомов А. В., Розанов Н. Н. Решетки разности населенностей, создаваемые униполярными импульсами длительностью менее одного периода поля в резонансной среде // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – №. 7. – С. 589-592. Arkhipov R. M., Arkhipov, M. V., Babushkin I., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Population difference gratings produced by unipolar subcycle pulses in a resonant medium // Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 47. – №. 7. – P. 589.
84. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Babushkin I., Rosanov N. N. Light-induced spatial gratings created by unipolar attosecond pulses coherently interacting with a resonant medium // Laser Physics Letters. – 2017. – Vol. 14. – №. 9. – P. 095402.
85. Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N. Population density gratings induced by few-cycle optical pulses in a resonant medium // Scientific Reports. – 2017. – Vol. 7. – Article No. 12467.
86. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов А. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Столкновение униполярных субцикловых импульсов в нелинейной резонансно поглощающей среде // Оптика и спектроскопия. – 2017. – Т. 123. – №. 4. – С. 600-605. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Babushkin I.,

- Rosanol N. N. Collisions of unipolar subcycle pulses in a nonlinear resonantly absorbing medium // *Optics and Spectroscopy*. – 2017. – Vol. 123. – P. 610-614.
87. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов А. В., Бабушкин И. Столкновение одноцикловых и субцикловых аттосекундных световых импульсов в нелинейной резонансной среде // *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – Т. 124. – №. 4. – С. 510-517. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Zhiguleva D. O., Rosanol N. N. Collisions of Single-Cycle and Subcycle Attosecond Light Pulses in a Nonlinear Resonant Medium // *Optics and Spectroscopy*. – 2018. – Vol. 124. – P. 541-548.
88. Архипов Р. М., Пахомов А. В., Архипов М. В., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Светоиндуцированные решетки, создаваемые с помощью пары коротких терагерцовых импульсов, не перекрывающихся в резонансной среде // *Оптика и спектроскопия*. – 2018. – Vol. 125. – №. 4. – P. 564-567. Arkhipov R. M., Pakhomov A. V., Arkhipov M. V., Babushkin I., Rosanol N. N. Population difference gratings induced in a resonant medium by a pair of short terahertz nonoverlapping pulses // *Optics and Spectroscopy*. – 2018. – Vol. 125. – P. 586-589.
89. Архипов Р. М., Архипов М. В., Пахомов, А. В., Розанов Н. Н. Решетки населенностей, создаваемые в квантовой системе с помощью пары субцикловых импульсов // *Квантовая электроника*. – 2019. – Т. 49. – №. 10. – С. 958-962. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov, A. V., Rosanol N. N. Population gratings produced in a quantum system by a pair of sub-cycle pulses // *Quantum Electronics*. – 2019. – Vol. 49. – №. 10. – P. 958.
90. Arkhipov R., Pakhomov A., Arkhipov M., Demircan A., Morgner U., Rosanol N., Babushkin I. Selective ultrafast control of multi-level quantum systems by subcycle and unipolar pulses // *Optics Express*. – 2020. – Т. 28. – №. 11. – С. 17020-17034.
91. Arkhipov R., Pakhomov A., Arkhipov M., Babushkin I., Demircan A., Morgner U., Rosanol N. Population difference gratings created on vibrational transitions by nonoverlapping subcycle THz pulses // *Scientific Reports*. – 2021. – Vol. 11. – Art. № 1961.
92. Архипов Р. М., Белов П.А., Архипов М.В., Пахомов А.В. Розанов Н.Н. Когерентное управление и создание решеток населенностей парой аттосекундных импульсов в резонансной среде на основе одномерных прямоугольных квантовых ям // *Оптика и спектроскопия*. – 2022. – Т. 130. – №. 6. – С.969. Arkhipov R. M., Belov P.A., Arkhipov M.V., Pakhomov A.V., Rosanol N.N., Coherent control and creation of population gratings for a pair of attosecond

- pulses in a resonant medium based on one-dimensional rectangular quantum wells // *Optics and Spectroscopy* – Vol. 130. – №. 6. –P. 772.
93. Diachkova O. O., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Population density gratings produced by a pair of nonharmonic unipolar rectangular attosecond pulses in a resonant medium // *Laser Physics*. – 2023. – Vol. 33. – №. 4. – P. 045301.
  94. Архипов Р. М. Решетки населенностей, создаваемые парой униполярных аттосекундных импульсов в трехуровневой атомарной среде // *Оптика и спектроскопия*. – 2020. – Т. 128. – №. 11. – С. 1732-1736. Arkhipov R. M. Population Gratings Created by a Pair of Unipolar Attosecond Pulses in a Three-Level Atomic Medium // *Optics and Spectroscopy*. – 2020. – Vol. 128. – P. 1865-1869.
  95. Архипов М.В., Пахомов А.В., Дьячкова О.О., Розанов Н.Н. Негармонические пространственные структуры разности населенностей, создаваемые униполярными прямоугольными импульсами в резонансной среде // *Оптика и спектроскопия*. – 2022. – Т. 130. – №. 11. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Dyachkova O. O., Rosanov N. N. // Nonharmonic Spatial Population Difference Structures Created by Unipolar Rectangular Pulses in a Resonant Medium // *Optics and Spectroscopy*. – 2022. –Vol. 130. – №11. – P. 1443-1449.
  96. Diachkova O. O., Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Light-induced dynamic microcavities created in a resonant medium by collision of non-harmonic rectangular 1-fs light pulses // *Optics Communications*. – 2023. – Vol. 538. – P. 129475.
  97. Архипов Р. М., Архипов М. В., Розанов Н. Н. О возможности голографической записи в отсутствие взаимной когерентности опорного и предметного пучков // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2020. – Т. 111. – №. 9. – С. 586-590. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Rosanov N. N. On the possibility of holographic recording in the absence of coherence between a reference beam and a beam scattered by an object // *JETP Letters*. – 2020. – Vol. 111. – P. 484-488.
  98. Aharonov Y., Bohm D. Significance of electromagnetic potentials in the quantum theory // *Physical Review*. – 1959. – Vol. 115. – №. 3. – P. 485.
  99. Архипов М. В., Архипов Р. М., Розанов Н. Н. Оптический эффект Ааронова–Бома // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2020. – Т. 111. – №. 12. – С. 794-797. Arkhipov M.V., Arkhipov R. M., Rosanov N. N. Optical Aharonov—Bohm Effect // *JETP Letters*. – 2020. – Vol. 111. – №. 12. – P. 668-671.

100. Розанов Н. Н., Александров И. А., Архипов М. В., Архипов Р. М., Бабушкин И., Веретеннов Н. А., Дадеко А. В., Тумаков Д. А., Федоров С. В. Диссипативные аспекты экстремальной нелинейной оптики // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – №. 11. – С. 959-969. Rosanov N. N., Aleksandrov I. A., Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Babushkin I., Veretenov N. A., Dadeko A. V., Tumakov D. A., Fedorov S. V. Dissipative aspects of extreme nonlinear optics // Quantum Electronics. – 2021. – Vol. 51. – №. 11. – P. 959.
101. Kozlov V. V. Self-induced transparency soliton laser via coherent mode locking // Physical Review A. – 1997. – Vol. 56. – №. 2. – P. 1607.
102. Menyuk C. R., Talukder M. A. Self-induced transparency modelocking of quantum cascade lasers // Physical Review Letters. – 2009. – Vol. 102. – №. 2. – P. 023903.
103. Talukder M. A., Menyuk C. R. Analytical and computational study of self-induced transparency mode locking in quantum cascade lasers // Physical Review A. – 2009. – Vol. 79. – №. 6. – P. 063841.
104. Kozlov V. V., Rosanov N. N., Wabnitz S. Obtaining single-cycle pulses from a mode-locked laser // Physical Review A. – 2011. – Vol. 84. – №. 5. – P. 053810.
105. Kozlov V. V., Rosanov N. N. Single-cycle-pulse passively-mode-locked laser with inhomogeneously broadened active medium // Physical Review A. – 2013. – Vol. 87. – №. 4. – P. 043836.
106. Архипов Р. М., Архипов М. В., Бабушкин И. В. О когерентной синхронизации мод в двухсекционном лазере // Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2015. – Т. 101. – №. 3. – С. 164-169; Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I. V. On coherent mode-locking in a two-section laser // JETP Letters. – 2015. – Vol. 101. – P. 149-153.
107. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I. Self-starting stable coherent mode-locking in a two-section laser // Optics Communications. – 2016. – Vol. 361. – P. 73-78.
108. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Babushkin I., Rosanov N. N. Self-induced transparency mode locking, and area theorem // Optics Letters. – 2016. – Vol. 41. – №. 4. – P. 737-740.
109. Arkhipov R., Pakhomov A., Arkhipov M., Babushkin I., Rosanov N. Stable coherent mode-locking based on  $\pi$  pulse formation in single-section lasers // Scientific Reports. – 2021. – Vol. 11. – Art. №1147.

110. Arkhipov R., Arkhipov M., Pakhomov A., Babushkin I., Rosanov N. Single-cycle-pulse generation in a coherently mode-locked laser with an ultrashort cavity // *Physical Review A*. – 2022. – Vol. 105. – №. 1. – P. 013526.
111. Pakhomov A., Arkhipov M., Rosanov N., Arkhipov R. Self-starting coherent mode locking in a two-section laser with identical gain and absorber media // *Physical Review A*. – 2023. – Vol. 107. – №. 1. – P. 013510.
112. Архипов М. В., Архипов Р.М., Шимко А.А., Бабушкин И. Синхронизация мод в лазере с когерентным поглотителем // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2015. – Т. 101. – №. 4. – С. 250-253; Arkhipov M. V., Arkhipov R.M., Shimko A.A., Babushkin I. Mode-locking in a laser with a coherent absorber // *JETP Letters*. – 2015. – Vol. 101. – P. 232-235.
113. Arkhipov M. V., Shimko A. A., Arkhipov R. M., Babushkin I., Kalinichev A. A., Demircan A., Morgner U., Rosanov N. N. Mode-locking based on zero-area pulse formation in a laser with a coherent absorber // *Laser Physics Letters*. – 2018. – Vol. 15. – №. 7. – P. 075003.
114. Masuda K., Affolderbach Ch., Miletì G., Diels J., Arissian L. Self-induced transparency and coherent population trapping of 87 Rb vapor in a mode-locked laser // *Optics Letters*. – 2015. – Vol. 40. – №. 9. – P. 2146-2149.
115. Архипов М. В., Архипов, Р. М., Шимко А. А., Бабушкин И. В., Розанов Н. Н. Синхронизация мод в титан-сапфировом лазере за счет когерентного поглотителя // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики*. – 2019. – Т. 109. – №. 10. – С. 657-661. Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Shimko A. A., Babushkin I., Rosanov N. N. Mode Locking in a Ti: Sapphire Laser by Means of a Coherent Absorber // *JETP Letters*. – 2019. – Vol. 109. – №. 10. – P. 634–637.
116. Arkhipov M. V., Shimko A. A., Rosanov N. N. Babushkin I., Arkhipov R. M. Self-induced-transparency mode locking in a Ti: sapphire laser with an intracavity rubidium cell // *Physical Review A*. – 2020. – Vol. 101. – №. 1. – P. 013803.
117. Arkhipov M. V., Arkhipov R. M., Shimko A. A., Babushkin I., Rosanov N. N. Experimental study of self-induced transparency mode-locking in Ti: sapphire laser // *Journal of Physics: Conference Series*. – IOP Publishing, 2019. – Vol. 1410. – №. 1. – P. 012102.
118. Архипов Р. М., Архипов М. В., Шимко А. А., Бабушкин И., Розанов Н. Н. Синхронизация мод в лазерах за счет явления самоиндуцированной прозрачности: новые теоретические и экспериментальные результаты // *Известия Российской академии наук. Серия физическая*. – 2020. – Т. 84. – №. 1. – С. 30-34.

- Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Shimko A. A., Babushkin I., Rosanov N. N. Mode Locking in Lasers due to Self-Induced Transparency: New Theoretical and Experimental Results // *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics.* – 2020. – Vol. 84. – P. 23-26.
119. Архипов Р. М., Архипов, М. В., Шимко, А. А., Пахомов, А. В., Розанов Н. Н. Предельно короткие оптические импульсы и их генерация в резонансных средах (Миниобзор) // *Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики.* – 2019. – Т. 110. – №. 1. – С. 9-20. Arkhipov R. M., Arkhipov M. V., Shimko A. A., Pakhomov A. V., Rosanov N. N. Ultrashort optical pulses and their generation in resonant media (scientific summary) // *JETP Letters.* – 2019. – Vol. 110. – P. 15-24.
120. Архипов М. В., Шимко А. А., Архипов Р. М., Розанов Н. Н. Захват частоты генерации титан-сапфирового лазера линиями резонансного поглощения ячейки с парами цезия, размещенными в резонаторе // *Журнал прикладной спектроскопии.* – 2023. – Т. 90. – №. 2. – С. 149-155. Arkhipov M. V., Shimko A. A., Arkhipov R. M., Rozanov N. N. Frequency Locking of the Titanium–Sapphire Laser by Resonant Absorption Lines of a Cesium-Vapor Cell in a Cavity // *Journal of Applied Spectroscopy.* – 2023. – Vol. 90. – № 2. – P. 251-256.
121. Розанов Н. Н. Диссипативные оптические солитоны. От микро-к нано-и атто. – М. – Физматлит. – 2021.
122. Stratmann M., Pagel T., Mitschke F. Experimental observation of temporal soliton molecules // *Physical Review Letters.* – 2005. – Vol. 95. – №. 14. – P. 143902.
123. Dudley J. M., Genty G., Mussot A., Chabchoub A., Dias F. Rogue waves and analogies in optics and oceanography // *Nature Reviews Physics.* – 2019. – Vol. 1. – №. 11. – P. 675-689.
124. Melchert O., Willms S., Bose S., Yulin A., Roth B., Mitschke F., Morgner U., Babushkin I., and Demircan A., Soliton molecules with two frequencies // *Physical Review Letters.* – 2019. – Vol. 123. – №. 24. – P. 243905.
125. Peng J., Tarasov N., Sugavanam S., Churkin D. Rogue waves generation via nonlinear soliton collision in multiple-soliton state of a mode-locked fiber laser // *Optics Express.* – 2016. – Vol. 24. – №. 19. – P. 21256-21263.