

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Потравкина Николая Николаевича "Формирование и распространение неоднородно эллиптически поляризованных импульсов в средах с кубической нелинейностью," представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Диссертационная работа Н. Н. Потравкина посвящена теоретическому исследованию формирования и распространения неоднородно эллиптически поляризованных импульсов в средах с кубической нелинейностью. Интерес к этому направлению исследований связан прежде всего с тем, что состояние поляризации излучения зачастую кардинально влияет на эффективность протекания различных нелинейно оптических процессов. В частности, использование эллиптически поляризованных импульсов в спектроскопии позволяет получать информацию о тензорных характеристиках вещества в широком диапазоне частот. Управление поляризацией зондирующего фемтосекундного лазерного импульса открывает качественно новый уровень контроля над квантовым состоянием молекул. Изменяющееся во времени векторное поле таких импульсов может влиять на квантовую систему, переводя ее в недоступные при использовании линейно поляризованных импульсов состояния. Эффективность генерации высших гармоник высокоинтенсивными сверхкороткими импульсами также весьма чувствительна к их поляризационному состоянию. Наличие дополнительных степеней свободы по сравнению с линейно поляризованным излучением открывает широкие возможности использования эллиптически поляризованных импульсов для передачи информации. Особенно актуальным в связи с использованием подобных импульсов является дизайн компактных оптических устройств, в частности с использованием хиральных метаматериалов, демонстрирующих качественно различные свойства при распространении в них излучения (в том числе сверхкоротких импульсов) с различными состояниями поляризации. С теоретической точки зрения, описание распространения эллиптически поляризованного излучения требует внедрения новых численных алгоритмов и развития новых аналитических подходов, по сравнению с подходами, традиционно используемыми для линейно поляризованного излучения. Широкий круг возможных приложений, использующих неоднородно эллиптически поляризованное импульсное излучение, свидетельствует о несомненной актуальности диссертационной работы. Достоверность результатов и выводов, представленных в диссертационной работе, обеспечивается хорошим согласием результатов теоретических расчетов, выполненных с использованием проверенных фундаментальных моделей, с известными в литературе теоретически и экспериментально установленными закономерностями.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Список цитируемых литературных источников включает 208 наименований. Общий объем работы – 123 страницы.

Первая глава посвящена анализу динамики распространения уединенных импульсов и периодических кноидальных волн в среде с кубической нелинейностью и пространственной дисперсией нелинейного оптического отклика. Описание распространения излучения в таких средах производится на основе решения системы нелинейных уравнений Шредингера для медленно меняющихся комплексных амплитуд циркулярно поляризованных компонент электрического поля. Показано, что в процессе распространения в среде с аномальной дисперсией групповых скоростей и пространственной дисперсией нелинейности изначально однородно эллиптически поляризованных импульсов происходит формирование уединенных волн, у которых не только интенсивность, но и состояние по-

ляризации меняется вдоль временного профиля. С помощью теории возмущений определены области существования таких решений. Впервые построены частные аналитические решения системы уравнений Шредингера, описывающие стационарные эллиптически поляризованные кноидальные волны. При различных значениях параметров нелинейной среды найдены временные зависимости интенсивности и степени эллиптичности эллипса поляризации этих волн. Также исследованы различные делокализованные аperiodические решения.

Во второй главе численными методами исследуется динамика распространения предельно коротких эллиптически поляризованных импульсов в линейных и нелинейных изотропных средах с частотной дисперсией и пространственной нелокальностью оптического отклика. Предложена модель изотропной линейной среды с частотной дисперсией, позволившая записать связывающее индукцию и напряженность электрического поля материальное уравнение без широко используемого требования малости параметра пространственной дисперсии. Описана соответствующая численная схема интегрирования системы уравнений Максвелла, основанная на конечных разностях в координатах (z, t) . Показано что в отличие от описанного в литературе явления линейной оптической активности в случае сверхкоротких импульсов временная зависимость угла поворота главной оси эллипса поляризации распространяющегося в толще среды импульса может иметь ярко выраженный нелинейный вид. Представлены голографы (кривые в пространстве, описываемые при эволюции концом вектора электрического поля), позволяющие судить об эволюции состояния поляризации в импульсе для разных начальных условий. По аналогии с моделью линейной среды строится также модель нелинейного отклика, учитывающего хроматическую и пространственную дисперсию компонент теперь уже нелинейного тензора. В рамках этой модели рассматриваются режимы распространения изначально однородно эллиптически поляризованных сверхкоротких импульсов, приводящие к формированию неоднородно поляризованного излучения. Для случая с незначительной пространственной дисперсией, с использованием импульсов, полученных в главе 1, в качестве входных показана возможность возбуждения ультракоротких неоднородно эллиптически поляризованных уединенных волн. Исследуется изменение несущей частоты импульса в инерционной нелинейной среде по мере его распространения для различных степеней эллиптичности эллипса поляризации падающего излучения.

В третьей главе метод конечных разностей во временной области применен для исследования влияния параметров структурной ячейки (в первую очередь количества полных витков трехмерной винтовой спирали) полимерного метаматериала, на пропускание и отражение нормально падающего на образец эллиптически поляризованного света. Подробно описывается численная схема решения уравнений Максвелла, оптимизированная для моделирования оптических свойств нелинейных метаматериалов с трехмерной геометрией базового элемента. Показана возможность возникновения оптических резонансов электрической и магнитной частей плотности энергии электромагнитного поля, обуславливающих существенное отличие оптических свойств такого метаматериала при прохождении через него циркулярно поляризованного излучения с противоположным направлением вращения векторов напряженности электрического поля. Исследовано влияние интенсивности падающего эллиптически поляризованного импульса на вид поляризационных характеристик прошедшего излучения в случае, когда элементарные ячейки метаматериала обладают безынерционной кубической нелинейностью.

В качестве наиболее существенных научных результатов, полученных в диссертационной работе Н. Н. Потравкина, мне хотелось бы отметить следующие:

1. Автором были найдены ранее неизвестные аналитические решения неинтегрируемой системы из двух нелинейных уравнений Шредингера, описывающие профили эллиптически поляризованных кноидальных волн в изотропной среде с дисперсией групповых скоростей и локальной и нелокальной кубическими нелинейностями. Что особенно важно, были найдены не только решения с тривиальными фазовыми распределениями поля в компонентах, но и чирпированные волны со сложными фазовыми профилями.
2. В работе показано, что полученные в рамках связанных уравнений Шредингера уединенные нелинейные волны, обеспечивают эффективное возбуждение в изотропной безынерционной кубичной среде эллиптически поляризованных солитонов даже в том случае, если их длительность меньше периода колебаний электрического поля. Процесс возбуждения подобных волн наглядно проиллюстрирован с помощью прямого решения системы уравнений Максвелла.
3. Установлено, что возрастание степени эллиптичности эллипса поляризации уединенной волны, распространяющейся в нелинейной среде с инерционным кубическим откликом, приводит к изменению скорости сдвига ее несущей частоты.
4. Наиболее "красивым" и имеющим прикладную значимость результатом работы является предсказание возможности селективного отражения циркулярно поляризованных компонент падающего излучения при их взаимодействии с хиральным метаматериалом, состоящим из периодически расположенных в виде двухмерной решетки трехмерных спиралей. При этом ширина частотного диапазона, в котором проявляется этот эффект, увеличивается с ростом пиковой интенсивности падающего импульса.

Несомненная практическая значимость диссертационной работы состоит в том, что неоднородно эллиптически поляризованные сверхкороткие импульсы могут быть использованы в целом ряде приложений, среди которых можно упомянуть генерацию гармоник высокого порядка, когерентную спектроскопию и контроль состояния отдельных молекул и атомов. Установленная автором зависимость скорости низкочастотного сдвига спектра уединенной волны от ее степени эллиптичности может быть использована для плавной перестройки частоты лазерного излучения, а также для получения спектроскопической информации о компонентах тензора локальной кубической восприимчивости, недоступной при измерениях с линейно поляризованными импульсами. Результаты исследований влияния параметров структурной ячейки хирального метаматериала, состоящего из периодически расположенных в виде двухмерной решетки трехмерных спиралей, на пропускание и отражение нормально падающего на образец эллиптически поляризованного света, позволяют построить и оптимизировать компактный циркулярный поляризатор, диапазон частот которого зависит от интенсивности падающего излучения.

Научная значимость диссертационной работы обусловлена представленными оригинальными результатами численного и аналитического исследования формирования неоднородно эллиптически поляризованных уединенных и кноидальных волн в изотропных средах, обладающих хроматической дисперсией и пространственной дисперсией кубичной нелинейности. Ключевое место среди результатов работы занимает детальный и аккуратный анализ временной динамики формирования предельно коротких уединенных волн для реализации которого, автором был разработан и внедрен оригинальный численный метод.

Представленные диссертантом выводы и заключения обоснованы и убедительны. Автореферат диссертации полностью соответствует ее содержанию. Основные результаты

и положения, выносимые на защиту, опубликованы в 13 печатных работах в ведущих реферируемых журналах, многократно докладывались на международных научных конференциях и семинарах.

Следует сделать некоторые замечания по тексту диссертационной работы:

1. При описании результатов первой главы следовало представить более развернутый вывод базового уравнения (1.2.1) исходя из первых принципов (уравнений Максвелла и материальных уравнений) и четко сформулировать, о волнах какой размерности пойдет речь (т.е. рассматриваются ли пространственно-временные возбуждения или только временные). Дело в том, что под пространственной дисперсией нелинейности в литературе, посвященной формированию уединенных нелинейных волн, как правило понимается нелокальность нелинейного отклика, возникающего в результате наличия механизмов транспорта или реориентационных эффектов, и рассматривается влияние подобной нелокальности на пространственный профиль волн. В первой же главе диссертации рассматриваются чисто временные возбуждения, полученные в предположении, что в пространстве все волны являются плоскими. Тем самым нелокальный гиротропный характер отклика среды проявляется только в различии коэффициентов для различных поляризационных компонент в уравнении (1.2.1). При этом стоило бы пояснить, почему в уравнении (1.2.1) отсутствуют члены, описывающие линейную связь между двумя поляризациями и параметрические нелинейные члены. По всей видимости столь компактную форму эволюционные уравнения приобретают именно для циркулярно-поляризованных волн и это определенно заслуживает упоминания.
2. В первой главе очень много внимания уделено степени эллиптичности при изменении форм-факторов, но практически не обсуждается изменение таких наиболее просто наблюдаемых величин, как соотношение мощностей, сосредоточенных в двух поляризационных компонентах, их амплитуд и временных длительностей и т.д. Отсутствуют оценки типичных реальных параметров излучения (характерных длительностей, пиковых интенсивностей, дисперсионных длин) применительно к нормированным параметрам, использованным при моделировании и показанным на рисунках. Эти оценки были бы крайне полезны, учитывая небольшое количество экспериментальных работ в подобных системах. Одно частное замечание связано с обсуждением влияния различных времен релаксации на запаздывание поляризационных компонент для произвольной поляризации входного импульса. Кросс-модуляционное взаимодействие и в этом случае может привести к формированию на больших расстояниях постепенно замедляющегося солитона с одинаковой скоростью запаздывания компонент, т.е. распространяющегося как одно целое. В этом случае было бы особенно интересно получить связь ускорения с временами релаксации.
3. В случае полученных периодических решений в виде кноидальных волн следовало кратко обсудить их динамическую устойчивость при распространении. Будучи состояниями "высшего порядка" по сравнению с фундаментальными светлыми и темными солитонами, периодические решения зачастую оказываются неустойчивыми. Поэтому следовало указать, какие именно из решений могут быть устойчивыми при эволюции и, следовательно, имеют шанс на экспериментальное наблюдение.
4. В главе 2 не упомянуто насколько значительной может быть хроматическая дисперсия константы линейной гирации и при каких длительностях импульсов она начинает вносить существенный вклад в эволюцию излучения (вращение эллипса

поляризации). Доступны ли экспериментальные данные по зависимости $g_0(\omega)$ и насколько хорошо выбранная модель отклика (2.2.4)-(2.2.6) их воспроизводит? Тот же самый вопрос, и даже в большей степени, относится к дисперсии элементов тензора (2.3.3), ответственного за нелинейные свойства среды. Даже учет хроматической дисперсии компонент тензора в негиротропной нелинейной среде обычно рассматривается во втором порядке малости, а здесь речь идет также о дисперсионной поправке к элементам тензора, ответственным за пространственную нелокальность. Не является ли она пренебрежимо малой? В принципе, это предположение согласуется с утверждением на стр. 65. Касательно численной схемы (2.2.10) требующей хранения векторов поля и индукции в предшествующие два момента времени – для начала работы схемы видимо также необходимо задать поля на первом и втором шаге. Поле на первом шаге очевидно определяется граничными условиями, но из каких соображений выбиралось поле на втором шаге?

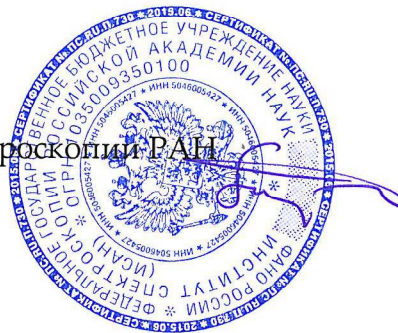
Тем не менее, указанные замечания не снижают общей высокой оценки диссертационной работы.

Диссертация удовлетворяет всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Н.Н. Потравкин, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Официальный оппонент
доктор физ.-мат. наук
ведущий научный сотрудник Института спектроскопии РАН

Я. В. Карташов
16.10.2015

Подпись Я. В. Карташова заверяю
Секретарь Ученого совета Института спектроскопии РАН
кандидат физ.-мат. наук



Е. Б. Перминов

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Николая Николаевича Потравкина
«Формирование и распространение неоднородно эллиптически
поляризованных импульсов в средах с кубической
нелинейностью», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности
01.04.21 – лазерная физика.

Диссертационная работа Н.Н. Потравкина посвящена развитию теории распространения в оптических средах интенсивного лазерного излучения с эллиптической поляризацией. Им дан глубокий анализ механизмов формирования эллиптически поляризованных уединенных и кноидальных волн в нетривиальном случае гиротропных сред, обладающих частотной и пространственной дисперсией нелинейно-оптического отклика. В том числе в работе рассмотрены находящиеся на переднем крае науки задачи исследования динамики волн из малого числа колебаний и особенностей распространения лазерного излучения в метаматериалах. Качественно более сложные, чем для изучения с линейной поляризацией, особенности динамики эллиптически поляризованных волн в нелинейных средах позволяют расширить, давая новые степени свободы, возможности их применений в самых разных направлениях науки и техники: от использований в нелинейной спектроскопии и молекулярной биологии до разработок на их основе новых сверхбыстрых оптических систем передачи и обработки информации. Поэтому диссертационная работа Н.Н. Потравкина представляется мне несомненно **актуальной и важной**.

Диссертация состоит из трех глав. В начале каждой главы дан обзор работ, включающий известные теоретические и экспериментальные исследования в выбранной области и сформулированы не решенные на момент начала работы соискателя проблемы. Далее излагаются новые, полученные соискателем результаты.

В первой главе Н.Н. Потравкин рассматривает вопросы формирования векторных уединенных и кноидальных волн в средах с частотной дисперсией и пространственной дисперсией кубической нелинейности. В основе математической модели распространения эллиптически поляризованного лазерного излучения в таких средах у соискателя лежит система из двух нелинейных уравнений в частных производных для медленно меняющихся комплексных амплитуд циркулярно поляризованных компонент поля. Эта модель для рассматриваемых в главе задач, на мой взгляд, **является обоснованной**. К наиболее **значимым приоритетным результатам** соискателя, изложенным в этой главе, отнесу найденные им ранее неизвестные аналитические решения системы нелинейных уравнений Шредингера, которые соответствуют распространяющимся эллиптически поляризованным кноидальным волнам, а также определение условий их существования .

Вторая глава посвящена особенностям формирования и распространения в изотропных средах с кубической нелинейностью неоднородно эллиптически поляризованных импульсов из малого числа колебаний. Н.Н. Потравкиным в должной мере **обоснована оригинальная** модель изотропной гиротропной среды, обладающей и частотной и пространственной дисперсией кубической нелинейности, в которой не используются предположения о малости характерного масштаба нелокальности. Для моделирования распространения волн из малого числа колебаний в таких средах соискателем используется, по-видимому, **впервые** адаптированный на случай сред с нелокальным оптическим откликом метод конечных разностей во временной области, позволяющий эффективно решать систему уравнений Максвелла с весьма произвольным видом материальных уравнений. Н.Н. Потравкиным показано, что эволюция состояния поляризации импульсов из малого числа колебаний в гиротропных средах может отличаться от описанной в литературе даже в случае линейной среды. Так характерная для классического эффекта оптической активности

линейная зависимость поворота главной оси эллипса поляризации от координаты распространения при переходе к предельно короткому импульсному излучению имеет явно выраженный нелинейный вид. К наиболее интересным результатам второй главы отнесу установленные соискателем особенности формирования векторных уединенных волн из малого числа колебаний. Им в частности показано, что выбор формы лазерного импульса, нормально падающего на изотропную среду с аномальной частотной дисперсией и безынерционной кубической нелинейностью, в виде солитонного решения системы нелинейных уравнений Шредингера обеспечивает формирование в процессе его дальнейшего распространения эллиптически поляризованной уединенной волны, даже если падающий импульс становится однопериодным. **С практической точки зрения интересен результат**, устанавливающий зависимость скорости сдвига в низкочастотную область спектра распространяющейся уединенной волны от состояния ее поляризации, что открывает контролируемым образом перестраивать несущую частоту импульсного излучения, управляя лишь состоянием его поляризации.

В третьей главе Н.Н. Потравкин рассматривает особенности взаимодействия импульсного излучения с хиральными метаматериалами, состоящими из расположенных в виде двумерной решетки трехмерных спиралей. Такие структуры демонстрируют существенное различие их оптических свойств для лево и право циркулярно поляризованных компонент поля в широком диапазоне частот, что представляет несомненный интерес для инженерных задач построения на основе таких структур компактных элементов управления поляризацией импульсного излучения. В главе обоснованы численные схемы и алгоритмы на основе метода конечных разностей для решения задач взаимодействия импульсного излучения с нелинейными метаматериалами. Считаю, что эти алгоритмы и созданный на их основе пакет программ имеет **практическую значимость**. Соискателем методами численного моделирования **впервые** показано, что при падении

лазерного импульса на метаматериал, состоящий из периодически расположенных в виде двумерной решетки трехмерных спиралей, в нем могут возникать существенно различающиеся режимы колебаний электрической и магнитной частей плотности энергии электромагнитного поля, которые обуславливают эффект селективного отражения циркулярно поляризованных компонент падающего излучения. К полезным **оригинальным** результатам главы можно отнести выявленную соискателем зависимость ширины диапазона селективного отражения от интенсивности падающего излучения. **Достоверность** этих результатов подтверждается их принципиальным согласием с существующими экспериментальными данными известными из литературы.

Таким образом, защищаемые Н.Н. Потравкиным научные положения представляются мне новыми, обоснованными и достоверными, а также практически значимыми.

Тем не менее, к содержанию диссертации имеется ряд замечаний.

1. Даже в теоретической работе, где используются (естественно) нормированные уравнения, следовало бы давать оценки их параметров для типичных сред и характеристик лазерного излучения. Например, в Главе 1 такие оценки отсутствуют.
2. При обнаружении и обсуждении новых типов уединенных волн хотелось бы видеть анализ их устойчивости.
3. Результаты анализа динамики эллиптически поляризованных волн из малого числа колебаний в предельном случае сред без пространственной дисперсии полезно было бы сравнить с результатами более ранних работ по исследованию самоиндуцированного изменения поляризации волн из малого числа колебаний, обзор которых дан, например, в книге С.А. Козлова и В.В. Самарцева «Основы фемтосекундной оптики». – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009 на стр. 65-69.

Указанные замечания не снижают научной и практической ценности работы. В целом, диссертация является законченной научно-исследовательской работой, полученные в ней результаты оригинальны, обоснованны и достоверны. Работа выполнена на высоком профессиональном уровне.

Основные научные результаты диссертации Н.Н. Потравкина достаточно полно изложены в публикациях, в том числе и по перечню изданий ВАК.

Автореферат диссертации правильно отражает ее структуру и содержание, а положения, выносимые на защиту, соответствуют основным результатам работы.

Диссертационная работа "Формирование и распространение неоднородно эллиптически поляризованных импульсов в средах с кубической нелинейностью" полностью соответствует требованиям к кандидатским диссертациям положения о порядке присуждения ученых степеней ВАК, а ее автор – Потравкин Николай Николаевич – заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – Лазерная физика.

Официальный оппонент
декан факультета
фотоники и оптоинформатики
Санкт-Петербургского национального
исследовательского университета
информационных технологий, механики и оптики,
д.ф.-м.н., профессор
Университет ИТМО,
197101, Санкт-Петербург,
Кронверкский пр. 49
kozlov@mail.ifmo.ru

Козлов С.А.

Подпись _____
уважаю
Специалист ОК
Университета ИТМО

