

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки

Института спектроскопии
Российской академии наук,
доктор физ.-мат. наук

В. Н. Задков

«30» декабря 2015 г.



ОТЗЫВ ведущей организации

на диссертационную работу Никитина Сергея Юрьевича
«Рассеяние лазерного излучения в однородных газовых и в жидких дисперсных средах»,
представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальностям 01.04.21 – Лазерная физика и 03.01.02 – Биофизика.

Диссертационная работа С. Ю. Никитина посвящена теории упругого и неупругого рассеяния света в применении к процессам преобразования лазерного излучения и измерения параметров вещества в газовой и в жидкой дисперсной фазе. Тема диссертации связана с развитием одного из наиболее актуальных междисциплинарных научных направлений и связана с решением широкого круга фундаментальных и прикладных задач лазерной физики и биофотоники. Дело в том, что современные методы и инструменты лазерной физики предоставляют уникальные возможности для исследования процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом, преобразования излучения и развития методов диагностики. Все это требует разработки новых теоретических подходов к описанию процессов взаимодействия излучения с различными веществами и объектами. Особое прикладное значение приобретает данный вопрос при решении задач современной биофизики, в частности при разработке методов диагностики биологических объектов. Все вышесказанное подтверждает *актуальность* диссертации Никитина С.Ю.

Основу диссертации составляет математическое моделирование процессов взаимодействия лазерного излучения с веществом. В лазерной физике такое моделирование играет большую роль ввиду сложности изучаемых с помощью лазеров объектов, а также ввиду многообразия физических процессов, которые могут протекать в веществе под воздействием мощного когерентного оптического излучения. Теоретическое моделирование позволяет классифицировать различные режимы взаимодействия света и вещества, выявлять важные функциональные соотношения между параметрами, характеризующими то или иное явление, вести целенаправленный поиск новых алгоритмов обработки данных. Диссертация С. Ю. Никитина ярко демонстрирует эти возможности. Характерной особенностью диссертации является то, что результаты теоретических исследований автор сопоставляет с экспериментальными данными. Это делает результаты работы убедительными и практически полезными.

В первой и второй главах диссертации автор рассматривает новый режим вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР) света – обратное вынужденное комбинационное рассеяние, обусловленное параметрическим взаимодействием стоксовой и антистоксовой компонент. В 1982 году С. Ю. Никитин теоретически исследовал нелинейное взаимодействие волн накачки, антистоксовой, попутной и обратной стоксовых компонент ВКР и сформулировал условия существования режима ВКР, при котором рассеяние происходит в направлении назад, а попутное рассеяние не развивается.

После публикации этой работы появились сообщения о наблюдении нового режима рассеяния в газах - водороде и метане, а также в кристаллах – кальците и нитрате бария. Было выяснено, что режим обратного ВКР действительно существует и перспективен для создания эффективных компактных преобразователей лазерного излучения. В диссертации С. Ю. Никитина поставлена и решена задача всестороннего теоретического исследования режима обратного ВКР. Для этой цели автором предложена модель процесса, которая позволила описать зависимость эффективности преобразования излучения от энергии, длительности, длины волны и спектральной ширины импульса накачки, а также от давления комбинационно-активной газообразной среды и условий фокусировки лазерного излучения. Сопоставление результатов расчетов, сделанных с помощью этой модели, с экспериментальными данными по ВКР в водороде показало их хорошее согласие.

Третья глава диссертации посвящена теории нестационарного когерентного антистоксова рассеяния света (КАРС) в газах. Использование в этом процессе пикосекундных лазерных импульсов позволяет исследовать сверхбыстрые кинетические и динамические процессы. К числу таких процессов относится процесс диффузии в газах, когда речь идет о смещениях молекул на расстояние порядка длины световой волны. Процесс нестационарного КАРС весьма чувствителен к термодинамическим параметрам среды, что позволяет использовать его для быстрого, локального и бесконтактного измерения температуры и давления газов.

В диссертации С. Ю. Никитина развита теория нестационарного КАРС в газах, учитывающая тепловое движение молекул среды. Автором диссертации поставлена и решена задача о корреляционной функции тепловой скорости молекулы газа. На основе законов классической механики показано, что в ударном приближении эта функция является экспоненциальной, а время корреляции тепловой скорости втрое превышает среднее время свободного пробега молекулы газа. На основе этого результата С. Ю. Никитин предложил новые алгоритмы измерения концентрации молекул и давления газа на основе процесса нестационарного КАРС.

Следующие главы диссертации посвящены рассеянию лазерного излучения в жидких дисперсных средах, которыми являются, в частности, суспензии клеток крови. Здесь автор развивает теорию лазерной дифрактометрии эритроцитов в сдвиговом потоке (эктацитометрии). Лазерная эктацитометрия представляет собой метод измерения одного из важных реологических параметров крови, а именно, деформируемости эритроцитов. В настоящее время этим методом умеют измерять лишь среднюю деформируемость эритроцитов в исследуемом образце крови. С. Ю. Никитин поставил и теоретически решил задачу об измерении методом лазерной эктацитометрии и других характеристик деформируемости эритроцитов, а именно, дисперсии деформируемости и асимметрии распределения эритроцитов по деформируемости.

В четвертой главе диссертации автор излагает общую теорию рассеяния света на ансамбле частиц, моделирующих клетки крови. Красные клетки крови (эритроциты), деформированные силами вязкого трения, моделируются плоскими эллиптическими дисками. В этом приближении автором диссертации получено аналитическое выражение для распределения интенсивности света в дифракционной картине, возникающей при рассеянии лазерного пучка на суспензии эритроцитов в эктацитометре.

В пятой главе диссертации вводятся статистические характеристики ансамбля эритроцитов – дисперсия деформируемости и асимметрия распределения эритроцитов по деформируемости. Для ансамбля эритроцитов с симметричной функцией распределения по деформируемости предложен алгоритм измерения дисперсии деформируемости, названный автором алгоритмом характеристической точки.

В шестой главе диссертации теоретически рассматривается рассеяние лазерного пучка на ансамбле эритроцитов с произвольной (асимметричной) функцией распределения по деформируемости. Для таких ансамблей С. Ю. Никитин предлагает два новых алгоритма обработки данных лазерной эктацитометрии. Первый из них, названный

автором алгоритмом кривизны линии изоинтенсивности, позволяет оценивать три популяционные характеристики эритроцитов: среднюю деформируемость, дисперсию деформируемости и асимметрию распределения эритроцитов по деформируемости. Второй алгоритм, названный С. Ю. Никитиным алгоритмом центра дифракционной картины, отличается от описанных выше алгоритмов тем, что обработке подлежит другая часть дифракционной картины, а именно, ее часть, расположенная ближе к центру. Достоинство этого алгоритма состоит в том, что он освобождает от необходимости точно знать уровень интенсивности рассеянного света на линии изоинтенсивности, выбранной для измерений. Проверка новых алгоритмов на экспериментальных данных показала, что они позволяют получать достоверные данные.

Обоснованность и достоверность результатов, выводов и защищаемых положений подтверждается корректным использованием современных методов и подходов к теоретическому описанию взаимодействия электромагнитного излучения с веществом. Достоверность полученных результатов подтверждается апробацией основных результатов на научных конференциях и симпозиумах, в опубликованных работах.

Научная значимость результатов заключается в получении новых фундаментальных данных о закономерностях в спектрах рассеяния лазерного излучения в газовых и в жидких дисперсных средах.

Диссертационное исследование представляет значительный *практический интерес и значимость*, в связи с тем, что разработанные в нем экспериментальные методы и подходы могут быть использованы в лазерной технике для высокоэффективного преобразования лазерного излучения, в спектральном анализе для контроля термодинамических характеристик газов, в медицинском приборостроении для диагностики крови – контроля деформируемости эритроцитов.

В то же время, на наш взгляд, диссертация не лишена некоторых недостатков. К замечаниям и вопросам по работе можно отнести следующее:

1. Несколько обособленными выглядят три основные результативные части диссертации: обратное ВКР и его использование для высокоэффективного преобразования лазерного излучения; КАРС и его использование для контроля процессов в газах; рассеяние света в жидких дисперсных средах и его применение для характеристики эритроцитов. На наш взгляд, более подробное рассмотрение любого из указанных направлений достойно отдельного диссертационного исследования.

2. В первой результативной части диссертации описывается способ высокоэффективного преобразования лазерного излучения методом обратного ВКР в водороде при повышенном давлении. Поскольку в реальных системах плотность мощности лазерного излучения накачки может достигать весьма больших значений, возникает вопрос о роли фотоионизационных процессов. В диссертации данный аспект не обсуждается (присутствует лишь косвенная связь при обсуждении возникновения оптического пробоя среды).

3. В настоящее время в лазерном приборостроении активно используются различные методы преобразования частот лазерного излучения. На наш взгляд, в диссертации недостаточно внимания уделяется сравнительному анализу предлагаемой техники преобразования частоты лазерного излучения на основе обратного ВКР в сжатом водороде по сравнению с другими методами. Преимущества должны быть описаны, особенно, учитывая, что устройства на основе ячейки со сжатым водородом представляются весьма непростыми (неудобными, опасными) в эксплуатации.

4. Во второй содержательной части диссертации обсуждается возможность использования метода нестационарного КАРС для измерения различных термодинамических параметров газообразных сред. При этом автор не обсуждает точность определения (восстановления) различных параметров в реальном эксперименте. Данный вопрос особенно актуален в свете сравнения с альтернативными методиками

дистанционного контроля температуры и давления газовых сред (напр., диодная лазерная спектроскопия нестационарного поглощения тестовой молекулы в газовой среде [Bolshov et al., Quantum Electronics, 45 (4), 377, 2015]).

5. В Главе 6, параграф 6.9 предлагается алгоритм центра дифракционной картины, подразумевающий аппроксимацию центрального максимума дифракционной картины в области максимального градиента интенсивности линейной функцией. Однако даже в простейшем случае (дифракционная функция Эйри) такое приближение представляется весьма неоднозначным и зависящим от выбранной области аппроксимации. Ситуация тем более усложняется в случае дифракции на частицах более сложной формы. В этой связи непонятно, почему для аппроксимации не использовалась модель с аппроксимацией функцией Гаусса, которая, как известно, с высокой точностью позволяет описать центральный максимум дифракционной картины.

6. Из текста остается неясным, в какой мере разработанные в диссертации алгоритмы и результаты расчетов нашли применение на практике в реальных экспериментах, удастся ли осуществлять оперативную диагностику клеток крови с оценкой параметров деформируемости эритроцитов.

Переходя к общей оценке исследования, следует отметить, что диссертационная работа С.Ю. Никитина выполнена на высоком научном уровне, а отмеченные замечания не снижают ее фундаментальной и практической значимости. Диссертация представляет собой цельное научное исследование, содержащее решение актуальных научных задач и вносит значительный вклад в теорию рассеяния лазерного излучения в газовых и в жидких дисперсных средах. Поднятые автором вопросы, несомненно, актуальны и имеют ясные практические приложения. На основе результатов, полученных автором, возможно проектирование и создание высокоэффективных компактных преобразователей лазерного излучения, основанных на явлении обратного вынужденного комбинационного рассеяния. Новые алгоритмы обработки данных нестационарного когерентного антистоксова света существенно расширяют возможности этого процесса как метода диагностики быстропротекающих процессов в газах. Статистические модели в лазерной эктацитометрии эритроцитов направлены на создание приборов для диагностики крови с новыми функциональными возможностями. Такие приборы позволят получать более детальную информацию о деформируемости клеток крови, что важно для диагностики и лечения многих заболеваний, в частности, таких широко распространенных, как острые нарушения мозгового кровообращения и сахарный диабет.

Достоверность полученных Никитиным С.Ю. результатов не вызывает сомнений. Основные результаты рассматриваемой диссертационной работы докладывались на всероссийских и международных конференциях, опубликованы в ведущих отечественных и зарубежных журналах.

Все изложенное выше дает основание утверждать, что обсуждаемая диссертационная работа отвечает требованиям, установленным «Положением о порядке присуждения ученых степеней» согласно Постановлению Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. №842, а её автор *Сергей Юрьевич Никитин* заслуживает искомой ученой степени доктора физико-математических наук по специальностям 01.04.21 – Лазерная физика и 03.01.02 – Биофизика.

Отзыв подготовил

заместитель директора по научной работе ИСАН
заведующий отделом молекулярной спектроскопии ИСАН,
доктор физ.-мат. наук, доцент


А. В. Наумов