

ОПТОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

А.Ж. Сахабутдинов

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ
Российская Федерация, 420111, г. Казань, ул. Карла Маркса, 10

Аннотация. В данной статье приведены материалы из будущей книги автора об истории света. Дан краткий экскурс в теорию и технику оптоволоконных измерений, ставятся проблемы построения измерительных систем, актуальных как в задачах контроля параметров окружающей среды, так и в задачах применения лазеров высоких энергий. Для их решения предполагается использование: принципов математического моделирования вкупе с исследованием физики процессов; разработки конструкции датчиков; трансфера оптоволоконных технологий в измерение температуры, деформации и в экологию.

Ключевые слова: интерферометр Фабри-Перо, анализ концентрации газов, парниковые газы, распространение импульсов высоких энергий, уравнение Шредингера, двулучепреломляющее волокно, математическое моделирование.

Введение

Оптоволоконная метрология берет свое начало с оптоволоконной рефлектометрии [1, 2]. Изначально оптоволоконный рефлектометр был создан для решения весьма важной и актуальной на тот момент времени задачи — измерения и контроля длины оптоволоконных линий связи. Развитие теории и техники оптических измерений позволило расширить область применения рефлектометрии до контроля мест сварки, соединений, изгибов, трещин и прочих неоднородностей в оптических волокнах. Следующим шагом развития оптоволоконной рефлектометрии стали акустооптические измерения, основанные на нелинейных эффектах [3–5]. Распределенную по длине оптического волокна информацию о физическом воздействии, получают путем анализа спектральной характеристики рассеяний, вызванных направленным в оптическое волокно импульсным сигналом. Короткий импульс взаимодействует с молекулами сердцевины оптического волокна и разного вида неоднородностями, а информацию об измеряемой величине получают, регистрируя структуру сигнала по времени его возвращения. Оптическое волокно, используемое в качестве распределенного датчика, способно заменить бесконечное множество точечных датчиков. Типичными областями применения распределенных волоконных датчиков температуры являются системы пожарного оповещения, температурный контроль в нефтяных и газовых скважинах, контроль полей температур в промышленных установках, контроль герметичности трубопроводов и больших емкостей, контроль химических процессов и многие другие области, где температура является одним из информационных параметров.

Макс фон Лауэ в 1912 году создал теорию дифракционных пятен, которая строилась на ряде предположений об интерференции волн в трёхмерном пространстве. В том же году сэр Уильям Генри Брэгг предоставил более простое объяснение этого явления, приняв во внимание отражение волн от параллельных слоёв атомов или дифракционных точек, каждая из которых является набором параллельных кристаллографических плоскостей, которые действуют как отражающие поверхности. Тогда же вместе со своим сыном он начал эксперименты над отражением рентгеновских лучей согласно своей интерпретации этого явления, и уже в начале 1913 года вышла совместная работа сэра Уильяма Генри Брэгга и его сына - Уильяма Лоренса Брэгга.

Работы отца и сына Брэггов в 1913–1914 годах заложили основу новой ветви науки — анализ кристаллической решётки при помощи рентгеновских лучей. Если, благодаря Лауэ и его коллегам, в фундаментальных исследованиях рентгеновских лучей при помощи их дифракции на кристаллах были подтверждены их волновые свойства, то использование рентгеновских лучей как инструмента для систематического исследования структуры кристаллов стало возможно благодаря Брэггу. Предположив, что атомы в кристаллах образуют семейства параллельных плоскостей, отец и сын Брэгги предложили формулу, связывающую длину волны излучения с расстоянием между параллельными плоскостями кристалла и углом, под которым наблюдается дифракционный максимум. Это же соотношение в том же году было независимо получено русским кристаллографом Георгием Викторовичем Вульфом и в отечественной научной литературе носит название уравнения Вульфа-Брэггов, в западной литературе имя Георгия Викторовича Вульфа, к сожалению, не используется. Иными словами, Георгий Викторович Вульф и независимо от него Сэр Уильям Генри Брэгг вместе со своим сыном Ульмом Лоренсом Брэггом создали основу, позволяющую математически описать и исследовать прохождение электромагнитного излучения через периодические неоднородности, которыми являлись кристаллические структуры вещества. Первая волоконная решетка Брэгга была создана и продемонстрирована Кеннетом Хиллом в 1978 году. И сформированная в оптическом волокне периодическая структура из нескольких тысяч полупрозрачных зеркал открыла великолепные перспективы в технологии оптоволоконных измерений.

1. Современное состояние

Волоконные решетки Брэгга стали основой точечных оптоволоконных измерений. Период волоконной решетки Брэгга и значение наведенного показателя преломления однозначно определяют положение центральной длины волны ее спектрального отклика. Растяжение-сжатие участка оптического волокна с решеткой Брэгга приводит к изменению ее периода, а, следовательно, и к смещению центральной длины волны. Изменение температуры также влияет на относительное удлинение решетки Брэгга и изменение наведенного показателя преломления, что также влечет за собой сдвиг центральной длины волны ее спектрального отклика. Эти эффекты положили основу измерений температуры и деформации в точках контроля с помощью волоконных решеток Брэгга. Классический метод определения центральной длины волны волоконной решетки Брэгга состоит в том, чтобы как можно подробнее получить ее спектральный отклик — зависимость амплитуды от длины волны или частоты на анализаторе спектра. После чего провести обработку этого спектра и определить положение центральной длины волны. Прибор опроса центральной длины волны волоконной решетки Брэгга называется интеррогатор. Приборы этого класса получили такое название от английского слова «interrogator», что в переводе означает «следователь», «допрашивающий» или «опросчик», глагол «interrogate» переводится как «допрашивать» или «опрашивать». И в терминологии оптоволоконных измерений название «интеррогатор» прижилось для приборов этого класса. Все интеррогаторы условно можно разделить на два типа — это приборы, основанные на классических оптико-электронных схемах, работающих в оптическом диапазоне длин волн, и радиофотонные — использующие методы и технологии перевода анализа оптического излучения в низкочастотный (чаще микроволновый) диапазон частот. Развитие теории и техники оптоволоконных измерений с помощью волоконных решеток Брэгга позволило развить методы использования волоконных решеток Брэгга с вытравленной оболочкой для контроля показателя преломления внешней среды. Поместив волоконную решетку Брэгга с вытравленной оболочкой в какую-либо среду, получают зависимость центральной длины волны отраженного от неё излучения в общем случае от показателя преломления и температуры внешней среды, что

позволяет связать величину центральной длины волны с характеристиками этой среды. Известны датчики концентрации газа на основе волоконной решетки Брэгга, оболочка которого сначала вытравлена, а потом покрыта слоем полимера толщиной около несколько сотен нанометров, которые обеспечивают высокую чувствительность. Применение комбинированного датчика температуры и показателя преломления позволяет компенсировать влияние действующего поля температуры и контролировать оптические свойства внешней среды.

Развивается теория и техника точечных волоконно-оптических измерений, основанных на открытых и закрытых резонаторах Фабри-Перо [6,7]. Резонатор Фабри-Перо представляет собой два полупрозрачных зеркала, сформированных в структуре оптического волокна или на его конце. Распространение света внутри зеркал Фабри-Перо приводит к частотной интерференции, при которой интенсивность света на резонансных частотах усиливается. Полученная резонансная картина зависит от расстояния между зеркалами и от диэлектрических и магнитных свойств вещества, помещенного между ними. На базе открытых резонаторов Фабри-Перо, сформированных на конце оптического волокна, или заполненных резонаторах на поглощающих пленках разрабатываются датчики, основанные на лазерной абсорбционной спектроскопии в среднем инфракрасном диапазоне. На конец оптического волокна наносят слой чувствительного к наличию определенного газа вещества, диэлектрическая проницаемость которого изменяется в зависимости от концентрации газа. Оптическое излучение подводится к чувствительному элементу по оптическому волокну, выходной сигнал которого определяет изменение частоты резонанса Фабри-Перо. Изменение параметров такого резонанса позволяет осуществлять измерение и контроль концентрации, например, углекислого газа в широком диапазоне.

Общей проблемой опроса массива волоконных решеток Брэгга в сенсорных системах является сложность и дороговизна приборов их опроса, обусловленная применяемыми технологиями опроса и мультиплексирования датчиков [8–12]. Волновое [8], временное [9], частотное [10], поляризационное [11] и пространственное [12] мультиплексирование требуют применения таких сложных устройств, как оптические анализаторы спектра; спектрометры с перестраиваемыми интерферометрами Фабри-Перо, с дифракционными решётками, излучение которых принимается и анализируется на ПЗС-матрицах и т.д. Сложность применяемых технологий мультиплексирования и опроса объясняется ещё и тем, что датчики не являются адресными, поэтому любое перекрытие спектров волоконных решеток Брэгга приводит к существенным ошибкам измерений [13–15]. Параллельно с развитием технологий мультиплексирования и опроса развивались и методы создания спектрально-кодированных волоконных решеток Брэгга, информация о спектральной форме которых позволяет обеспечить разделение откликов от датчиков, работающих в одном и том же частотном диапазоне [16–20]. Спектрально кодированные датчики основаны на технологии кодового мультиплексирования, опрос которых производится в режиме реального времени с помощью определения функции автокорреляции между отражённым от датчика спектром и его кодовой сигнатурой. В ряде работ продемонстрировано обнаружение и отслеживание датчиков для эффективного измерения температуры и деформации даже в условиях перекрытия спектров датчиков при использовании кодов Слепяна [21] на основе ортогональных дискретных протяжённых сфероидальных последовательностей.

Более простое решение найдено в использовании адресных волоконных брэгговских структур, т.е. таких квазипериодических структур в оптическом волокне, которые при направлении на них широкополосного лазерного излучения с равномерной амплитудно-частотной характеристикой, формируют в оптическом диапазоне двухчастотный сигнал, разность между частотами которого много меньше несущих оптических частот и находится в

радиочастотной области спектра. Разностная частота между двумя частотными составляющими называется адресной частотой. Адресная частота инвариантна к воздействию внешних физических полей и не меняется при смещении центральной частоты [22]. Адресные волоконные структуры Брэгга одновременно являются и формирователем двухчастотного излучения (за счет включения в их структуру оптических частотных составляющих, разнесенных на радиочастоту) и чувствительным элементом измерительных систем (за счет того, что разностная частота между оптическими составляющими инвариантна к контролируемым физическим полям), которые позволяют строить распределенные сенсорные системы с большим количеством датчиков без сложных оптико-электронных схем (за счет того, что набор разностных частот датчиков в массиве взаимно ортогонален).

Радиофотоника или микроволновая фотоника стала следующим этапом развития оптоволоконных технологий измерений и основана на переводе анализа излучения из оптической в микроволновую часть спектра. Основу этому направлению в казанской научной школе заложили Г.И. Ильин и О.Г. Морозов, развивавшие идеи Ю.Е. Польского [23,24,24]. Обработка результирующих сигналов в радиодиапазоне позволила не только упростить оптико-электронные схемы измерительных систем, но и значительно повысить разрешающую способность измерений. В казанской научной школе, представителями которой, являются Морозов О.Г., Ильин Г.И., Нуреев И.И., Сахабутдинов А.Ж., Кузнецов А.А., Аглиуллин Т.А. и др., получили развитие радиофотонные подходы к опросу волоконных датчиков. Исторически исследовались принципы двухчастотного и полигармонического опроса датчиков с последующей обработкой сигнала методами радиофотоники. В последние годы развитие получили адресные волоконные брэгговские структуры, которые одновременно являются и формирователями радиофотонного сигнала, и датчиками измерительной системы. Преимуществом этих методов по сравнению с другими радиофотонными методами является то, что характеристики колебаний результирующего сигнала, изменяющиеся под действием приложенных физических полей, измеряются на известной частоте. На сегодняшний день КНИТУ-КАИ владеет кадровым потенциалом разработчиков волоконно-оптических технологий, позволяющим развивать и совершенствовать теорию и технику оптоволоконных измерительных систем.

2. Перспективы развития

2.1. Экологический мониторинг

Изменение климата стало одной из самых важных проблем, стоящих перед странами на территории всего земного шара в последние годы. Директивой Евросоюза «2003/87» установлены критерии определения лимитов и распределения квот выбросов парниковых газов, в целях осуществления Киотского протокола. Объемы выбросов CO₂ к 2030 году должны быть сокращены на 55 % от выбросов 1999 года. К 2022 году планируется введение углеродного налога на импорт продукции, получение которой сопряжено с выбросами парниковых газов. Разрабатываются международные, национальные региональные, и локальные способы ограничения содержания парниковых газов в атмосфере Земли, в основе которых лежит их количественное определение, мониторинг и верификация выбросов парниковых газов [25–27].

В Российской Федерации принят ряд правовых документов, предназначенных для снижения климатических рисков. Среди них: распоряжение Президента Российской Федерации от 17.12.2009 № 861-рп «О Климатической доктрине Российской Федерации», которая является основой формирования и реализации политики в области климата [28]; Указ Президента Российской Федерации от 30.09.2013 № 752 «О сокращении выбросов парниковых газов» [29]; приняты постановления и распоряжения Правительства Российской Федерации, регламентирующие порядок формирования системы мониторинга, отчетности и

проверки объема выбросов парниковых газов в Российской Федерации; Президентом Российской Федерации 02.07.21 года подписан федеральный закон Российской Федерации «Об ограничении выбросов парниковых газов» [30]; национальный стандарт Российской Федерации ГОСТ-Р ИСО 14064-1-2007, определяет требования по количественному определению парниковых газов [31]; национальный стандарт РФ ГОСТ-Р 56276 — 2014/ISO/TS 14067:2013 «Газы парниковые. Углеродный след продукции. Требования и руководящие указания по количественному определению и предоставлению информации» [32] соответствует международному стандарту ISO/TS 14067:2013 «Greenhouse gases — Carbon footprint of products — Requirements and guidelines for quantification and communication» [33], который ставит своей целью установить конкретные требования при количественном определении и предоставлении информации по углеродному следу продукции; утвержден Указ Президента Российской Федерации от 02.07.2021г. № 400 «О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации» [34]. В числе стратегических национальных приоритетов указано достижение целей обеспечения экологической безопасности и рационального природопользования. Одной из задач данного направления является формирование системы государственного регулирования выбросов парниковых газов, первым этапом которой является внедрение автоматических средств измерений концентраций парниковых газов.

Очень важно определить методы и технологии анализа концентрации парниковых газов. В реестре автоматических средств измерений и учета выбросов, которые применяются для контроля выбросов парниковых газов, оптические методы анализа представлены крайне ограниченно. По сравнению с другими аналитическими методами определения, оптические методы обладают рядом преимуществ. Оптические измерения не являются разрушающими или агрессивными. Контроль производится на любом расстоянии — от нескольких миллиметров до нескольких сот километров. Существует возможность контроля жидких, твердых или газообразных сред. По ширине охватываемого диапазона концентраций оптические методы перекрывают все другие инструментальные методы. Волоконно-оптические датчики точечного или распределенного типа позволяют осуществлять контроль и измерение концентрации парниковых газов в зоне их выбросов. Оптоволоконные датчики могут быть объединены в сеть произвольной топологии и конфигурации. Точечные волоконно-оптические датчики хорошо известны своими преимуществами, такими как компактный размер, низкая стоимость, высокая чувствительность и возможность мультиплексирования.

Оптический резонатор Фабри-Перо является классическим чувствительным элементом датчиков концентрации. Оптоволоконный резонатор Фабри-Перо с открытым резонатором изготавливают путем сращивания капиллярных трубок или фотонно-кристаллического волокна с одномодовым волокном [35,36]. Конструкция открытого резонатора позволяет газу свободно войти и выйти в область резонатора, чтобы изменить коэффициент преломления среды. Тем не менее, открытые резонаторы Фабри-Перо не в состоянии идентифицировать конкретный газ, в том числе CO_2 . Кроме того, изменение концентрации газа слишком мало, чтобы заметно изменить коэффициент преломления, но достаточно для того, чтобы его обнаружить. Таким образом, ключевым моментом создания резонатора Фабри-Перо для обнаружения CO_2 является поиск или создание материала, показатель преломления которого заметно чувствителен к концентрации CO_2 [37].

Прозрачные функциональные материалы, чувствительные к CO_2 , могут быть использованы в качестве материала полости резонатора Фабри-Перо. Материал чувствительного слоя должен взаимодействовать с CO_2 и изменять показатель преломления. Тем не менее, известны датчики с использованием функционального материала, как правило, на основе волоконно-оптического рефрактометра, который работает на основе затухания света и коэффициент затухания определяется самим материалом чувствительного слоя. В [38] предложен датчик, основанный на волоконной брэгговской решетке с длинным периодом

покрытой фенолом, который чувствителен к CO_2 . Там же показано, что контроль концентрации CO_2 осуществим в диапазоне от 10 до 90 %. В [39] сообщается о датчике концентрации CO_2 на основе волоконной брэгговской решетки с длинным периодом, покрытой слоем полистирола 365 нм и полученной чувствительности 1.23 пм/%. В [40] предложен кремниевый фотонный рефрактометрический датчик CO_2 , в котором используется микрокольцевой резонатор ($d = 20$ мкм), покрытый гуанидиновым полимером слоем в 240 нм, а чувствительность датчика составляет 0.0354 нм/%. Таким образом, разработка датчиков такого типа отличается простотой, использованием недорогих поглощающих материалов, долговечностью, легкостью в обслуживании.

Аналогичные разработки для контроля оксидов азота (NO_x), в которых используются оптические и электрические свойства полупроводниковых структур на основе молекулярных комплексов фталоцианинов, содержащих ионы лантанидов в качестве комплексобразователя, хорошо изучены и распространены в России. Для контроля кислорода (O_x) используются золотые пленки. Для контроля метана (CH_4) более пригодны лидарные методы, но существуют и сенсоры на базе резонатора Фабри-Перо, хотя волоконно-оптические компоненты в среднем инфракрасном диапазоне, такие как источник света, фотодетектор и даже само оптическое волокно для этой цели пока достаточно дороги.

Таким образом, актуальной задачей является разработка и создание оптоволоконных датчиков, основанных на резонаторах Фабри-Перо. Важная составляющая разработок – создание математических моделей цифрового двойника, позволяющего исследовать физику явления и дать рекомендации к диапазону выбора требуемых величин и диапазону изменения коэффициента преломления чувствительного вещества. Коэффициент преломления в свою очередь зависит от диэлектрической и магнитной проницаемости, рекомендации к выбору которых, могут быть получены исходя из исследования математической модели.

2.2. Распространение импульсов высоких энергий в оптическом волокне

Сегодня фемтосекундные лазеры прочно заняли свое место в промышленном производстве материалов и изделий различного назначения [41–44]. Следует отметить, что уже в начале их практического применения возникла проблема доставки оптических импульсов с требуемыми параметрами к месту приложения. Для передачи ультракоротких импульсов большой энергии разрабатываются специальные, как правило, полые и микроструктурированные оптические волокна [45–47]. При этом, особое внимание уделяется волокнам с сохранением поляризации. Вместе с тем, широкое применение фемтосекундных лазеров требует использования волокон более простой и дешевой конструкции. Уменьшение длительности позволяет передавать по оптическим волокнам из кварцевого стекла импульсы с достаточно большой пиковой мощностью, не превышая при этом порога энергии, при котором имеет место повреждение стекла [48]. Это дает возможность использовать их для передачи ультракоротких импульсов. В результате, относительно дешевые кварцевые одномодовые и многомодовые оптические волокна также заняли свою нишу в области промышленного применения фемтосекундных лазеров [49–53]. При этом, как уже было отмечено ранее, для этих целей особый интерес представляют двулучепреломляющие оптические волокна.

Разработка и создание методов и средств доставки фемтосекундных импульсов требует развития методов моделирования процессов распространения ультракоротких импульсов в оптическом волокне. Для описания эволюции таких импульсов широко применяется модификация нелинейного уравнения Шредингера, отличающаяся от традиционной формы записи дополнительными членами, учитывающими хроматическую дисперсию высших порядков и рассеяние Рамана. Таха Т.Р. и Абловиц М.И. в 1984 г. [54] провели сравнительный анализ известных в настоящее время численных методов решения нелинейного уравнения

Шредингера. В своем фундаментальном обзоре они рассмотрели множество различных алгоритмов, в частности, численных, для решения нелинейного уравнения Шредингера. После публикации их работы основным методом численного решения задач оптики стал метод решения путем разбиения на физические процессы с использованием быстрого преобразования Фурье (split-step Fourier method). Было отмечено, что метод расщепления по физическим процессам значительно превосходит методы конечных разностей по точности, поскольку вторая производная по времени в нем вычисляется с использованием дискретного преобразования Фурье, которое обеспечивает экспоненциальную скорость сходимости по переменной времени. В настоящее время Фурье-метод расщепления по физическим процессам используется как стандартный в большинстве пакетов программ. Этот метод имеет хорошую точность, но с алгоритмической сложностью на временном слое. По этой причине продолжается поиск альтернативных решений, среди прочих и численными методами, для которых из-за возможности распараллеливания, время выполнения программы при большом числе точек *по времени* может быть ниже, чем у Фурье-метода расщепления по физическим процессам.

В цикле работ представлен эксперимент по передаче импульса длительностью 12 фс пиковой мощностью 175 кВт по одномодовому двулучепреломляющему оптическому волокну и приведено сравнение экспериментальных данных отклика на выходе оптического волокна и результатов вычислений, полученных, в том числе, методом конечных разностей во временной области (FDTD – Finite Difference Time Domain) [55–57]. При этом, используемая для вычислений модель не учитывала двулучепреломление. В целом полученные экспериментальные и теоретические оценки длительности импульса и ширины спектра отклика достаточно хорошо согласуются. Вместе с тем, форма импульсного отклика на выходе оптического волокна, полученная в результате вычислений, существенно отличается от экспериментальной кривой. Впоследствии, в работах [58–60], было показано, что основная причина такого расхождения связана именно с тем, что не учитывали двулучепреломление. Это подтвердило выводы о необходимости учитывать двулучепреломление для оптических волокон с сохранением поляризации, даже при их относительно малой длине. В этом случае процессы распространения оптического импульса описываются уже системой двух связанных нелинейных уравнений Шредингера. Для двулучепреломляющего оптического волокна - это система уравнений Манакова [61].

Проблемам решения системы связанных нелинейных уравнений Шредингера посвящено достаточно много работ. Вероятно, первыми, кто применил численные методы для решения нелинейного уравнения Шредингера были Хардин Р. и Тапперт Ф. в 1973 г. [62], а также Лейк Б. и соавторы в 1977 г. [63]. К настоящему времени известно достаточно много численных методов решения системы связанных нелинейных уравнений Шредингера. Это конечно-разностные схемы, спектральные методы, метод Петрова-Галеркина, и различные варианты метода расщепления по физическим процессам.

Как известно, для импульсов с длительностью менее 10 пс необходимо учитывать хроматическую дисперсию третьего порядка и эффект рассеяния Рамана. Это, как уже было отмечено выше, приводит к необходимости включения в уравнения системы связанных нелинейных уравнений Шредингера дополнительных членов. Принципиальное отличие и основная проблема здесь заключается в том, что дополнительные члены, описывающие нелинейные процессы, включают производные от комплексной огибающей и зависящих от нее функций от времени. При решении системы методом расщепления по физическим процессам это приводит к необходимости либо увеличивать число операций быстрого преобразования Фурье на каждом шаге, либо на каждом шаге решать дополнительную систему дифференциальных уравнений [64]. В отличие от [64], где предлагаются варианты метода расщепления по физическим процессам, в [65] используется метод проекционного оператора (the projection operator method).

Перспективным направлением является разработка оригинальных методов численного интегрирования связанной нелинейной системы уравнений Шредингера, записанной с хроматической дисперсией третьего порядка и комбинационным рассеянием. Запись системы уравнений в конечно-разностных отношениях с разделением на линейные и нелинейные члены, когда линейные члены записываются в неявной схеме, а нелинейные — в явной конечно-разностной схеме, позволяет разделить систему уравнений Шредингера на две независимые системы линейных уравнений для каждой моды на каждом шаге процесса численного интегрирования. Необходима разработка алгоритма уточнения численного решения на каждом шаге, устраняющего ошибки, связанные с записью нелинейных слагаемых в явном виде. Перспективными преимуществами метода являются: его абсолютная устойчивость за счет использования неявной конечно-разностной схемы интегрирования и интегрированного механизма уточнения численного решения на каждом шаге; интеграция с автоматическим выбором шага; прирост производительности (или разрешение) до трех или более порядков из-за того, что нет необходимости производить прямые и обратные преобразования Фурье на каждом этапе интегрирования, как это требуется в методе расщепления в соответствии с физическими процессами. Обобщение решения для произвольного числа уравнений, описывающих распространение ультракоротких оптических импульсов в маломодовых, многомодовых и многосердцевинных оптических волокнах существенным образом расширит область применения сверхкоротких импульсов высоких энергий.

3. Заключение

Предложенные направления исследований позволят не только расширить круг решаемых задач при помощи волоконно-оптических измерений, но и обогатят теорию и технику таких измерений и послужат дальнейшему развитию науки в КНИТУ-КАИ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Айбатов, Д.Л., Морозов О.Г., Польский Ю.Е.* Основы рефлектометрии: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 071700 (210401) - Физика и техника оптической связи. 2-е изд., перераб. и доп. Казань: Новое знание, 2008. - 111 с.
2. *Бурдин, В.А., Дашков, М.В., Дмитриев, Е.В.* Мониторинг оптических волокон кабельных линий методами поляризационной рефлектометрии // Т-Comm: Телекоммуникации и Транспорт. Россия, Москва: Общество с ограниченной ответственностью Издательский дом Медиа публицер, 2013. - № 8. - Pp. 30–32.
3. *Loayssa, A. et al.* Characterization of stimulated Brillouin scattering spectra by use of optical single-sideband modulation // Opt. Lett. Optical Society of America, 2004. -Vol. 29, № 6. Pp. 638–640.
4. *Morozov, O.G. et al.* Poly-harmonic Analysis of Raman and Mandelstam-Brillouin Scatterings and Bragg Reflection Spectra // Adv. Opt. Fiber Technol. Fundam. Opt. Phenom. Appl. 2015.
5. *Schena, E. et al.* Fiber Optic Sensors for Temperature Monitoring during Thermal Treatments: An Overview// Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2016. - Vol. 16, № 7.- Pp. 1144.
6. *Jáuregui-Vázquez, D. et al.* An All Fiber Intrinsic Fabry-Perot Interferometer Based on an Air-Microcavity // Sensors.- 2013. - Vol. 13, № 5. - Pp. 6355–6364.
7. *Islam, Md. et al.* Chronology of Fabry-Perot Interferometer Fiber-Optic Sensors and Their Applications: A Review // Sensors. - 2014. - Vol. 14, № 4. - Pp. 7451–7488.
8. *Measures, R.M.* Wavelength demodulated Bragg grating fiber optic sensing systems for addressing smart structure critical issues/ R.M. Measures, S.Melle, K. Liu // Smart Mater. Struct. IOP Publishing, 1992.- Vol. 1, № 1. - Pp. 36–44.

9. *Davis, M.A.* Structural strain mapping using a wavelength/time division addressed fiber Bragg grating array / *M.A.Davis, D.G.Bellemore, A.D. Kersey* // *Proc SPIE*, 1994.- Vol. 2361. - Pp. 342–345.
10. *Matveenko, V. p. et al.* Measurement of strains by optical fiber Bragg grating sensors embedded into polymer composite material // *Struct. Control Health Monit.* 2018. - Vol. 25, № 3.- Pp. e2118.
11. *Qiao, X. et al.* Fiber Bragg Grating Sensors for the Oil Industry // *Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2017. - Vol. 17, № 3. - Pp. 429.
12. *Ma, Z., Chen, X.* Fiber Bragg Gratings Sensors for Aircraft Wing Shape Measurement: Recent Applications and Technical Analysis // *Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2019.- Vol. 19, № 1.- Pp. 55.
13. *Karim, F.* Full Matlab code for synthesis and optimization of Bragg gratings. Cambridge Scholars Publishing, 2018.
14. *Cormier G., Boudreau R., Thériault S.* Real-coded genetic algorithm for Bragg grating parameter synthesis // *JOSA B. Optical Society of America*, 2001.- Vol. 18, № 12.- Pp. 1771–1776.
15. *Li K.* Review of the strain modulation methods used in fiber Bragg grating sensors // *J. Sens. Hindawi*, 2016.- Vol. 2016.
16. *Koo K.P. et al.* Fiber-chirped grating Fabry-Perot sensor with multiple-wavelength-addressable free-spectral ranges // *IEEE Photonics Technol. Lett. IEEE*, 1998. -Vol. 10, № 7. - Pp. 1006–1008.
17. *Wei, Z., Ghafouri-Shiraz H., Shalaby H.M.H.* New code families for fiber-Bragg-grating-based spectral-amplitude-coding optical CDMA systems // *IEEE Photonics Technol. Lett. IEEE*, 2001. -Vol. 13, № 8.- Pp. 890–892.
18. *Dai, B. et al.* Performance comparison of $0/\pi$ -and $\pi/2$ -phase-shifted superstructured Fiber Bragg grating en/decoder // *Opt. Express. Optical Society of America*, 2011.- Vol. 19, № 13. - Pp. 12248–12260.
19. *Triana, A., Pastor, D., Varón, M.* A code division design strategy for multiplexing fiber Bragg grating sensing networks // *Sensors. Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2017. -Vol. 17. - № 11. - Pp. 2508.
20. *Triana, A., Pastor, D.* Interrogation of super-structured FBG sensors based on discrete prolate spheroidal sequences // *Optical Sensors 2017. International Society for Optics and Photonics*, 2017.-Vol. 10231. -Pp. 70–76.
21. *Slepian, D.* Prolate Spheroidal Wave Functions, Fourier Analysis, and Uncertainty—V: The Discrete Case // *Bell Syst. Tech. J.* 1978. -Vol. 57, № 5.- Pp. 1371–1430.
22. *Sahabutdinov, A.Z.* Address fiber Bragg structures based on two identical upper-band gratings // *Eng. J. Don.* -2018. - Vol. 3.
23. *Ильин, Г.И., Морозов, О.Г.* СПОСОБ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ОДНОЧАСТОТНОГО КОГЕРЕНТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ДВУХЧАСТОТНОЕ: патент SU (11) 1 338 647 (13) A1 USA. 2004.
24. *Ильин, Г.И., Морозов, О.Г., Польский, Ю.Е.* ДВУХЧАСТОТНЫЙ ЛАЗЕРНЫЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬ: патент SU (11) 1 477 130 (13) A1 USA. 2004.
25. *Андрусевич А. и др.* Климатическая политика и гражданское общество: Будущее стран Восточного партнёрства в контексте Европейского зелёного курса. Аналитический документ. - 2020. - 60 с.
26. *Пахомова, Н.В. и др.* Трансформация глобальных экологических рисков в экономические риски российских предприятий и управление их минимизацией // *Проблемы Современной Экономики.* 2021. - Т. 1, № 77.- С. 159–166.

27. *Ермакова, Е.П.* О проекте общеевропейского закона о климате и проблемах нормативного регулирования “зеленого” финансирования в Европейском Союзе // Государство И Право. - 2020. - № 5. - С. 96–107.
28. *Малинин, В.Н.* Градостроительное планирование Санкт-Петербурга в условиях современных изменений климата/ В.Н. Малинин, Г.В. Менжулин, А.А. Павловский // Ученые записки российского государственного гидрометеорологического университета - 2016.- № 43.- С. 140–147.
29. *Путин, В.В.* О сокращении выбросов парниковых газов: 752 // Указ Президента РФ. 2013.
30. *Путин, В.В.* Об ограничении выбросов парниковых газов // Федеральный закон РФ. 2021.
31. ГОСТ Р ИСО 14064-1-2007 // Национальный стандарт Российской Федерации.
32. ГОСТ Р 56276—2014/ISO/TS 14067:2013 «Газы парниковые. Углеродный след продукции // Национальный стандарт РФ.
33. ISO/TS 14067:2013 Greenhouse gases // Carbon footprint of products.
34. *Путин, В.В.* О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации: 400 // Указ Президента РФ. 2021.
35. *Wang, R., Qiao, X.* Hybrid optical fiber Fabry–Perot interferometer for simultaneous measurement of gas refractive index and temperature // Appl. Opt. Optical Society of America, 2014.- Vol. 53, № 32. - Pp. 7724–7728.
36. *Wang, R., Qiao, X.* Gas Refractometer Based on Optical Fiber Extrinsic Fabry—Perot Interferometer With Open Cavity // IEEE Photonics Technol. Lett. 2015. -Vol. 27, № 3.- Pp. 245–248.
37. *Ma W. et al.* CO₂ Gas Sensing Using Optical Fiber Fabry–Perot Interferometer Based on Polyethyleneimine/Poly(Vinyl Alcohol) Coating // IEEE Photonics J. 2017. - Vol. 9, № 3. - Pp. 1–8.
38. *Gouveia, C. et al.* Measurement of CO₂ using refractometric fiber optic sensors // Proc. 3rd WSEAS Int. Conf. Adv. -Sensors. - 2010. -Pp. 169–173.
39. *Melo, L. et al.* Highly sensitive coated long period grating sensor for CO₂ detection at atmospheric pressure // Sens. Actuators B Chem. - 2014.- Vol. 202.- Pp. 294–300.
40. *Mi G. et al.* Silicon microring refractometric sensor for atmospheric CO₂ gas monitoring // Opt. Express. Optical Society of America, 2016. -Vol. 24, № 2. - Pp. 1773–1780.
41. *Samad, R. et al.* Ultrashort Laser Pulses Applications // Coherence and Ultrashort Pulse Laser Emission. IntechOpen, 2010. - Pp. 663–688.
42. *Sugioka K., Cheng Y.* Ultrafast lasers—reliable tools for advanced materials processing // Light Sci. Appl. Nature Publishing Group, 2014.- Vol. 3, № 4. -Pp. e149–e149.
43. *Sugioka, K.* Progress in ultrafast laser processing and future prospects // Nanophotonics. De Gruyter, 2017. -Vol. 6, № 2. - Pp. 393–413.
44. *Hodgson N. et al.* Industrial femtosecond lasers and material processing [Electronic resource] // Industrial Laser Solutions. - 2019. - URL: <https://www.industrial-lasers.com/home/article/16489137/industrial-femtosecond-lasers-and-material-processing> (accessed: 22.04.2021).
45. *Göbel, W., Nimmerjahn, A., Helmchen, F.* Distortion-free delivery of nanojoule femtosecond pulses from a Ti:sapphire laser through a hollow-core photonic crystal fiber // Opt. Lett. 2004.- Vol. 29, № 11. - P. 1285.
46. *Michieletto M. et al.* Hollow-core fibers for high power pulse delivery // Opt. Express. - 2016.- Vol. 24, № 7. - P. 7103.
47. *Yu X. et al.* Optical Fibers for High-Power Lasers // Handbook of Optical Fibers / ed. Peng G.-D. Singapore: Springer Singapore, 2018. - Pp. 1–18.

48. *Poumellec B. et al.* Modification thresholds in femtosecond laser processing of pure silica: review of dependencies on laser parameters [Invited] // *Opt. Mater. Express. Optical Society of America*, 2011. - Vol. 1, № 4. - Pp. 766–782.
49. *Kim, D. et al.* Ultrafast optical pulse delivery with fibers for nonlinear microscopy // *Microsc. Res. Tech.* 2008.- Vol. 71, № 12. - Pp. 887–896.
50. *Larson, A.M., Yeh, A.T.* Delivery of sub-10-fs pulses for nonlinear optical microscopy by polarization-maintaining single mode optical fiber // *Opt. Express.* 2008. - Vol. 16, № 19. - P. 14723.
51. *Le, T. et al.* Routes to fiber delivery of ultra-short laser pulses in the 25 fs regime // *Opt. Express. Optical Society of America*, 2009. - Vol. 17, № 3. - Pp. 1240–1247.
52. *Zhou, S. et al.* All polarization-maintaining fiber chirped-pulse amplification system for microjoule femtosecond pulses / ed. Gapontsev D.V. et al. San Jose, CA, 2009. - P. 719516.
53. *Eichhorn, F. et al.* Optical fiber link for transmission of 1-nJ femtosecond laser pulses at 1550 nm // *Opt. Express.* 2010. - Vol. 18, № 7. - Pp. 6978.
54. *Taha, T.R., Ablowitz, M.I.* Analytical and numerical aspects of certain nonlinear evolution equations. II. Numerical, nonlinear Schrödinger equation // *J. Comput. Phys.* - 1984. - Vol. 55, № 2. - Pp. 203–230.
55. *Karasawa, N. et al.* Comparison between theory and experiment of nonlinear propagation for a-few-cycle and ultrabroadband optical pulses in a fused-silica fiber // *IEEE J. Quantum Electron.* - 2001. - Vol. 37, № 3. - Pp. 398–404.
56. *Karasawa, N. et al.* Comparison between theory and experiment of nonlinear propagation for 4.5-cycle optical pulses in a fused-silica fiber // *Nonlinear Opt.* - 2000. - Vol. 24. - Pp. 133–138.
57. *Nakamura S. et al.* Measurements of Third-Order Dispersion Effects for Generation of High-Repetition-Rate, Sub-Three-Cycle Transform-Limited Pulses from a Glass Fiber: Part 1, No. 3A // *Jpn. J. Appl. Phys.* IOP Publishing, 2002. - Vol. 41, № Part 1, No. 3A. - Pp. 1369–1373.
58. *Buridin, V.* Simulation results of optical pulse non-linear few-mode propagation over optical fiber // *Appl. Photonics.* - 2016. - № 3. - Pp. 309–320.
59. *Buridin, V.A., Bourdine, A.V.* Model for a few-mode nonlinear propagation of optical pulse in multimode optical fiber // *Proceedings OWTNM. Warsaw, Poland, 2016.* - Pp. 20–21.
60. *Buridin, V.A., Bourdine, A.V.* Simulation of an ultrashort optical pulse propagation in a polarization-maintaining optical fiber: 1–2 // *Appl. Photonics.* 2019. - Vol. 6, № 1–2. - Pp. 93–108.
61. *Marcuse, D., Manyuk, C.R., Wai, P.K.A.* Application of the Manakov-PMD equation to studies of signal propagation in optical fibers with randomly varying birefringence // *J. Light. Technol.* 1997. - Vol. 15, № 9. - Pp. 1735–1746.
62. *Hardin, R.H.* Applications of the split-step Fourier method to the numerical solution of nonlinear and variable coefficient wave equations // *SIAM Rev. Chron.* 1973. - Vol. 15.
63. *Lake, B.M. et al.* Nonlinear deep-water waves: theory and experiment. Part 2. Evolution of a continuous wave train: 1 // *J. Fluid Mech. Cambridge University Press*, 1977. - Vol. 83, № 1.- Pp. 49–74.
64. *Deiterding, R. et al.* A Reliable Split-Step Fourier Method for the Propagation Equation of Ultra-Fast Pulses in Single-Mode Optical Fibers: 12 // *J. Light. Technol. IEEE*, 2013. - Vol. 31, № 12. - Pp. 2008–2017.
65. *Kalithasan, B. et al.* Ultra-short pulse propagation in birefringent fibers: the projection operator method // *J. Opt. Pure Appl. Opt. IOP Publishing Ltd.*, 2008. - Vol. 10, № 8.- P. 085102.

OPTICAL FIBER MEASUREMENT SYSTEMS. CURRENT STATE AND DEVELOPMENT PROSPECTS

A.Zh. Sakhabutdinov

Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI
10, Karl Marx St., Kazan, 420111, Russian Federation

Abstract. This article contains materials from the author's future book on the history of light. A brief excursion into the theory and technique of fiber-optic measurements is given, the problems of constructing measuring systems are raised, which are relevant both in the problems of monitoring the parameters of the environment and in the problems of using high-energy lasers. To solve them, it is supposed to use: the principles of mathematical modeling, coupled with the study of the physics of processes; development of sensor design; transfer of fiber optic technologies to temperature measurement, deformation and ecology.

Keywords: Fabry-Perot interferometer, gas concentration analysis, greenhouse gases, high-energy pulse propagation, Schrödinger equation, birefringent fiber, mathematical modeling.

Статья поступила в редакцию 15.12.2021