

Институт физики микроструктур РАН — филиал Федерального государственного
бюджетного научного учреждения «Федеральный исследовательский центр
Институт прикладной физики Российской академии наук»

На правах рукописи

СЕМИКОВ ДАНИИЛ АЛЕКСАНДРОВИЧ

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах подготовленной научно - квалификационной
работы (диссертации)

Развитие методов оптической диагностики и волоконно-оптических сенсорных систем

по основной образовательной программе подготовки научно-
педагогических кадров в аспирантуре

Специальность 1.3.2 – Приборы и методы экспериментальной физики

Научный руководитель:

Зав. лаб. прецизионной оптической диагностики отдела технологии
наноструктур и приборов ИФМ РАН, к.ф.-м.н.,
Волков Пётр Витальевич

Рецензент:

н.с. отдела многослойной рентгеновской оптики ИФМ РАН, к.ф.-м.н.,
Малышев Илья Вячеславович

Нижний Новгород, 2022

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности

В настоящее время волоконно-оптические системы сбора данных стали неотъемлемой частью информационных технологий. Высокий интерес к волоконным датчикам проявляется в выпуске множества монографий [1,2,3,4], обзоров [5,6,7]. Бурное развитие волоконных систем связи стимулировало активную разработку волоконно-оптической компонентной базы и способствовало снижению ее стоимости [8,9]. В свою очередь это стало дополнительным стимулом к развитию и созданию новых приборов, измерительных систем и расширению возможности измерительной техники [10]. Обладая такими уникальными характеристиками, как малые габариты, нечувствительность к электромагнитным помехам, устойчивость к экстремальным условиям окружающей среды, взрыво- и пожаробезопасность, малые затухания сигнала в оптическом волокне, волоконные технологии находят широкое применение в различных областях хозяйственной деятельности. Волоконно-оптические датчики, объединённые в единую систему сбора данных, используются для сбора информации о состоянии крупных объектов [11]: промышленных зданий, мостов, шахт, скважин и других объектов. Это позволяет организовать непрерывную систему мониторинга состояния потенциально опасного объекта для предотвращения аварийных ситуаций, разрушений и избежать, таким образом, негативных последствий его эксплуатации [12]. В последнее время благодаря малым габаритам и возможности встраивания сенсоров в композитные материалы волоконно-оптические системы сбора данных находят применение в аэрокосмической области [13]. Своевременная регистрация значений параметров, превышающих эксплуатационные, позволяет определить факт и место возможного повреждения для его своевременного устранения. Особый интерес представляет создание миниатюрных технологичных сенсоров с использованием хорошо отработанных в микроэлектронике полупроводниковых технологий, обладающих высокой точностью, масштабируемостью и позволяющих гибко изменять геометрию и характеристики изделия. Отсюда значительный интерес обращённый в частности к MOEMS и MOMS-сенсорам. Вместе с тем полупроводниковые материалы обладают высокой теплопроводностью и чувствительностью к температуре в оптических измерениях, что позволят создать миниатюрные, но чувствительные сенсоры с малым временем отклика. Полупроводниковые технологии открывают широкие возможности создания сенсоров различных физических величин.

Важной областью применения волоконно-оптических систем регистрации является мониторинг технологических процессов бесконтактными методами [14], когда контактные методы неприменимы или вносят существенные ошибки. Установка сенсора может быть невозможной на измеряемый объект в результате влияния на технологические процессы или экстремальных условий измерения. Бесконтактные измерения не загрязняют и не повреждают поверхность объекта. Волоконные системы регистрации позволяют с высокой точностью контролировать ростовые процессы для получения высококачественных структур, проводить температурные измерения.

Волоконно-оптическая система регистрации состоит из сенсорной части, в которой внешнее воздействие приводит к изменению параметров света и регистрирующей части, в которой происходит детектирование соответствующих изменений параметров света.

Независимо от измеряемой физической величины все измерительные системы можно разделить на четыре категории по принципу работы: амплитудные, частотные, поляризационные и фазовые (интерференционные). Наибольший интерес представляют интерференционные методы построения систем регистрации, поскольку они обеспечивают высокую чувствительность и стабильность. В данных системах чувствительный элемент преобразует изменение измеряемой физической величины в изменение фазы электромагнитной волны, которая регистрируется интерференционными методами. Создаются сенсоры совершенно разнообразных физических величин: температуры, деформации, показателя преломления, вибрации, ускорения, электрического и магнитного поля, давления, тока и т.д. [6].

Системы регистрации, основанные на тандемной низкокогерентной интерферометрии, являются очень перспективными с точки зрения практического применения. Тандемная низкокогерентная интерферометрия позволяет осуществлять как относительные, так и абсолютные измерения, что крайне важно для ряда задач. К преимуществам следует отнести возможность мультиплексирования, измерения удаленных объектов, нечувствительность к паразитным отражениям в оптической линии, простота внесения фазовой модуляции в интерференционный сигнал.

Таким образом, разработка волоконно-оптических систем регистрации различных физических величин на базе тандемной низкокогерентной интерферометрии, и разработка сенсоров являются весьма актуальными задачами.

Цели и задачи

Целью данной работы является развитие методов оптической диагностики, создание оригинальных волоконно-оптических систем регистрации и волоконно-оптических сенсоров.

Задачи диссертационной работы

Для достижения поставленной цели в рамках данной работы были поставлены следующие задачи:

1. Теоретическая и экспериментальная разработка методов повышения точности измерительной системы на базе тандемной низкокогерентной интерферометрии.
2. Теоретическая и экспериментальная разработка методов построения измерительных систем опроса сенсоров и контроля технологических процессов
3. Теоретическая и экспериментальная разработка конструкций волоконно-оптических сенсоров.
4. Проведение измерений и создание систем мониторинга с использованием систем регистрации, предложенных в данной работе.

Научная новизна работы

Основные результаты, полученные в работе, обладают научной новизной:

1. Разработан новый метод регистрации малых изменений толщины оптического зазора (датчика, пластины) в полосе частот 1 – 200 кГц с разрешением менее 1 нм на базе следящего тандемного низкокогерентного интерферометра.
2. Впервые продемонстрирована возможность использования методов обращения времени для локации ударного воздействия с помощью волоконно-оптических датчиков.
3. Разработан новый метод регистрации изменений толщины волоконно-оптического сенсора в широком динамическом диапазоне (от 0.5 нм до 2 мкм) в полосе частот 20 кГц с использованием тандемного низкокогерентного интерферометра и метода гомодинной демодуляции.
4. Впервые продемонстрирована возможность непосредственного измерения профиля толщины алмазных плёнок с шероховатостью 2-4 мкм на проводящей подложке.

Практическая значимость работы:

Результаты научно-квалификационной работы имеют практическую ценность.

1. Разработан и экспериментально продемонстрирован двухстадийный метод стабилизации скорости модулятора интерферометра, позволяющий повысить точность интерференционных измерений до субнанометровых величин.
2. Разработана технология изготовления миниатюрных волоконно-оптических сенсоров температуры на базе кремниевого микрорезонатора Фабри-Перо длиной 350 мкм и диаметром 120 мкм. Использование кремния в качестве материала чувствительного элемента позволило обеспечить технологичность изготовления сенсора, высокую чувствительность к температуре и малое время отклика
3. Разработана технология изготовления датчиков давления мембранного типа со сварным креплением тонкой (0.5-1 мкм) металлической мембраны к стеклянному капилляру диаметром 250 – 400 мкм. Разработанная технология позволила получить надежное бесклеевое соединение мембраны с капилляром, устойчивое к нагревам.
4. Разработана технология изготовления микрооптомеханических чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков. Для изготовления использовалась оригинальная модифицированная LIGO технология, позволяющая получить подвешенную мембрану практически произвольной геометрии. Продемонстрирована возможность создания системы калибровки на их основе.
5. Продемонстрирована возможность контроля ростовых процессов CVD-алмаза на непрозрачных поверхностях алмаза бесконтактными интерференционными методами.

Методология и методы исследования

Проверка предложенных в работе волоконно-оптических измерительных систем и волоконно-оптических сенсоров осуществлялась путем проведения численных и натуральных экспериментов.

Положения, выносимые на защиту

1. Двухстадийная аналоговая и цифровая компенсация гистерезиса и нелинейности модулятора интерферометра по интерференционному сигналу от вспомогательного высококогерентного источника позволяет стабилизировать частоту заполнения интерференционного сигнала с точностью лучше 1%, что позволяет получать субнанометровое разрешение при измерении толщины прозрачных объектов в тандемной низкокогерентной интерферометрии.

2. Применение дополнительной вспомогательной модуляции с малой по сравнению с длиной волны амплитудой в опорном интерферометре тандемной низкокогерентной схемы позволяет, за счёт цепи обратной связи и анализа амплитуд гармоник компенсировать медленные дрейфы волоконно-оптического сенсорного интерферометра и получить систему измерения колебаний разности длин плеч сенсорного интерферометра в полосе 1-200 кГц с разрешением менее 1 нм с максимальными амплитудами меньше четверти длины волны используемого света.

3. В тандемной низкокогерентной схеме можно реализовать алгоритм гомодинной демодуляции с разнесением модулирующего и сенсорного интерферометров, что позволяет построить измерительную систему не чувствительную к дрейфам сенсорного интерферометра с разрешением 0.3 нм, с максимальной амплитудой в единицы длин волн используемого света.

4. На базе волоконно-оптической системы с тандемным низкокогерентным следящим интерферометром может быть реализован алгоритм двумерной локации ударного воздействия на одном датчике с применением алгоритма обращения времени.

5. Тандемная низкокогерентная интерферометрия может быть использована для контроля нагрева тонкопленочных органических солнечных элементов в результате солнечного воздействия бесконтактным методом, позволяющим избежать прямого нагрева сенсора при контактных измерениях, а также для измерения толщины плёнок алмаза с сильной шероховатостью поверхности на уровне 2-4 мкм.

6. С помощью модифицированной LIGA-технологии могут быть созданы чувствительные элементы микромеханических волоконно-оптических сенсоров, практически любой геометрии и обладающие заданной частотной характеристикой в требуемом диапазоне частот.

7. Волоконно-оптический сенсор температуры может быть создан с использованием технологий формирования полупроводниковых структур, позволяющих сформировать

чувствительный элемент, а именно кремниевый микрорезонатор Фабри-Перо, интегрированный с оптическим волокном.

Личный вклад автора в получение результатов

Все основные результаты диссертации получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Все волоконно-оптические измерения были выполнены лично автором. Автор принимал непосредственное участие в изготовлении волоконно-оптических сенсоров. Математическое моделирование методик построения волоконно-оптических систем регистрации были выполнены лично автором.

Степень достоверности и апробации результатов

Все результаты представлены в реферируемых научных изданиях и докладывались на научных конференциях. Апробация содержащихся в данной диссертационной работе результатов проводилась на следующих научных конференциях:

XIII Всероссийская конференция молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика», г. Саратов, 4–6 сентября 2018. – устный доклад.

XXIII Международный симпозиум "Нанопизика и наноэлектроника", г. Нижний Новгород, 11–14 марта 2019, стендовый доклад

22-ая Всероссийская молодежная научная школа-семинар "Актуальные проблемы физической и функциональной электроники", г. Ульяновск, 22–24 октября 2019 г. – устный доклад

63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, 23–29 ноября 2020 г. – устный доклад

XXV Международный симпозиум "Нанопизика и наноэлектроника", г. Нижний Новгород, 9–12 марта 2021 г. – стендовый доклад

Пятая международная научно-техническая конференция "Современная элементная база радиоэлектроники и её применение" имени О.В. Лосева, г. Нижний Новгород, 21-22 октября 2021 г. – устный доклад

Всероссийская конференция по волоконной оптике 2021, г. Пермь, 5–8 октября 2021 г. – устный доклад

19-я научно-техническая конференция «Молодежь в науке», г. Саров, 26-28 октября 2021 г. – устный доклад

Материалы диссертации опубликованы в 3 рецензируемых научных изданиях, внесённых в перечень ВАК, а также в базы данных Web of Science, Scopus, 1 патенте, 7 публикациях в сборниках трудов и тезисах докладов российских и международных научных конференций, симпозиумов.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Объем диссертации составляет 120 страниц, приведено 64 рисунка.

Во введении обосновывается актуальность исследований научно-квалификационной работы, формулируются цели и задачи диссертационной работы, обсуждаются научная новизна, научная и практическая значимость результатов, формулируются положения, выносимые на защиту, проводится оценка личного вклада автора в полученные результаты, оценивается степень достоверности полученных результатов, приводится структура диссертации и краткое содержание глав диссертационной работы.

Первая глава представляет собой обзор современных достижений по оптическим методам построения систем опроса волоконно-оптических интерференционных сенсоров и принципов построения волоконно-оптических сенсоров физических величин. Основное внимание уделено системам опроса, нашедшим практическое применение. Также в данной главе описываются метод гомодинной демодуляции и принципы тандемной низкокогерентной интерферометрии, применяемые в данной работе.

Во второй главе предложены методы повышения точности систем регистрации, использующих тандемную низкокогерентную интерферометрию и два метода построения системы опроса волоконно-оптических интерференционных сенсоров.

Одним из факторов, влияющих на точность измерения волоконно-оптических систем регистрации, является стабильность скорости модулятора интерферометра. Так, при использовании волоконной реализации интерферометра Майкельсона с пьезоэлектрическим модулятором оптической разности хода, непостоянство скорости, обусловленное гистерезисом и нелинейностью модулятора, может составлять до 20% в рабочем диапазоне. В данной работе была предложена двухстадийная аналоговая и

цифровая стабилизация скорости фазового модулятора, основанная на референтном лазерном канале. Интерференционный сигнал лазерного излучения с длиной волны 1350 нм использовался для коррекции управляющего сигнала фазовым модулятором и цифровой стабилизации скорости фазового модулятора. При этом обеспечивается постоянство скорости <1%, максимальная рабочая область фазового модулятора, поддержание заданной скорости фазовой модуляции, устранение звона пьезоэлектрических элементов.

Также во второй главе предложены методы построения системы регистрации изменения оптической длины резонатора Фабри-Перо, основанные тандемной низкокогерентной интерферометрии.

Была продемонстрирована система регистрации малых изменений длины резонатора Фабри-Перо ($\lambda/4$) с широкой полосой рабочих частот (1–200 кГц). Использование фазовой модуляции опорного интерферометра на частоте 1 кГц позволило по величине гармоник в интерференционном сигнале создать цепь обратной связи для поддержания рабочей точки интерферометра в положении максимальной чувствительности, соответствующему линейному участку на передаточной характеристике. Таким образом, медленные дрейфы рабочей точки компенсируются подстройкой опорного интерферометра с помощью цепи обратной связи. Чувствительность измерительной системы составила менее 1 нм.

Также была представлена система регистрации на базе тандемного низкокогерентного интерферометра с применением метода гомодинной демодуляции на основе перекрестного перемножения. Благодаря использованию тандемной низкокогерентной схемы была реализована фазовая модуляция на частоте 20 кГц в опорном интерферометре, что позволило производить измерения колебаний оптической длины пассивного интерферометра Фабри с использованием метода гомодинной демодуляции в полосе частот от 100 Гц до 8 кГц и разрешением 0.3 нм. Данный метод позволяет регистрировать изменения длины резонатора больше, чем длина волны излучения.

Третья глава посвящена разработке интерференционных сенсоров физических величин, а именно температуры и давления.

Представлен миниатюрный волоконно-оптический датчик температуры. В качестве чувствительного элемента использован кремниевый микрорезонатор Фабри–Перо, приваренный к торцу оптического волокна. Микрорезонатор Фабри-Перо формировался в подложке кремния с использованием технологии создания микроэлектронных устройств,

а именно глубокого сухого травления в виде Бош-процесса, позволяющего получить вертикальные стенки при травлении на всю глубину подложки. В дальнейшем осуществлялась сварка столбиков с оптоволоконном с тщательно подобранным режимом в аппарате Fujicuga FSM-100M.

В качестве системы опроса датчика температуры использовалась методика тандемной низкокогерентной интерферометрии, позволяющей производить дистанционные абсолютные измерения толщины плоскопараллельных объектов с высокой точностью. Чувствительность системы к малым изменениям температуры составила $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (RMS).

В данном случае для абсолютных измерений также требуется априорная информация о длине резонатора. Однако для материалов с заметной дисперсией показателя преломления можно построить схему, лишенную данного недостатка. Для этого измерение оптической толщины проводится сразу на двух длинах волн, сдвинутых относительно друг друга. В этом случае отношение оптических толщин зависит только от температуры и не зависит от толщины образца.

В третьей главе также представлен волоконно-оптический датчик давления мембранного типа. Он представляет собой стеклянный капилляр с внешним диаметром 250 мкм, к сколотому торцу которого приварена тонкая металлическая мембрана толщиной 500 нм, а с другой стороны вклеено оптическое волокно. Измеряемый резонатор Фабри-Перо формируется между торцом оптического волокна и мембраной. Металлическая мембрана датчика может быть сформирована на кремниевой подложке или на торце сколотого оптического волокна с диаметром 250 мкм, а затем приварена к капилляру в аппарате Fujicuga FSM-100M. Чувствительность изготовленных датчиков давления лежит в диапазоне 0.5–2 нм/Торр в зависимости от образца. Однако данные датчики имеют температурные дрейфы, связанные с температурным расширением капилляра и клеевым соединением оптического волокна.

Также в данной главе представлена многоканальная микрооптоэлектромеханическая система, позволяющая калибровать оптические системы считывания, применяемые в волоконно-оптических сенсорных системах. С использованием модифицированной UV LIGA технологии на одном чипе собран набор микромембран с различной жесткостью от 10 нм/В до 100 нм/В и различным диапазоном перемещения от 100 до 300 нм. Все мембраны имеют гладкую АЧХ без резонансных пиков в диапазоне частот 0-200 кГц.

Четвертая глава посвящена практическому применению разработанных в данной работе методик в исследовательских задачах, задачах технологического контроля и построения систем мониторинга.

В настоящее время перовскитоподобные гибридные многокомпонентные фотоабсорберы являются наиболее предпочтительными материалами для тонкопленочных солнечных элементов нового поколения. Одним из важных факторов, влияющих на время жизни структуры является её температура. В работе для контроля температуры впервые для подобных структур был использован метод низкокогерентной тандемной интерферометрии. Он позволяет избежать ограничений контактного датчика и пирометра и получить данные по нагреву структуры в реальном времени. В работе приведен анализ новых экспериментальных данных о реальной температуре многослойных тонкопленочных структур, содержащих полупрозрачные в видимом диапазоне слои перовскитных фотоабсорберов на функционально-важных подложках, подвергающихся непрерывному воздействию белого света различной интенсивности.

Создание электронных устройств на основе алмаза является перспективным направлением ввиду его уникальных свойств. Выращивание пленок алмаза производится CVD методом на алмазных НРНТ подложках, в частности, на сильнолегированных непрозрачных подложках, что не позволяет контролировать ростовые процессы интерференционными методами по общей толщине образца. Была впервые продемонстрирована возможность измерения методом тандемной низкокогерентной интерферометрии толщины CVD-пленки алмаза с шероховатостью 2-4 мкм, выращенной на проводящей подложке,.

Одной из областей применения волоконно-оптических систем является мониторинг состояния конструкций, изготовленных из композитных материалов. Широкое распространение композитные материалы получили благодаря отличным прочностным характеристикам и малому весу. Они применяются во многих отраслях, таких как авиастроение, кораблестроение и других. Задача мониторинга композитных материалов в ответственных узлах является актуальной, поскольку ввиду их низкой пластичности ударные воздействия могут приводить к расслоениям и повреждениям, почти невидимым снаружи, но существенно снижающим прочностные характеристики материала. Была апробирована волоконно-оптическая система регистрации, предложенная в данной работе, для построения системы мониторинга и локализации ударных воздействий методом обращения времени. В качестве исследуемых объектов использовались лист алюминия и плита из композитного материала. Датчик представлял собой волоконный резонатор

Фабри-Перо, приклеенный на поверхность образца. Для определения места ударного воздействия методом обращения времени достаточно одного датчика, использование нескольких датчиков позволяет повысить достоверность результатов.

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты работы

Основные результаты диссертации могут быть сформулированы следующим образом:

1. Предложены методы физической и цифровой стабилизации скорости модуляции разности хода в интерферометре, что позволяет повестить точность измерений.
2. Представлены и продемонстрированы две оригинальные системы опороса волоконно-оптический интерференционных сенсоров на базе тандемного низкокогерентного интерферометра обладающие субнанометровым разрешением и широким диапазоном рабочих частот 100Гц-8кГц и 1-200кГц.
3. С использованием тандемной низкокогерентной интерферометрии была продемонстрирована возможность контроля толщины пленки CVD алмаза на непрозрачной алмазной подложке. Продемонстрирована возможность бесконтактного измерения температуры перовскитных солнечных элементов. Показана возможность реализации метода обращения времени для локализации удара с использованием волоконно-оптической системы регистрации.

Список цитируемой литературы

1. J.M. Lopez-higuera, Introduction to fibre optic sensing technology, *Handb. Opt. Fibre Sens. Technol.* (2002).
2. G. Rajan, K.K. Iniewski, *Optical Fiber Sensors: Advanced Techniques and Applications*, 2017, <http://dx.doi.org/10.1201/b18074>.
3. *Handbook of Optical Sensors*, 2014, <http://dx.doi.org/10.1201/b17641>.
4. S. Yin, P.B. Ruffin, F.T.S. Yu, *Fiber Optic Sensors*, second edition, 2017, <http://dx.doi.org/10.1201/9781420053661>.
5. B.H. Lee, Y.H. Kim, K.S. Park, J.B. Eom, M.J. Kim, B.S. Rho, H.Y. Choi, Interferometric fiber optic sensors, *Sensors* (2012), <http://dx.doi.org/10.3390/s120302467>.
6. B. Lee, Review of the present status of optical fiber sensors, *Opt. Fiber Technol.* (2003), [http://dx.doi.org/10.1016/S1068-5200\(02\)00527-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1068-5200(02)00527-8).
7. C.K.Y. Leung, K.T. Wan, D. Inaudi, X. Bao, W. Habel, Z. Zhou, J. Ou, M. Ghandehari, H.C. Wu, M. Imai, Review: optical fiber sensors for civil engineering applications, *Mater. Struct. Constr.* (2015), <http://dx.doi.org/10.1617/s11527-013-0201-7>.
8. A. Barrias, J. R. Casas, and S. Villalba, “A review of distributed optical fiber sensors for civil engineering applications,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 16, no. 5, 2016, doi: 10.3390/s16050748.
9. E. Udd, W.B. Spillman, *Fiber Optic Sensors: An Introduction for Engineers and Scientists*, second edition, 2011, <http://dx.doi.org/10.1002/9781118014103>.
10. Кульчин, Ю.Н. Распределенные волоконно-оптические измерительные системы / Ю.Н. Кульчин // М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2001. – 272 с.
11. R. M. Measures, *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology Academic*, San Diego, CA, 2001), pp. 369–449
12. C.I. Merzbacher, A.D. Kersey, E.J. Friebele, Fiber optic sensors in concrete structures: a review, *Smart Mater. Struct.* (1996), <http://dx.doi.org/10.1088/0964-1726/5/2/008>.

13. Boller, C. & Buderath, M. 2007 Fatigue in aerostructures—where structural health monitoring can contribute to a complex subject. *Phil. Trans. R. Soc. A* 365, 561–587. (doi:10.1098/rsta.2006.1924)
14. Лукьянов, А.Ю. Бесконтактный оптический контроль скорости роста и температуры в процессе металлорганической газофазной эпитаксии / А.Ю. Лукьянов, М.А.

Публикации по теме работы

Статьи:

[A1] Volkov P.; Semiko, D., Goryunov A., Luk'yanov A., Tertyschnik A., Vopilkin E., Krayev S. Miniature Fiber-Optic Sensor Based on Si Microresonator for Absolute Temperature Measurements. *Sensors Actuators, A Phys.* 2020, 316. <https://doi.org/10.1016/j.sna.2020.112385>.

[A2] В.В. Травкин, А.И. Коптяев, Г.Л. Пахомов, П.В. Волков, Д.А. Семиков, А.Ю. Лукьянов / Экспериментальное исследование процессов теплопереноса в тонкопленочных структурах на основе перовскитов методом низкокогерентной тандемной интерферометрии // Письма в ЖТФ, 2021, том 47, вып. 23

[A3] Petr Volkov, Andrey Lukyanov, Alexander Goryunov, Daniil Semikov, Evgeniy Vopilkin, Stanislav Kraev, Andrey Okhapkin, Anatoly Tertyschnik and Ekaterina Arkhipova / Wideband MOEMS for the Calibration of Optical Readout Systems // *Sensors* 2021, 21, 7343. <https://doi.org/10.3390/s21217343>

[A4] Семикова Д.А., Волкова П.В., Вopilкина Е.А., Горюнова А.В., Краева С.А., Лукьянова А.Ю., Охапкина А.И., Тертышника А.Д. Способ изготовления волоконно-оптического датчика температуры на базе кремниевого оптического резонатора Фабри – Перо, Патент, Регистрационный номер заявки 2021110191, дата поступления 12.04.2021, принято положительное решение о выдаче.

Материалы конференций и тезисы докладов с участием автора

[B1] Д. А. Семиков, П. В. Волков, А. В. Горюнов, А. Ю. Лукьянов, А. Д. Тертышник, Е.А., Вopilкин, С.А.Краев / Гибридный волоконнооптический датчик

температуры // Сборник трудов XIII Всероссийской конференции молодых ученых «Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика», 2018. – С. 278–279

[B2] П.В. Волков, Е.А. Вoпилкин, А.В. Горюнов, С.А. Краев, А.Ю. Лукьянов, Д.А. Семиков, А.Д. Тертышник, Метод создания волоконно-оптического датчика температуры с использованием технологий формирования полупроводниковых микроструктур, Труды XXIII Международного симпозиума «Нанofизика и нанoeлектроника», 2019. Т. 2. – С. 624-625

[B3] Семиков Д. А., П. В. Волков П. В., Горюнов А. В., Лукьянов А. Ю., Тертышник А. Д., Вoпилкин Е.А., Краев С.А. / ГИБРИДНЫЙ ВОЛОКОННООПТИЧЕСКИЙ ДАТЧИК ТЕМПЕРАТУРЫ // Материалы 22-й Всероссийской молодежной научной школы-семинара ""Актуальные проблемы физической и функциональной электроники"", 2019. – С.35–37 "

[B4] Д. А. Семиков, П. В. Волков, А. В. Горюнов, А. Ю. Лукьянов, А. Д. Тертышник, Е.А. Вoпилкин / Локализация ударного воздействия методом обращения времени с применением волоконно-оптической системы регистрации // Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ. Электроника, фотоника и молекулярная физика, 2020, – С. 278-279"

[B5] "Д.А. Семиков, П.В. Волков, А.В. Горюнов, А.Ю. Лукьянов, А.Д. Тертышник, Г.Л. Пахомов, В.В. Травкин / Исследование процессов теплопереноса в тонкопленочных структурах на основе перовскитов методом низкокогерентной тандемной интерферометрии // Нанofизика и нанoeлектроника. Труды XXV Международного симпозиума, 2021. Т.2. – С. 844-845

[B6] Семиков Д.А., Волков П.В., Вoпилкин Е.А., Горюнов А.В., Краев С.А., Лукьянов А.Ю., Охaпкин А.И., Тертышник А.Д. / Волоконно-оптические датчики физических величин и система регистрации на базе тандемной низкокогерентной интерферометрии // ТРУДЫ 5-ой международной научно-технической конференции имени О.В. Лосева, посвящённой 800-летию Нижнего Новгорода, Нижний Новгород, 21-22 октября 2021 г., с. 35

[B7] Семиков Д.А., Волков П.В., Горюнов А.В., Лукьянов А.Ю., Тертышник А.Д., Вoпилкин Е.А. / Локализация ударного воздействия методом обращения времени с использованием тандемного низкокогерентного интерферометра // Труды конференции всероссийской конференции по волоконной оптике – 2021, г. Пермь 5-8 октября, СПЕЦВЫПУСК «ФОТОН-ЭКСПРЕСС-НАУКА 2021» №6, 2021, с.290-291