На правах рукописи

# АСТАХОВ ЕЛИСЕЙ ИГОРЕВИЧ

### АВТОДИННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ТОКОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

01.04.21 – лазерная физика, 01.04.03 – радиофизика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Саратов – 2017

Работа выполнена на кафедрах физики твердого тела и медицинской физики федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского»

#### Научные руководители:

доктор физико-математических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ Усанов Дмитрий Александрович

доктор физико-математических наук, профессор Скрипаль Анатолий Владимирович

#### Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Носков Владислав Яковлевич, департамент радиоэлектроники и связи, Уральский федеральный университет (УрФУ)

доктор физико-математических наук, профессор **Горбатенко Борис Борисович**, кафедра «Физика», Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.

Ведущая организация:	Саратовский филиал Института радиотехни-
	ки и электроники Российской академии на-
	ук, (СФ ИРЭ РАН), г. Саратов

Защита диссертации состоится «26 » декабря 2017 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д 212.243.05 на базе Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, Ш корпус СГУ, 34 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А. Артисевич Саратовского государственного университета им. Н.Г.Чернышевского (Саратов, ул. Университетская, 42).

Автореферат разослан « 25» октября 2017 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета

Симоненко Георгий Валентинович

### ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

#### Актуальность проблемы

Современные лазерные измерительные системы нередко используют принципы обработки сигналов, развитые в радиофизике и лазерной физике. В частности, к ним относятся автодинные системы.

Теории СВЧ-автодинных систем и их практическому применению посвящено большое число публикаций, например [1,2]. При этом достижения в области физики автодинных СВЧ-систем могут быть использованы в области физики лазерных систем и наоборот. Возможно также создание систем, в состав которых одновременно входят и лазерные и СВЧавтодинные генераторы. Примером такой системы может служить исследованный в настоящей работе ближнеполевой СВЧ-микроскоп с ближнем полем, создаваемым полупроводниковым СВЧ-генератором, работающим в автодином режиме, в котором для контроля расстояния между зондом и исследуемой поверхностью используется лазерный автодинный интерферометр.

Полупроводниковые лазеры, работающие в режиме автодинного детектирования, широко используются для измерения расстояния, скорости, перемещения, ускорения и вибраций объектов [3-8]. Разрешающая способность таких измерений ограничивается длиной волны лазерного излучения. Повышение разрешающей способности определения этих характеристик возможно при использовании методов лазерной интерферометрии. Сочетание лазерной интерферометрии с автодинным режимом работы лазера позволяет повысить чувствительность методов интерферометрии к изменению измеряемых параметров.

Одной из проблем, которую приходилось решать при создании такого рода измерительных устройств, является проблема точности измерения расстояния при удалении источника излучения от измеряемого объекта. При увеличении расстояния между источником излучения и исследуемым объектом точность определения измеряемого параметра уменьшается. С целью устранения этого противоречия предложены различные способы решения этой проблемы.

Ранее [9] было предложено использовать разложения лазерного автодинного сигнала в ряд Фурье и в ряд по функциям Бесселя и использовать амплитуды спектральных составляющих этих рядов для определения амплитуды вибраций отражателя. Также была определена область спектра автодинного сигнала, из которой следует выбирать спектральную составляющую, обладающую максимальным значением амплитуды, поскольку только эти спектральные составляющие пропорциональны функциям Бесселя одного знака. Однако, использование для расчетов только ограниченной области спектра автодинного сигнала уменьшает диапазон измеряемых параметров, например, амплитуд вибраций. Также был [10] предложен алгоритм решения обратной задачи по определению амплитуд механических колебаний сложного периодического движения в лазерной гомодинной системе с использованием метода наименьших квадратов и показана высокая помехоустойчивость этого метода. Однако решение обратной задачи с использованием только функции автодинного сигнала не позволяет однозначно восстанавливать вид сложного движения объекта.

При решении обратной задачи требуется теоретическое описание наблюдаемых характеристик, совпадающих с экспериментом. В СССР теорию автодинов развил И.Л. Берштейн, известный учёный по теории генераторов [1]. И.Л. Берштейн впервые поставил и весьма корректно решил задачу о воздействии на автоколебательную систему собственного сигнала, отраженного от движущейся цели [11]. Значительный вклад в теорию автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах внесли работы Н.Г. Басова с сотрудниками [12,13], Р.Ф. Казаринова, Р.А. Суриса, А.А.Тагера [14,15], Е. М.Гершензона с сотрудниками [16].

Значительный интерес представляет исследование возможностей автодинной интерферометрии при модуляции длины волны лазерного излучения, которая реализуется за счет токовой модуляции лазерного диода. В настоящее время развита теория формирования автодинного сигнала при пилообразной токовой модуляции. Достигнуты успехи в направлении измерения абсолютных расстояний по спектру автодинного сигнала при пилообразной токовой модуляции лазерного излучения. Однако автодинная интерферометрия при пилообразной токовой модуляции имеет существенные ограничения в разрешающей способности при измерении малых расстояний.

Ранее была разработана теория метода определения расстояния до объекта, основанная на анализе низкочастотного спектра лазерного автодина при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода. На основе этой методики продемонстрирована возможность измерения профиля поверхности.

Наличие в спектре автодинного сигнала нескольких спектральных составляющих может приводить к неоднозначности при восстановлении измеряемых параметров деформации или расстояния до объекта. Это связано с тем, что разложение в ряд по функциям Бесселя, характеризующим амплитуды спектральных составляющий этого спектра, имеют фиксированную область однозначности по аргументу. В этом случае при изменении расстояния до объекта необходимо постоянно изменять глубину токовой модуляции лазерного диода, что в свою очередь, требует постоянной предварительной калибровки измерительной системы. При этом, не был проведен анализ предложенного метода для случая, когда в качестве информационных характеристик используются гармоники высоких порядков низкочастотного спектра.

Кроме этого, в предложенных методах для определения микронных отличий в расстоянии приходится использовать предварительно откалиброванное изменение расстояния между отражателем и источником излучения. В предложенных решениях не удалось получить точность в определении изменения расстояния при удалении источника излучения от отражателя на расстоянии ~ 10 см, не превышающую ~ 65 мкм.

В то же время существует задача, в которой при удалении источника излучения от измеряемого объекта на величину порядка единиц сантиметров необходимо определять изменение расстояния в единицы нанометров. Такая ситуация характерна, например, для ближнеполевой сканирующей СВЧ-микроскопии, в которой зонд находится на некотором расстоянии от измеряемого объекта, и расстояние между источником излучения и зондом во время сканирования должно поддерживаться постоянным.

Современная зондовая микроскопия основана на контроле параметров покрытий с помощью зондов, находящихся на микро- и нанометровых расстояниях от измеряемой поверхности. В ближнеполевых СВЧ-микроскопах используют режим работы, при котором в качестве зондирующего фигурирует поле нераспространяющегося типа волны, так называемое ближнее поле. Амплитуда этого поля быстро затухает по мере его удаления от источника. Образующие его волны в зарубежной литературе называют эванесцентными, в отечественной – затухающими.

Обеспечение заданного расстояния от зонда до поверхности объекта является актуальной задачей, решаемой в известных устройствах методами обратной связи по регистрируемому сигналу. Их использование существенно усложняет схему ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа и его применение для измерений.

Предложенное авторами [17] применение для контроля расстояния между зондом и исследуемым объектом сочетания ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа с атомно-силовым микроскопом также значительно усложняет как само устройство, так и методику его использования. Поэтому решение такого рода задач представляется актуальным, т.к. открывает перспективу расширения области применения ближнеполевой сканирующей СВЧ-микроскопии, повышения достоверности получаемых с ее использованием результатов.

Таким образом, актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью расширения теоретических представлений о физике лазерных автодинных систем и их использовании для решения практических задач разработки новых методов лазерных интерференционных измерений расстояний, нанометровых смещений и вибраций. Это, в свою очередь, обуславливает актуальность рассмотрения режима работы полупроводникового автодина при изменении длины волны генерируемого лазерного излучения и анализа изменения амплитуд его спектральных составляющих.

#### Цель диссертационной работы:

Выявление особенностей формирования автодинного сигнала при гармонической токовой модуляции и разработка методов измерения по низкочастотному спектру автодинного сигнала расстояния, наносмещений и нановибраций, и их применение для регистрации наносмещений зонда ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа.

В качестве задач, которые необходимо решить, в диссертационной работе сформулированы следующие:

1. Установление особенностей формирования автодинного сигнала и анализа изменения амплитуд спектральных составляющих его низкочастотного спектра при большой глубине гармонической токовой модуляции.

2. Определение амплитуды нановибраций с помощью частотномодулированного сигнала лазерного автодина;

3. Разработка методов автодинной интерферометрии расстояния по наборам гармоник высоких порядков низкочастотного спектра при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера;

4. Разработка методов лазерной автодинной регистрации наноперемещений при модуляции длины волны лазерного излучения;

5. Разработка метода регистрации наносмещений зонда ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа

6. Создание ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа, сочетающего в себе достоинства полупроводникового лазерного и СВЧ измерительных устройств, работающих в автодином режиме

Новизна исследований, проведенных в ходе выполнения диссертационной работы, состоит в следующем:

- 1. Разработан метод определения амплитуды нановибраций объекта по спектру частотно-модулированного сигнала полупроводникового лазерного автодина, позволяющий значительно повысить точность измерений вследствие использования гармонической частотной модуляции излучения лазерного автодина для калибровки системы;
- 2. Разработан метод определения расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера, показана универсальность применения соотношений, связывающих фазу автодинного сигнала амплитуды спектральных гармоник И использования подавления В случае автодинного сигнала, амплитудной модуляции автодинного сигнала на частоте токовой модуляции, позволяющего исключить из измеряемого сигнала спектральные составляющие, обусловленные амплитудной модуляцией;
- 3. Разработан метод определения наноперемещений при модуляции длины волны лазерного излучения, демонстрирующий высокую точность в пределах четверти длины волны излучения лазера;

- 4. Показана теоретически и подтверждена экспериментально возможность определения величины зазора между зондом ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа и исследуемой с его помощью поверхностью, используя возможности лазерной автодинной интерферометрии при гармонической модуляции длины волны излучения лазера.
- 5. Впервые создан ближнеполевой сканирующий СВЧ-микроскоп, сочетающий в себе достоинства полупроводникового лазерного и СВЧ измерительных устройств, работающих в автодином режиме.

Новизна полученных результатов подтверждается защитой их патентами на изобретения.

Достоверность полученных теоретических результатов обеспечивается строгостью используемых математических моделей, соответствием результатов численного и натурного экспериментов. Достоверность экспериментальных результатов обеспечивается применением стандартной измерительной аппаратуры, высокой степенью автоматизации процесса регистрации экспериментальных данных, а также их соответствием результатам, полученным при компьютерном моделировании автодинного сигнала и его спектра при модуляции длины волны лазерного излучения.

**Практическая значимость** полученных результатов заключается в следующем:

Разработанный метод определения амплитуды нановибраций объекта по спектру автодинного сигнала частономодулированного полупроводникового лазерного автодина позволяет значительно повысить точность измерений вследствие использования гармонической частотной модуляции излучения лазерного автодина для калибровки системы по сравнению с методом, использующим наложение на объект дополнительных механических вибраций.

Разработанный метод определения расстояния при модуляции длины волны излучения позволяет определить область однозначности измерений при использовании гармоник высоких порядков низкочастотного спектра автодинной системы.

Разработанный метод определения наноперемещений позволяет определять величины зазора между зондом и исследуемой поверхностью в зондовой микроскопии, используя возможности лазерной автодинной интерферометрии при гармонической модуляции длины волны излучения лазера, что способствует повышению точности измерений и чувствительности к изменению параметров исследуемого объекта. Разработан ближнеполевой сканирующий СВЧ микроскоп, совмещенный с устройством контроля зазора между зондом и исследуемой поверхностью.

Впервые создан ближнеполевой сканирующий СВЧ-микроскоп, сочетающий в себе достоинства полупроводникового лазерного и СВЧ измерительных устройств, работающих в автодином режиме, и обладающий лучшими основными характеристиками.

### На защиту выносятся следующие положения и результаты:

- 1. При измерениях нановибраций для калибровки автодинного сигнала токовая модуляция длины волны лазерного автодина позволяет исключить необходимость наложения на объект дополнительных механических вибраций.
- 2. При подавлении амплитудной составляющей автодинного сигнала, связанной с токовой модуляцией лазерного диода, за счет вычитания из измеряемого отношения спектральных составляющих автодинного сигнала, связанных с амплитудной модуляцией, но сохранении в этом отношении модуляции фазы, формируемый сигнал будет иметь вид, аналогичный сигналу, полученному при гармонических вибрациях отражателя.
- 3. Существует область однозначной зависимости отношения спектральных составляющих спектра автодинного сигнала от величины смещения отражателя при токовой модуляции лазерного диода.
- 4. При токовой модуляции длины волны по гармоническому закону в спектре автодинного сигнала наблюдается периодическое изменение амплитуд его спектральных составляющих, обусловленное свойствами стоячей волны во внешнем резонаторе автодинной системы и связанное с изменением стационарной фазы автодинной системы.
- 5. При использовании гармоник высоких порядков низкочастотного спектра автодинной системы существует область однозначной зависимости отношения этих спектральных составляющих от расстояния до отражателя, не зависящая от начальной фазы автодинного сигнала и смещающаяся в область высоких частот.
- 6. Совокупность автодинного ближнеполевого СВЧ-микроскопа и полупроводникового частотномодулированного лазерного измерителя расстояний обеспечивает создание сканирующего зондового прибора для контроля неоднородностей материалов с повышенной точностью. Погрешность в измерении диэлектрической проницаемости с использованием предложенного прибора не превышает 10<sup>-4</sup>.

На защиту также выносятся способы измерений амплитуд вибраций и расстояний, созданные на основе выявленных физических закономерностей, защищенные 2 патентами РФ.

<u>Апробация работы.</u> Работа выполнена на кафедре физики твердого тела и кафедре медицинской физики Саратовского государственного университета в 2012-2017 годы. Основные положения и результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, докладывались и обсуждались на:

- XI Всероссийской конференции молодых ученых «Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика» (г. Саратов, 2016, 2017);
- Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (г.Саратов, 2014, 2015, 2016, 2017).
- Международной конференции «Saratov Fall Meeting 2017».
- На семинарах кафедры медицинской физики, кафедры физики твердого тела.

Полученные в диссертационной работе результаты использованы при выполнении НИР в рамках государственного задания ВУЗам на выполнение НИР (НИР «Исследование механизмов резонансного взаимодействия излучения СВЧ и терагерцового диапазона с неоднородными структурами, содержащими включения с управляемыми характеристиками в виде композитов» на 2012–2014 годы, Государственное задание Минобрнауки России в сфере научной деятельности (проектная часть) по Заданию №16.1575.2014/К НИР «Исследование эффектов резонансного взаимодействия электромагнитного излучения сверхвысокочастотного и терагерцового диапазонов с неоднородными микро- и наноструктурами и композитами», 2014-2016 годы).

Результаты, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, использованы в учебном процессе для подготовки студентов факультета нано- и биомедицинских технологий СГУ, обучающихся по направлениям бакалавриата и магистратуры «Физика», «Электроника и наноэлектроника».

По результатам исследований, выполненных при работе над диссертацией, опубликовано 13 работ, в том числе 8 работ в изданиях, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 6 статей в журналах, 3 из которых включены в базу данных SCOPUS, материалы 5 докладов на всероссийских конференциях, получены 2 патенты на изобретение РФ.

**Личное участие автора** в этой работе выразилось в теоретической разработке и практической реализации метода определения амплитуды нановибраций при модуляции длины волны лазерного излучения, теоретической разработке и практической реализации метода определения изменяющегося во времени ускорения при микро- и наносмещениях объекта по автодинному сигналу полупроводникового лазера.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации составляет <u>111</u> страниц машинописного текста, включая <u>32</u> рисунка и <u>3</u> таблицы. Список литературы содержит <u>142</u> наименования и изложен на <u>16</u> страницах.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

<u>Во введении</u> обоснована актуальность темы исследований, сформулирована цель диссертационной работы, определена новизна исследований, обсуждена практическая значимость полученных результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту, изложено краткое содержание диссертации.

В первом разделе приведены результаты критического анализа исследований эффекта автодинного детектирования, приведен критический анализ методов измерений, основанных на использовании эффекта автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах, рассмотрены лазерные автодинные методы для определения характеристик движения внешнего отражателя, расстояния, перемещений и вибраций. Достигнутые успехи лазерной интерферометрии сдерживаются необходимостью калибровки автодинного сигнала и его спектра путем наложения дополнительных механических возбуждений на исследуемый объект. В частности, актуальным является определение амплитуды нановибраций без наложения дополнительных механических вибраций на исследуемый объект, но при модуляции длины волны лазерного излучения, анализ спектра автодинного сигнала при большой глубине гармонической токовой модуляции, определение наноперемещений при модуляции длины волны лазерного излучения, позволяющее контролировать величины зазора между зондом ближнеполевого сканирующего СВЧ-микроскопа и исследуемой с его помощью поверхностью.

<u>Во втором разделе</u> исследованы особенности формирования автодинного сигнала полупроводникового лазера, работающего в режиме модуляции длины волны лазерного излучения, при нановибрациях отражателя.

В автодинной системе при модуляции длины волны лазерного излучения путем введения зависимости частоты излучения и амплитудных составляющих мощности излучения полупроводникового лазера от плотности тока накачки j(t) мощность излучения полупроводникового лазера может быть получена в виде:

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2(j(t)) \cos(\omega(j(t))\tau(t)),$$
(1)

где  $P_1(j(t))$  и  $P_2(j(t))$  – амплитудные составляющие мощности излучения полупроводникового лазера,  $\omega \tau$  – фазовый набег в системе с внешним отражателем,  $\tau(t)$  – время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя,  $\omega(j(t))$  – частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от плотности тока накачки j(t) и уровня обратной связи.

Частота излучения полупроводникового лазера, с учетом автодинного режима и токовой модуляции частоты излучения определится соотношением:

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \omega_A \cdot \sin(\Omega_1 t + \varepsilon_1),$$

где  $\omega_0$  – собственная частота излучения полупроводникового лазерного диода;  $\omega_A$  – амплитуда отклонения частоты излучения полупроводникового лазерного диода;  $\Omega_1$  – частота модуляции тока питания лазерного диода;  $\varepsilon_1$  – начальная фаза.

Время обхода лазерным излучением внешнего резонатора при движении отражателя по гармоническому закону определится соотношением:

$$\tau(t) = \tau_0 + \tau_A \cdot \sin(\Omega_2 t + \varepsilon_2),$$

где  $\tau_0$  – время обхода лазерным излучением внешнего резонатора с неподвижным отражателем,  $\tau_A = \frac{2 \cdot \xi}{c}$  – амплитудное значение,  $\varepsilon_2$  — начальная фаза,  $\Omega_2$  – частота колебаний отражателя,  $\xi$  – амплитуда колебаний отражателя.

Мощность автодинного сигнала может быть представлена в виде разложений в ряд по функциям Бесселя первого рода  $J_n$  и в ряд Фурье, из соответствия которых можно записать выражения для амплитуд спектральных гармоник Фурье-спектра  $C_n$ , соответствующих амплитудам спектральных составляющих разложения в ряд по функциям Бесселя

$$C_{1} = \cos(\theta) I_{2} (J_{0}(\sigma) - J_{2}(\sigma)) + I_{1}, C_{2} = \sin(\theta) I_{2} (J_{1}(\sigma) - J_{3}(\sigma)),$$
(2)

$$C_{3} = \cos(\theta) I_{2}(J_{2}(\sigma) - J_{4}(\sigma)), C_{4} = \sin(\theta) I_{2}(J_{3}(\sigma) - J_{5}(\sigma)).$$
(3)

Соотношения (2) – (3) представляют собой связь спектральных составляющих частотномодулированного автодинного сигнала с функциями Бесселя первого рода.

Для определения амплитуды нановибраций  $\xi$ , входящей в параметр  $\sigma_{\downarrow}$  используем отношение второй и четвертой гармоник:

$$C_2 / C_4 = (J_1(\sigma) - J_3(\sigma)) / (J_3(\sigma) - J_5(\sigma)).$$
(4)

Для определения амплитуды нановибраций необходимо рассчитать аргумент функции Бесселя первого рода о, используя отношение второй к четвертой спектральных гармоник частотномодулированного автодинного сигнала при колебаниях отражателя.

Принимая во внимание, что  $\tau_A = 2\xi/c$  и  $\sigma_M = \omega_A \tau_0$ , получено соотношение для определения амплитуды нановибраций:

$$\xi = \frac{c}{2} \cdot \frac{\sigma - \sigma_M}{\omega_0}.$$
 (5)

Численное моделирование с использованием предложенного метода применительно к частотномодулированному полупроводниковому лазерному автодину проводилось при следующих параметрах: длина волны лазерного излучения  $\lambda = 654$  нм, амплитуда отклонения частоты излучения полупроводникового лазерного диода  $\omega_A = 30 \cdot 10^8$  рад/с, частота колеба-

ний отражателя и частота модуляции тока питания лазерного диода  $\Omega = 500$  Гц, амплитуда колебаний отражателя  $\xi = 56$  нм.

Измерения проводились на установке, в состав которой входили частотномодулированный полупроводниковый лазерный автодин на лазерном диоде RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с дифракционноограниченной одиночной пространственной модой с длиной волны 654 нм, излучение которого направлялось на объект, закрепленный на пьезокерамической пластинке, при этом диаметр пятна лазерного излучения на поверхности объекта составлял менее 1 мм. Модуляция длины волны излучения проводилась на частоте Ω = 500 Гц посредством модуляции тока питания лазера с помощью встроенного в платформу NIELVIS генератора сигналов. Изменение тока питания лазерного диода осуществлялось путем изменения напряжения питания, подаваемого на полупроводниковую структуру от блока управления током питания. Колебания пьезокерамической пластинки осуществлялись путем подачи на усилитель сигнала переменного напряжения с генератора, амплитудой 20мВ и 10мВ, что соответствует колебаниям пластинки с амплитудой около 60 нм и 30 нм, соответственно. Частота и начальная фаза колебаний пьезокерамической пластинки синхронизированы с частотой и начальной фазой модуляции длины волны лазерного излучения, с помощью программного обеспечения к платформе NIELVIS, в котором выставляются параметры генерируемых сигналов. При проведении измерений в пьезокерамической пластинке возбуждались с помощью генератора с частотой  $\Omega = 500 \Gamma$ ц колебания с амплитудой равной  $\xi = 60$ *нм*, измеренной независимым методом.

На рисунке 1(а), представлен автодинный сигнал без токовой модуляции при колебании отражателя с амплитудой  $\xi = 56$ нм. Спектр сигнала (рисунок 1(в)) содержит только первую и вторую гармоники, что не достаточно для измерения амплитуды вибрации без калибровки автодинного сигнала.

Для калибровки автодинного сигнала на полупроводниковый лазер подавалось модулирующее напряжение величиной 20мВ и частотой 500Гц. Зарегистрированный частотномодулированный автодинный сигнал и его спектр приведены на рисунках 1 (б) и 1 (г), соответственно. Вычисленное значение  $\sigma_M = \omega_A \tau_0$ , по нескольким измерениям, при неподвижном отражателе, составило  $\sigma_M = 2.052$ . Измеренное значение амплитуды колебаний отражателя в эксперименте составило  $\xi = 56 \cdot 10^{-9} \, m$ . Среднеквадратичное отклонение составило  $\Delta = \pm 4 \cdot 10^{-9} \, m$ .

При проведении измерений амплитуды колебаний пьезокерамики с уменьшенной в 2 раза величиной подаваемого на нее напряжения измеренная величина амплитуды колебаний составила  $\xi = 29 \cdot 10^{-9} \, M$ . Средне-квадратичное отклонение составило  $\Delta = \pm 5 \cdot 10^{-9} \, M$ .



Рисунок 1. Экспериментальный автодинный сигнал и его спектр:
а) автодинный сигнал при колебниях отражателя с амплитудой ξ = 56нм;
б) частотномодулированный автодинный сигнал при колебниях отражателя с амплитудой ξ = 56 нм;
в) спектр для автодинного сигнала, изображенного на рис (а); г) спектр для автодинного сигнала, изображенного на рис (б).

Таким образом, показано, что использование частотномодулированного излучения полупроводникового лазерного автодина позволяет с высокой точностью определять амплитуду нановибраций объекта без использования дополнительного механического возбуждения колебаний с микронной амплитудой в измеряемом объекте.

<u>В третьем разделе проведен анализ низкочастотного спектра интер-</u> ференционного сигнала при больших девиациях длины волны лазерного излучения. Наличие в спектре автодинного сигнала нескольких спектральных составляющих может приводить к неоднозначности при восстановлении измеряемых параметров деформации или расстояния до объекта. Нами для повышения достоверности измерений исследован вопрос использования при решении обратной задачи гармоник высоких порядков низкочастотного спектра.

При использовании токовой модуляции частоты излучения полупроводникового лазера будут также изменяться амплитудные составляющие излучения полупроводникового лазера

 $P_1(j(t)) = I_1 \sin(\Omega t + \varepsilon), P_2(j(t)) = I_2 \sin(\Omega t + \varepsilon).$ 

С учетом соотношений для амплитудной  $P_1(j(t))$  и фазовой  $P_2(j(t))$  компонент при изменении тока питания лазера соотношение (1) для мощности излучения полупроводникового лазера может быть переписано в виде

$$P_{1}(j(t)) = I_{1}\sin(\Omega t + \varepsilon) + I_{2}\sin(\Omega t + \varepsilon)\cos(\omega_{0}\tau + \omega_{A}\tau\sin(\Omega t + \varepsilon)).$$
(6)

Мощность автодинного сигнала может быть также представлена в виде разложений в ряд по функциям Бесселя первого рода  $J_n$  и в ряд Фурье, из соответствия которых можно записать выражения для амплитуд спектральных гармоник Фурье-спектра  $C_n$ , соответствующих амплитудам спектральных составляющих разложения в ряд по функциям Бесселя.

Для определения расстояния до объекта L, входящего в параметр  $\sigma$ , используем известные отношения 2n и 2n+2 спектральных гармоник и отношение 2n+1 и 2n+3 спектральных гармоник:

$$C_{2n}/C_{2n+2} = (J_{2n-1}(\sigma) - J_{2n+1}(\sigma))/(J_{2n+1}(\sigma) - J_{2n+3}(\sigma)).$$
(7)  
$$C_{2n+1}/C_{2n+3} = (J_{2n}(\sigma) - J_{2n+2}(\sigma))/(J_{2n+2}(\sigma) - J_{2n+4}(\sigma)).$$
(8)

Принимая во внимание, что  $\tau_0 = 2 \cdot L/c$ , получаем соотношение для определения расстояния до объекта:

$$L = c\sigma/2\omega_A$$
.

Компьютерное моделирование автодинного сигнала и спектра частотномодулированного полупроводникового лазера проводилось при следующих параметрах: длина волны излучения лазера  $\lambda = 654$  нм, частота модуляции тока питания лазерного диода  $v_1 = 100$  Гц, расстояние до объекта L = 0.1 м.

Для определения номеров спектральных гармоник, используемых для корректного решения обратной задачи, были проведены расчеты функций Бесселя, входящих в уравнения (7) и (8). На рис. 2 приведены зависимости функций Бесселя различных порядков от аргумента  $\sigma$ 



Рисунок 2. Зависимость функций Бесселя 1-5 порядка от аргумента функции

Как видно из приведенных зависимостей, область однозначности функций Бесселя возрастает с увеличением используемого в расчетах порядка *n*.

Существование области неоднозначных решений уравнений (7) и (8) в значительной степени связано с трудностями практического определения знаков спектральных составляющих  $C_n$ . Несмотря на то, что возможность моделирования по определению знаков спектральных составляющих  $C_n$  была показана ранее [18], на практике определять их знак затруднительно, в частности, в связи с тем, что измерительные приборы регистрируют абсолютные величины сигналов.

Измерения проводились при амплитуде модулирующего сигнала от 20 мВ до 500 мВ, что обеспечивало наличие в спектре автодинного сигнала спектральных составляющих высших порядков.

На рисунке 3 приведены вид автодинного сигнала и его спектр, полученный при  $\omega_A = 132 \cdot 10^8$  рад. /с, что соответствует величине девиации частоты излучения, равной 0.00046% от длины волны излучения лазерного диода.

Исходя из области однозначных решений уравнений (7) и (8), по отношению спектральных составляющих с 9 по 12 вычисленное значение параметра  $\sigma$  составило 9.88±0.03, для расстояния до объекта равного 11.23±0.03 см.

Отметим, что авторами работы [19] достигнута точность измерений расстояния в 300 мкм на расстоянии равном 20 см. В работе [20] авторы заявляют достигнутую точность измерений в 500 мкм при расстоянии до объекта равном 60 см. Наилучшая точность измерений достигнута в работе [21], при использовании непрерывно перестраиваемого лазерного диода FMCW, которая составляла 43 мкм на расстоянии в 1 метр. То есть, точность определения расстояния описанным выше методом существенно выше, чем в указанных работах.



Рисунок 3. Частотномодулированный автодинный сигнал (а) и его спектр (б) полученныу на экспериментальной установке при девиации частоты излучения лазерного диода  $\omega_A = 132 \cdot 10^8$  рад. /с

При реализации метода определения расстояния до объекта по отношению спектральных составляющих автодинного сигнала полупроводникового лазера при гармонической модуляции длины волны излучения, реализуемой посредством частотной модуляции тока накачки лазерного диода, возникла необходимость учитывать вклад модуляционной составляющей тока питания лазера как в амплитуду продетектированного сигнала, так и в его фазу. Поскольку модуляция амплитуды и фазы автодинного сигнала имеют разные частоты [18], то это открывает возможность исключить из измеряемого отношения спектральных составляющих автодинного сигнала необходимость учета амплитудной модуляции, сохранив в них сигналы, обусловленные модуляцией фазы. На рисунке 4 приведен вид частотномодулированного автодинного сигнала и его спектр, полученные при глубине девиации частоты излучения полупроводникового лазера  $\omega_A = 100 \cdot 10^8$  рад/с, что соответствует величине девиации частоты излучения, равной 0.00035% длины волны излучения лазерного диода.



Рисунок 4. Частотномодулированный автодинный сигнал (а), полученный на экспериментальной установке при девиации частоты излучения лазерного диода

 $\omega_A = 100 \cdot 10^8$  рад. /с, и его спектр (б).

Как видно из представленных на рис. 4 б результатов, в спектре автодинного сигнала преобладает спектральная составляющая на частоте модуляции тока питания лазерного диода. При этом фазовая модуляция автодинного сигнала проявляется в спектре на гармониках основной частоты.

Для исключения амплитудной модуляции автодинного сигнала при изменении тока накачки лазерного диода нами проведено аппаратное подавление амплитудной модуляции автодинного сигнала на частоте токовой модуляции.

Результаты такой демодуляции автодинного сигнала приведены на рисунке 5 а. Как видно из представленных на рис. 5 б результатов, в спектре автодинного сигнала на основной частоте и ее гармониках осталась информация только о фазовой модуляции автодинного сигнала.





Оценка погрешности определения расстояния при подавлении амплитудной модуляции автодинного сигнала проводилась при добавлении в автодинный сигнал случайной составляющей при различных относительных амплитудах: 0.1%, 1%, и 2%. Обратная задача решалась для различных наборов спектральных составляющих при различных фазах автодинного сигнала  $\theta$  и начальных фазах  $\varepsilon$ .

Сравнительный анализ решения обратной задачи по определению расстояния до отражателя показал, что демодуляция автодинного сигнала

по амплитуде приводит к уменьшению погрешности в среднем в ~ 5 раз по сравнению с методом анализа автодинного сигнала при подавлении амплитудной модуляции, описанного в [22].

В этом разделе также описано практическое применение разработанной методики, на которую получен патент на изобретение РФ.

<u>В пятом разделе</u> исследована возможность регистрации наноперемещений зонда ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа по фазе автодинного сигнала при модуляции длины волны лазерного излучения.

Для определения наноперемещений отражателя через величину стационарной фазы автодинного сигнала используем отношения 2n и 2n+2или отношения 2n+1 и 2n+3 спектральных гармоник:

$$S_{2n} / S_{2n+2} = (J_{2n}(\sigma)) / (J_{2n+2}(\sigma)), \tag{9},$$

$$S_{2n+1} / S_{2n+3} = (J_{2n+1}(\sigma)) / (J_{2n+3}(\sigma)).$$
(10)

Решение полученных уравнений (9) и (10) относительно неизвестного параметра  $\sigma$ , позволяет записать выражение для определения наноперемещений отражателя через величину стационарной фазы автодинного сигнала  $\theta$  в виде:

$$\theta = \operatorname{arctg}(S_{2n+1} / S_{2n}(J_{2n}(\sigma)) / (J_{2n+1}(\sigma))).$$
(11)

Принимая во внимание, что  $\tau_0 = L/c$ , получаем соотношение для определения наноперемещений отражателя  $\Delta L$ :

$$\Delta L = \theta \cdot \frac{c}{\omega_0} \,. \tag{12}$$

Таким образом, для определения величины наноперемещений отражателя при токовой модуляции длины волны лазерного излучения по амплитудам спектральных составляющих  $S_{2n}$ ,  $S_{2n+2}$ ,  $S_{2n+1}$  и  $S_{2n+3}$  автодинного сигнала, используя уравнения (9) и (10), рассчитывается значение параметра  $\sigma$ . Из соотношения (11) определяется величина стационарной фазы автодинного сигнала  $\theta$ , а, используя выражение (12), с учетом периодичности функции *arctg* определяется величина смещения зонда

Компьютерное моделирование автодинного сигнала при наноперемещениях зонда проводилось при следующих параметрах: длина волны лазерного излучения  $\lambda = 650$  нм; расстояние от лазера до отражающей поверхности зонда L = 10 см.; модуляция длины волны лазерного излучения осуществлялась на величину  $\Delta \lambda = 0.002$  нм; частота модуляции тока лазерного излучения v = 100 Гц; шаг зонда  $\Delta L = 20$  нм.

Поскольку при решении обратной задачи с использованием соотношения (12) стационарная фаза автодинного сигнала  $\theta$  изменяется периодически, проводилось компьютерное моделирование амплитуд спектральных составляющих при перемещении отражателя на величину 1200 нм, соответствующую четырем периодам изменения  $\theta$ . Зависимость четных и нечетных амплитуд Фурье-спектра автодинного сигнала при перемещении зонда (с шагом  $\Delta L = 20$  нм на расстояние 1200 нм) на примере амплитуд второй, третьей и четвертой спектральных гармоник приведена на рисунке 6.



Рисунок 6. Изменение амплитуды второй, третьей и четвертой спектральных гармоник автодинного сигнала при перемещении зонда с шагом ΔL = 20 нм на расстояние 1200 нм

Как следует из приведенного рисунка, наблюдается периодическое изменение амплитуд спектральных составляющих автодинного сигнала, обусловленное свойствами стоячей волны во внешнем резонаторе автодинной системы. При этом имеется область однозначности изменения амплитуды автодинного сигнала при перемещении зонда в пределах четверти длины волны лазерного излучения.

Измерения проводились с использованием электромагнитного транслятора фирмы STANDA модель 8MVT40-13, входящего с состав действующего макета ближнеполевого сканирующего СВЧ микроскопа (рис.7). Основные параметры транслятора: разрешение – 0.083 мкм (полный шаг), 0.01 мкм (1/8 шага); максимальная дистанция перемещения – 13 мм, максимальная скорость перемещения – 0.416 мм/с.



Рисунок 7. Вид экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – держатель зонда ближнеполевого СВЧ зонда, 3 – исследуемый объект, 4 – трансляторе ближнеполевого СВЧ микроскопа

Исключая участок неравномерного движения, на рисунке 8 представлен автодинный сигнал P(t) при токовой модуляции длины волны лазерного излучения, полученный при отражении от зонда, находящегося на расстоянии 10 см от излучателя. На рисунке 8 также представлен Фурьеспектр S(f) зарегистрированного автодинного сигнала.





На рисунке 9 приведены результаты измерений по описанной выше методике наноперемещений зонда  $\Delta L$  при заданной величине шага зондового транслятора. При этом учитывалась периодичность изменения стационарной фазы автодинного сигнала.

В диссертации показано, что погрешность определения величины наноперемещений по набору спектральных составляющих спектра автодинного сигнала предложенным методом не превышает 15%.

Таким образом, применение модуляции длины волны излучения позволяет создать лазерную автодинную систему измерения наносмещений без использования наложения на объект дополнительных механических вибраций.



Рисунок 9. Зависимость наноперемещений зонда при заданной величине шага 80 нм зондового транслятора (*n* – число шагов)

При измерении диэлектрической проницаемости на СВЧ с использованием ближнеполевого СВЧ-микроскопа величина диэлектрической проницаемости определяется по величине коэффициента отражения СВЧизлучения от исследуемого образца. Коэффициент отражения зависит как отвеличины диэлектрической проницаемости образца, так и от величины зазора между зондом ближнеполевого СВЧ-микроскопа и образцом.

В этом случае изменение зазора между зондом и образцом эквивалентно изменению эффективного значения диэлектрической проницаемости образца при фиксированном зазоре.

Выполненные расчеты показывают, что обеспечение измерения величины зазора с погрешностью, соизмеримой с четвертью длины волны лазерного автодина, обеспечивает уменьшение погрешности измерений относительной диэлектрической проницаемости образца до значений меньших 10<sup>-4</sup>. Практическое применение разработанных методик защищено патентами РФ на изобретения.

<u>В заключении</u> сформулированы основные результаты и выводы, полученные в ходе выполнения диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Исследованы особенности формирования автодинного сигнала и изменения амплитуд спектральных составляющих его низкочастотного спектра при больших значениях глубины гармонической токовой модуляции. Определена область однозначности измерений при использовании гармоник высоких порядков низкочастотного спектра автодинной системы для определения по ним расстояния до отражателя.

2. Разработан метод определения амплитуды нановибраций объекта спектру автодинного сигнала частономодулированного по полупроводникового лазерного автодина, позволяющий значительно повысить точность измерений вследствие использования гармонической частотной модуляции излучения лазерного автодина для калибровки использование частотномодулированного системы. Показано, что излучения полупроводникового лазерного автодина позволяет с высокой амплитуду нановибраций определять объекта без точностью использования дополнительного механического возбуждения колебаний с микронной амплитудой в измеряемом объекте.

3. Установлено, что при изменении тока накачки лазерного диода, наряду с изменением фазы автодинного сигнала, будет также изменяться мощность лазерного излучения, что приводит к дополнительной амплитудной модуляции автодинного сигнала. При подавлении амплитудной составляющей автодинного сигнала, связанной с токовой модуляцией лазерного диода, за счет вычитания из измеряемого отношения спектральных составляющих автодинного сигнала, связанных с амплитудной модуляцией, но сохранении в этом отношении модуляции фазы, формируемый сигнал будет иметь вид, аналогичный сигналу, полученному при гармонических вибрациях отражателя. Использование, в этом случае, известных выражений для отношения спектральных составляющих при модуляции фазы автодинного сигнала и подавлении амплитудной модуляции автодинного сигнала на частоте токовой модуляции позволяет уменьшить разброс значений при решении обратной задачи по определению расстояния до отражателя при токовой модуляции длины волны лазерного излучения по сравнению со случаем, когда анализируется сигнал, включающий и амплитудную и фазовую модуляции.

4. Показана возможность применения полупроводникового лазерного автодина с токовой модуляцией длины волны излучения для контроля наноперемещений зонда, входящего в состав ближнеполевого СВЧ автодина. Впервые разработана теория измерений стационарной фазы автодинной системы при токовой модуляции длины волны по гармоническому закону. Показано, что в спектре автодинного сигнала наблюдается периодическое изменение амплитуд его спектральных составляющих, обусловленное свойствами стоячей волны во внешнем резонаторе автодинной системы. Определена область однозначности зависимости отношения спектральных составляющих от величины смещения отражателя при токовой модуляции лазерного диода по спектру автодинного сигнала. Экспериментально получен вид автодинного сигнала при токовой модуляции длины волны излучения при движении зонда с шагом 80 нм. Измерены величины наносмещений зонда, входящего в состав ближнеполевого СВЧ автодина. Показано, что погрешность определения величины наноперемещений по набору спектральных составляющих спектра автодинного сигнала предложенным методом не превышает 15%.

5. Разработан метод определения наноперемещений при модуляции длины волны лазерного излучения, демонстрирующий высокую точность в пределах четверти длины волны излучения лазера.

6. Показано, что погрешность в измерении диэлектрической проницаемости с использованием ближнеполевого СВЧ-микроскопа из-за неточности в определении величины зазора между зондом ближнеполевого СВЧ-микроскопа и образцом, соизмеримой с четвертью длины волны лазерного автодина, не превышает 10<sup>-4</sup>.

7. Впервые создан ближнеполевой сканирующий СВЧ-микроскоп, сочетающий в себе достоинства полупроводникового лазерного и СВЧ измерительных устройств, работающих в автодином режиме.

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ: В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

- 1. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Астахов Е.И. Определение амплитуды нановибраций с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 2. С. 184-188.
- 2. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Астахов Е.И., Добдин С.Ю. Автодинная интерферометрия для определения расстояния при модуляции длины волны лазерного излучения // Письма в Журнал технической физики. 2016. Т. 42. № 17. С. 78-86.
- 3. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Астахов Е.И. Измерение амплитуды нановибраций частотно-модулированным лазерным автодином // Журнал технической физики. 2013. Т. 83. № 12. С. 152-154.
- 4. Астахов Е.И., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю. Автодинная интерферометрия расстоянияпри модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Физика. 2015. Т. 15. № 3. С. 12-18.
- 5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Астахов Е.И. Математическое обоснование метода измерения параметров микровибраций по спектру лазерного автодинного сигнала // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 1. С. 058-070.

- 6. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Усанова Т.Б., Добдин С.Ю., Астахов Е.И. Методы анализа автодинного сигнала при измерении внутриглазного давления // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2014. № 4 (28). С. 204-212.
- 7. Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, Е. И. Астахов Способ определения амплитуды нановибраций с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина // Патент на изобретение РФ №2520945 Опубликовано: 27.06.2014 Бюл. № 18. Пол решение по заявке № 2013104276 от 01.02.2013.
- 8. Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, Е. И. Астахов, С.Ю. Добдин Способ определения расстояния до объекта // Патент на изобретение РФ № 2 629 651 Опубликовано: 30.08.2017 Бюл. № 25 Заявка № 2016119049 от 17.05.2016.

#### В других изданиях

- Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Астахов Е.И., Добдин С.Ю. Многочастотный метод определения расстояния по высшим спектральным гармоникам полупроводникового лазерного автодина. В сборнике // Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами Материалы Всероссийской научной школы-семинара. Ответственный редактор Д.А. Усанов. 2015. С. 38-41.
- Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Астахов Е.И., Костюченко И.С. Методы измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера при токовой модуляции длины волны излучения // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами Материалы Всероссийской научной школы-семинара. Под редакцией Д.А. Усанова. 2016. С. 28-31.
- 3. Усанов Д.А., Скрипаль Ан.В., Добдин С.Ю., Калинкин М.Ю., Кащавцев Е.О., Астахов Е.И. Полупроводниковые лазерные автодины для определения характеристик движения при микро- и наносмещениях // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами Материалы Всероссийской научной школы-семинара. Под редакцией Д.А. Усанова. 2014. С. 82-87.
- Костюченко И.С., Астахов Е.И., Усанов Д.А., Скрипаль Ан.В. Определение расстояния с помощью полупроводникового лазера при токовой модуляции длины волны излучения // В сборнике: Наноэлектроника, нанофотоника и нелинейная физика доклады XI Всероссийской конференции молодых ученых. 2016. С. 98-99.
- 5. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Костюченко И.С., Добдин С.Ю., Астахов Е.И. Низкочастотный спектр автодинного сигнала при токовой модуляции длины волны лазерного излучения // В сборнике: Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами материалы четвертой Всероссийской научной школы-семинара. Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского. 2017. С. 11-15.

#### Цитируемая литература

- 1. Берштейн И.Л. Об одной схеме с автомодуляцией // Радиотехника. 1946. Т. 1. № 9. С. 63–66.
- 2. Носков В.Я., Смольский С.М. Сто лет автодину: исторический очерк основных этапов и направлений развития автодинных систем. Радиотехника. 2013. № 8. С. 091-101.
- 3. Елисеев П. Г. Введение в физику инжекционных лазеров. М: Наука, 1983. 294 с.

- **4.**Коронкевич В. П., Ханов В. А. Современные лазерные интерферометры. Новосибирск: Наука, Сибир. отд., 1985. 182 с.
- 5. Дубнищев Ю. Н., Ринкевичус Б. С. Методы лазерной доплеровской анемометрии. М.: Наука, 1982. 303 с.
- 6. Семенов А. Т. Инжекционный лазер в режиме автомодуляции// Квантовая эл-ка. 1971. №6. С. 107.
- 7.Koelink M.H., Slot M., F.F.de Mul, et.al. Laser Doppler velocimeter based on the selfmixing effect in a fiber-coupled semiconductor laser: theory // Appl.Opt. - 1992. - V.31. -P.3401-3408.
- **8.** Jentink H.W., F.F. de Mul, et.al. Small laser Doppler velocimetr based on the self-mixing effect in diode laser. // Appl.Opt. 1988. V.27. P.379-385.
- 9. Вагарин В.А. Исследование интерференции оптического излучения в гомодинной лазерной системе с вибрирующим отражателем. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Саратов. 1996 Малыкин Г.Б., Носков В.Я., Смольский С.М. У истоков автодинной тематики в СССР // Радиотехника. 2012. № 6. С. 20–24.
- 10. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Гангнус С. В. Решение обратной задачи для восстановления параметров сложного периодического движения в лазерной гомодинной системе// Автометрия. 2001. №1. С. 117–122.
- **11.** Берштейн И.Л. Воздействие отраженного сигнала на работу лазера. Известия вузов. Радиофизика. 1973. Т. 16. № 4. С. 526–530.
- 12. Басов Н. Г., Морозов В. Н. Теория динамики инжекционных квантовых генераторов// ЖТФ. 1969. Т.57. С. 617–627.
- 13. Басов Н. Г., Морозов В. Н., Ораевский А. Н. К теории динамики одномодового квантового генератора// Квант. эл-ка. 1974. Т.1. №10. С. 2264–2274.
- 14. Казаринов Р. Ф., Сурис Р. А. Гетеродинный прием света инжекционным лазером// ЖТФ. 1974. Т.66., вып. 3. С. 1067–1078.
- **15.** Сурис Р. А., Тагер А. А. Когерентность и спектральные свойства излучения полупроводникового лазера с внешним отражателем// Квантовая электроника. 1984. Т.11, №4. С. 35–43.
- 16. Гершензон Е. М., Туманов Б. Н., Левит Б. И. Автодинные и модуляционные характеристики инжекционных полупроводниковых лазеров// Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т.23, №5. С. 535–541.
- Anlage, D.E. Steinhauer, B.J. Feenstra, C.P. Vlahacos and F.C. Wellstood Near-field microwave microscopy of materials properties // Microwave Superconductivity Eds. H. Weinstock and M. Nisenoff. – Amsterdam. The Netherlands: Kluwer, 2001. – P. 239–269.
- **18.** Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2014. 136 с
- **19.** Guo D., M.Wang Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement // Applied Optics –. 2007. Vol. 46, № 9. P. 1486–1491.
- **20.** Giuliani G., Norgia M., Donati S. and Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing application // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2002. Vol. 4. P. 283-294.
- **21.** Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., and Rioux M., Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement // Opt. Eng. 40, 10–19 (2001).
- 22. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С. Применение полупроводникового лазерного автодина с модуляцией длины волны излучения для определения расстояния до объекта // Нано- и микросистемная техника. 2009. № 2. С. 43-47.

## АСТАХОВ ЕЛИСЕЙ ИГОРЕВИЧ

### АВТОДИННАЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОЙ ТОКОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

#### ΑΒΤΟΡΕΦΕΡΑΤ

диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 20.10.2017 г. Формат 60х84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать офсетная. Усл. печ. л. 1.0 Тираж 100 экз. Заказ №

> Типография Саратовского университета. 410012, Саратов, Б. Казачья, 112А.