

Председателю диссертационного совета
Д 212.243.05 на базе Саратовского
государственного университета
имени Н.Г. Чернышевского
профессору, д.ф.-м.н.
В.В.Тучину

От инженера НИИМФ
Астахова Елисея Игоревича

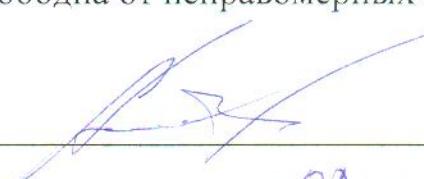
Заявление

Прошу принять к рассмотрению и защите мою диссертацию на тему «Автодинная интерферометрия при гармонической токовой модуляции лазерного излучения», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.21 – лазерная физика, 01.04.03 – радиофизика.

Защита работы проводится впервые.

Я, Астахов Елисей Игоревич, выражаю свое согласие на автоматизированную обработку моих персональных данных, а также гарантирую, что текст моей диссертации не будет изменен и в него не будут внесены технические правки после его размещения на сайте ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Сообщаю, что предлагаемая мною к размещению диссертация свободна от прав третьих лиц, а также свободна от неправомерных заимствований.

 /Астахов Елисей Игоревич

«09» октября 2017 г.

Б. еобен
Член жюри ТК Алишев Г.А.

Е.Астахов

Проректору по НИР ФГБОУ ВО
«СГУ имени Н.Г. Чернышевского»
доктору физ-мат. н., профессору
Короновскому А.А.

От инженера НИИМФ
Астахова Елисея Игоревича

ЗАЯВЛЕНИЕ

Прошу разместить на официальном сайте ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» в сети Интернет мою диссертационную работу «Автодинная интерферометрия при гармонической токовой модуляции лазерного излучения», на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.21 – лазерная физика, 01.04.03 – радиофизика, выполненную в ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского».

Я, Астахов Елисей Игоревич, выражаю свое согласие на автоматизированную обработку моих персональных данных, а также гарантирую, что текст моей диссертации не будет изменен и в него не будут внесены технические правки после его размещения на сайте ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского».

Сообщаю, что предлагаемая мною к размещению диссертация свободна от прав третьих лиц, а также свободна от неправомерных заимствований.

 /Астахов Елисей Игоревич

«09» октябрь 2017 г.


Б. Соловьев
Член секретариата РА Сибирского филиала
Института физики

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по НИР

ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского»

Алексей Александрович Короновский

«21» 10 2016 г.



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения
высшего образования «Саратовский национальный исследовательский государственный
университет имени Н.Г.Чернышевского»

по диссертации Астахова Елисея Игоревича
«Автодинная интерферометрия при гармонической токовой модуляции лазерного
излучения»
на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям
01.04.21 – лазерная физика, 01.04.03 – радиофизика,
выполненной на кафедрах физики твердого тела и медицинской физики факультета нано-
и биомедицинских технологий.

Тема диссертационной работы утверждена на заседании Ученого совета факультета
нано- и биомедицинских технологий от 15.10.2015 года, протокол №2.

Соискатель Астахов Елисей Игоревич в 2012 г. окончил Федеральное
государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального
образования «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по
направлению «Электроника и микроэлектроника» с присвоением академической степени
магистра техники и технологий.

Справки об обучении в аспирантуре и сданных кандидатских экзаменах № 94.1-
2016 от 22.09.2016 г. и № 102.1-2016 г от 10.10.2016 г. выданы Федеральным
государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования
«Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени
Н.Г. Чернышевского».

В период подготовки диссертации соискатель обучался в аспирантуре ФГБОУ ВО
«СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по специальности 05.27.01 –«Твердотельная
электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на
квантовых эффектах» и работает ассистентом кафедры медицинской физики СГУ.

В период подготовки диссертации соискатель обучался в аспирантуре ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского» по специальности 05.27.01 –«Твердотельная электроника, радиоэлектронные компоненты, микро- и наноэлектроника, приборы на квантовых эффектах» и работает ассистентом кафедры медицинской физики СГУ.

Научные руководители: Усанов Дмитрий Александрович, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», кафедра физики твердого тела, заведующий кафедрой, заслуженный деятель науки РФ, профессор, доктор физико-математических наук и Скрипаль Анатолий Владимирович, ФГБОУ ВО «СГУ имени Н.Г. Чернышевского», кафедра медицинской физики, заведующий кафедрой, профессор, доктор физико-математических наук, представили положительный отзыв о диссертации и соискателе.

Научную экспертизу диссертация проходила на заседании кафедры медицинской физики факультетаnano- и биомедицинских технологий с приглашением специалистов по профилю диссертации из других структурных подразделений СГУ и других образовательных учреждений высшего образования и научных учреждений. На заседании присутствовали:

1. Усанов Д.А., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физики твердого тела,
2. Скрипаль Ал.В., д.ф.-м.н., профессор кафедры физики твердого тела,
3. Скрипаль Ан.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой медицинской физики,
4. Ульянов С.С. д.ф.-м.н., профессор кафедры медицинской физики,
5. Аникин В.М., д.ф.-м.н., профессор, декан физического факультета, зав. кафедрой компьютерной физики и метаматериалов на базе Саратовского филиала института радиотехники и электроники им. В.А.Котельникова РАН,
6. Рябухо В.П., д.ф.-м.н., профессор кафедры оптики и биофотоники,
7. Дербов В.Л., д.ф.-м.н., профессор кафедры теоретической физики,
8. Феклистов В.Б., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела,
9. Пономарев Д.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела,
10. Постельга А.Э., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела,
11. Добдин С.Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела,
12. Калинкин М.Ю., к.ф.-м.н., доцент кафедры медицинской физики,
13. Рытик А.П., к.ф.-м.н., доцент кафедры медицинской физики,
14. Фомин А.В., к.ф.-м.н., научный сотрудник кафедры медицинской физики,
15. Синицына Р.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры медицинской физики,
16. Сагайдачный А.А., к.ф.-м.н., доцент кафедры медицинской физики,
17. Усанов А.Д., к.ф.-м.н., доцент кафедры медицинской физики,

Рецензенты диссертации:

Ульянов Сергей Сергеевич, д.ф.-м.н., профессор кафедры медицинской физики представил положительный отзыв,

Постельга Александр Эдуардович, к.ф.-м.н., доцент кафедры физики твердого тела представил положительный отзыв.

После доклада соискателя в процессе обсуждения работы соискателю были заданы следующие вопросы:

д.ф.-м.н. Рябухо В.П. Я хочу спросить про заявленную высокую точность измерений. Высокая точность определяется точностью прямых измерений. Что у вас является прямым измерением, с какой погрешность вы проводили измерения длины волны лазерного излучения?

Ответ. Длина волны измерялась Эшелле-спектрометром, в паспорте которого указана погрешность измерений 0.002 нм. В нашем случае длина волны излучения лазера составила 654 нм. В ходе работы было установлено, что область однозначного определения корней функции Бесселя для расчета фазы и в последующем расстояния лежит в диапазоне четверти длины волны. Т.е. 162 нм и в этом диапазоне теоретически метод позволяет измерять перемещение с точностью до 1 нм. В реальных условиях это несколько затруднено из-за неконтролируемых изменений фазы, связанных с изменением температуры, скачков напряжения и возникновением шумов.

д.ф.-м.н. Рябухо В.П. У вас гармоническая токовая модуляция сигнала лазера, скажите как изменится сигнал, если у вас отражатель изменит свое положение?

Ответ: Есть пример такой ситуации на слайде 23. В левой части слайда представлен сигнал и его спектр в начальной точке, а в правой части слайда после смещения микротранслятора с шагом 20 нм. Обратите внимание, как значительно изменились фаза сигнала и его спектр.

д.ф.-м.н. Дербов В.Л. Вы интересовались вопросом, каким пунктам паспорта специальности соответствует ваша работа?

Ответ: в паспорте специальности лазерная физика прописано: Исследование когерентного оптического излучения и его применения в различных областях науки, техники. А в области исследования указано: Физические и технические основы лазерных технологий и устройств для различных областей науки и техники, включая высокоточные оптические измерения, модификацию и обработку материалов, локацию, лазерную медицину и др.

Что касается радиофизики, то в паспорте специальности указано: Анализ колебаний и волн различной физической природы и разных частотных диапазонов, а также их применение в фундаментальных и прикладных исследованиях. А в области исследования указано: разработка теоретических и технических основ новых методов и систем связи,

навигационных, активных и пассивных локационных систем, основанных на использовании излучения и приема волновых полей различной физической природы и освоении новых частотных диапазонов.

д.ф.-м.н. Дербов В.Л Вы анализировали работы, проводившиеся в вашем коллективе. А в других коллективах в мире в России этой тематикой занимались?

Ответ: Да, конечно. В критическом анализе работы указаны работы известных зарубежных ученых из Италии по исследованию автодинного эффекта. В нашей стране – это ученые из Новосибирска, Екатеринбурга и других, которые исследовали применение линейной токовой модуляции для измерения расстояний и наносмещений.

к.ф.-м.н., доцент Д.В. Пономарев: Между какими точками измерялось расстояние?

Ответ: Измерялось расстояние между зондом и исследуемым образцом, на которое смещался образец при движении микротранслятора.

к.ф.-м.н., доцент А.Э. Постельга: Каким образом были закреплены друг относительно друга лазерный автодин и зонд СВЧ автодина и на каком расстоянии они находились друг от друга?

Ответ: Использовалась конструкция позволяющая жестко закрепить лазерный диод и зонд СВЧ автодина. Расстояние между ними было менее одного сантиметра.

к.ф.-м.н., доцент А.Э. Постельга: Каким образом решалась проблема соосности двух автодинов, иными словами: каким образом излучения обоих устройств были направлены в одну точку?

Ответ: Лазерный автодин возможно расположить под углом относительно нормали к поверхности исследуемого образца, направив его в точку зондирующую СВЧ излучением, при этом сохраняется автодинный эффект благодаря высокой чувствительности лазерного автодина к отражаемому излучению.

д.ф.-м.н., профессор А.В. Скрипаль: Каким образом коэффициент отражения оптического излучения будет влиять на результаты измерений?

Ответ: На результаты измерения это не повлияет, поскольку величина коэффициента отражения не будет вносить существенных изменений на фазу автодинного сигнала, при этом величину этого изменения можно контролировать.

к.ф.-м.н., доцент А.Э. Постельга: Зачем вы контролировали амплитудную модуляцию?

Ответ: Амплитудная модуляция исключалась на частоте модуляции для уменьшения уровня шумов.

к.ф.-м.н., доцент М.Ю. Калинкин: Вопрос по слайду. Вы отметили, что измерение нановибраций по одной гармонике в спектре автодинного сигнала нельзя осуществить, что вы имели в виду?

Ответ: Я имел в виду, что в такой ситуации необходимо возбуждать дополнительные механические колебания, заранее известные, чтобы произвести измерение нановибрации. Амплитуду дополнительных колебаний не всегда можно точно контролировать, поэтому мною были отмечены преимущества токовой модуляции длины волны излучения лазерного автодина, позволяющие точно контролировать и поддерживать изменение фазы автодинного сигнала, тем самым увеличивая точность измерения нановибраций.

д.ф.-м.н. Ал.В. Скрипаль: Какие у вас публикации по теме диссертационной работы?

Ответ: К моменту написания диссертационной работы у меня 9 публикаций из них 5 публикаций из рекомендованного списка ВАК, 3 публикации реферируемые системами Scopus и Web of science, так же патент РФ на изобретение.

д.ф.-м.н. С.С. Ульянов: Возможно ли использовать такую систему состоящую из полупроводникового лазера и СВЧ излучателя для исследования полупроводниковых образцов? Не влияют ли эти виды излучения на работу полупроводниковой структуры.

Ответ: Мощность излучения низкая, поэтому влияние будет пренебрежимо мало. Но если и будет существовать необходимость учета влияния, то возможно подобрать лазерный автодин и СВЧ – излучатель работающих на других частотах.

д.ф.-м.н. В.М. Аникин: на какой частоте работает СВЧ-автодин и чем обусловлен выбор этой частоты.

Ответ: СВЧ-автодин работает в 3-х сантиметровом диапазоне. Выбор диапазона обусловлен возможностью создания в этом диапазоне частот высокоэффективного измерительного устройства на СВЧ-автодине.

По итогам обсуждения диссертации принято следующее заключение:

Диссертационная работа Астахова Елисея Игоревича «Автодинная интерферометрия при гармонической токовой модуляции лазерного излучения» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.21 – лазерная физика, 01.04.03 – радиофизика, представляет законченное исследование, посвященное исследованию особенностей формирования автодинного сигнала при гармонической токовой модуляции и разработке методов измерения по низкочастотному спектру автодинного сигнала расстояния, наносмещений и нановибраций, и их применению для регистрации наносмещений зонда ближнеполевого

сканирующего СВЧ-микроскопа, и соответствует требованиям п.9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» для кандидатских диссертаций.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью расширения теоретических представлений о физике автодинных систем и их использования 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 излучения и анализа изменения амплитуд его спектральных составляющих.

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

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;

Разработан метод определения расстояния при модуляции длины волны излучения автодинного генератора, показана универсальность применения соотношений, связывающих фазу автодинного сигнала и амплитуды спектральных гармоник автодинного сигнала, в случае использования подавления амплитудной модуляции автодинного сигнала на частоте токовой модуляции, позволяющего исключить из измеряемого сигнала спектральные составляющие, обусловленные амплитудной модуляцией;

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

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.

Практическая значимость полученных результатов заключается в следующем:

Разработанный метод определения амплитуды нановибраций объекта по спектру автодинного сигнала частотно-модулированного 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 полупроводникового лазера 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.

Личный вклад автора выразился 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.

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.

Апробация работы. Работа выполнена на кафедре физики твердого тела и кафедре медицинской физики Саратовского государственного университета имени Н.Г. Чернышевского 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);

Всероссийской научной школе-семинаре «Взаимодействие сверхвысокочастотного, терагерцового и оптического излучения с полупроводниковыми микро- и наноструктурами, метаматериалами и биообъектами» (г. Саратов, 2014, 2015, 2016).

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- иnanoструктурами и композитами», 2014-2016 годы).

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

Диссертационная работа Астахова Е.И. соответствует специальностям 01.04.21 – лазерная физика, 01.04.03 – радиофизика.

Материалы диссертации в полном объёме изложены в 10 печатных работах, в том числе 6 работ в изданиях, входящих в перечень ВАК, 6 статей в журналах, 3 из которых включены в базу данных SCOPUS, материалы 3 докладов на Всероссийских конференциях, получен патент на изобретение РФ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ИЗЛОЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ:

В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. 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.

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. Определение амплитуды нановибраций с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина // Квантовая электроника. 2014. Т. 44. № 2. С. 184-188.

4. Астахов Е.И., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю. Автодинная интерферометрия расстояния при 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. Патент на изобретение РФ №2520945 Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль, Е. И. Астахов Способ определения амплитуды нановибраций с помощью частотно –

модулированного полупроводникового лазерного автодина Опубликовано: 27.06.2014 Бюл. № 18. Пол решение по заявке № 2013104276 от 01.02.2013.

В других изданиях

1. 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.
2. 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. Усanova. 2016. С. 28-31.
3. Усанов Д.А., Скрипаль А.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. Усanova. 2014. С. 82-87.

Диссертация «Автодинная интерферометрия при гармонической токовой модуляции лазерного излучения» Астахова Елисея Игоревича рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальностям 01.04.21 – лазерная физика, 01.04.03 – радиофизика как удовлетворяющая критериям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», для кандидатских диссертаций.

Присутствовало на заседании 7 докторов наук и 10 кандидатов наук по профилю диссертации.

Результаты открытого голосования: «за» - 17 чел.; «против» - нет, «воздержалось» - нет (протокол № 3 от «21» октября 2016 г.).

Председатель заседания



Ульянов Сергей Сергеевич,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры медицинской
физики

