

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики твердого тела

**Измерения ускорения внешнего отражателя с помощью лазерного
автодина**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

студента

4 курса

411 группы

направления 12.03.04 Биотехнические системы и технологии

факультета nano- и биомедицинских технологий

Полухина Андрея Сергеевича

Научный руководитель

профессор, д. ф.-м. н.

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

Скрипаль Анатолий Владимирович

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой, д.т.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

подпись, дата

У

инициалы, фамилия

Саратов 2019

Оптические интерференционные измерения, имея давнюю и плодотворную историю, внесли значительный вклад в развитие физической и инструментальной оптики, а также в совершенствование измерительной техники и метрологии.

Лазерная интерферометрия - это хорошо зарекомендовавший себя метод, широко используемый в промышленных и лабораторных условиях для измерения смещения, скорости (как твердых мишеней, так и жидкостей), вибрации и расстояния.

Лазерные автодинные системы, основанные на регистрации изменения мощности излучения лазерного диода при возвращении части излучения в его резонатор, обладают способностью к измерению микро- и наносмещений отражателя, используя для формирования интерференционного сигнала в качестве опорного канала свой собственный резонатор – активную область лазерного диода. Вследствие этого, значительное упрощение схемы измерительной системы позволяет активно применять лазерный автодин для решения многочисленных задач по определению расстояния до объекта, угла поворота, амплитуды вибраций, величины деформаций при микро- и наносмещениях, скорости и ускорения движения отражателя.

Для определения параметров расстояния или движения отражателя используются различные методы анализа автодинного сигнала, регистрируемого как изменение мощности излучения лазерного диода на фотодиоде, встроенном в систему обратной связи по току питания лазерного диода. К числу таких методов относят прямой подсчет количества интерференционных максимумов на автодинном сигнале, метод наименьших квадратов, а также спектральные методы анализа формы автодинного сигнала. Достигнутые успехи спектрального анализа формы автодинного сигнала позволяют определять скорость движения объект, амплитуду вибраций, а также величину нано- и микросмещений и расстояние при модуляции тока питания лазерного диода.

В одном из первых способов измерения ускорения, применялась методика, с использованием инерционной массы в виде шара и датчиков перемещения. Способ заключается в следующем: под действием измеряемого ускорения инерционная масса приходит в движение, что приводит к соответствующему изменению деформации мембран. Изменение деформации мембран, в свою очередь приводит к изменению зазоров между основаниями призм и светопоглощающими слоями. А изменение зазоров влечет за собой изменение интенсивности светового потока, отраженного от оснований призм, при этом относительные перемещения мембран, расположенных в прорезях противоположных граней корпуса, будут иметь разные знаки. Недостатком данного способа является невысокая пороговая чувствительность, определяемая жесткостью деформирующихся мембран и величиной инерционной массы.

Также известен способ, реализующий принцип измерения ускорения при помощи электронно-оптического преобразователя, согласующего устройства, инерционной массы, оптико-электронного преобразователя и компьютера. Суть метода в том, что при действии ускорения инерционная масса перемещается относительно исходного положения и оказывает давление на отрезки оптического волокна. Интенсивность светового потока в этих отрезках изменяется за счет появления микроизгибов, вносящих потери в передаваемый свет, причем интенсивность выходного света зависит от величины давления инерционной массы на участки волокна, проходящего внутри корпуса. По изменению интенсивности света определяют значение ускорения. Недостатком известного способа и реализующих его устройств является погрешность измерений, связанная с изменением свойств и разрушением оптического волокна в результате многократных микроизгибов.

Известен способ, заключающийся в освещении объекта оптическим излучением, преобразовании отраженного сигнала в автодинный сигнал и регистрации его мощности. После чего сигнал оцифровывают и анализируют, значение ускорения объекта определяют в результате решения

обратной задачи. Решение задачи заключается в определении минимума функционала, получаемого при суммировании квадратов отклонений экспериментальных $P_{\text{эксп}}$ и теоретических $P_{\text{теор}}$ величин автодинного сигнала для различных временных интервалов. При решении этого уравнения, возникает проблема определения глобального минимума при наличии нескольких локальных минимумов, что является недостатком этого метода. Для поиска и анализа интересующего минимума можно воспользоваться численными методами безусловной оптимизации.

Целью настоящей работы явилось измерение ускорения внешнего отражателя при равномерно ускоренных микро- и наноперемещениях объекта, с помощью лазерного автодина.

Для этого, был применён новый метод, основанный на Фурье-анализе спектра автодинного сигнала. Ранее при определении ускорения применяли метод оптимизации (метод наименьших квадратов).

Выпускная квалификационная работа содержит 4 главы:

- 1) Полупроводниковый лазерный автодин.
- 2) Измерение скорости при наносмещениях по спектру автодинного сигнала.
- 3) Современные методы измерения ускорения.
- 4) Экспериментальная часть.

Полупроводниковым лазерным автодином – называется система, состоящая из полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью (ВООС), свойства которого определяются параметрами лазера и влиянием отраженного излучения. Чувствительность автодинной системы к возвращенному излучению чрезвычайно высока и на основе этого эффекта созданы методы контроля динамических характеристик отражателя. Поэтому исследование механизма взаимодействия полупроводникового лазера с обратным светом является важной задачей.

Полупроводниковый лазер с внешней оптической обратной связью можно описать в рамках модели составного резонатора Лэнга и Кобаяши.

Теоретическая модель Лэнга и Кобаяши отражает основные эффекты, наблюдаемые экспериментально. На рис. 1.1 изображена модель составного резонатора полупроводникового лазера с обратной связью, которая использована для теоретического анализа влияния обратной связи на искажение интерференционного сигнала.

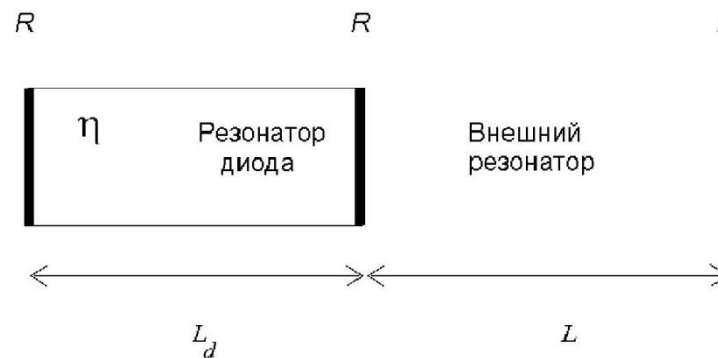


Рис. 1. Модель составного резонатора полупроводникового лазера

Рассмотрим способ определения скорости движения объекта по спектру автодинного сигнала и зависимости её от частоты. Допустим, что объект движется прямолинейно равномерно и с постоянной скоростью V и вектор скорости коллинеарен направлению распространения лазерного луча. В этом случае зависимость времени обхода лазерным излучением внешнего резонатора от времени примет следующий вид:

$$\tau(t) = \frac{2}{c}(L_0 + \vartheta \cdot t) \quad , (1)$$

Тогда переменную, нормированную автодинного сигнала можно представить в виде

$$P = \cos\left(\frac{2\omega_0}{c}(L_0 + \vartheta \cdot t)\right) \quad , (2)$$

учитывая, что $\omega_0 = \frac{2\pi \cdot c}{\lambda_0}$, где λ_0 – длина волны излучения лазерного диода без обратной связи, тогда окончательно получаем:

$$P = \cos\left(\frac{4\pi \cdot \vartheta \cdot t}{\lambda_0} + \frac{4\pi \cdot L_0}{\lambda_0}\right) \quad , (3)$$

Автодинный сигнал, рассчитанный в соответствии с выражением (3) для следующих параметров: $\lambda_0 = 650$ нм, $L_0 = 10$ см, $V = 10$ мкм/с, приведен на рис. 2, а на рис. 3 – его спектр.

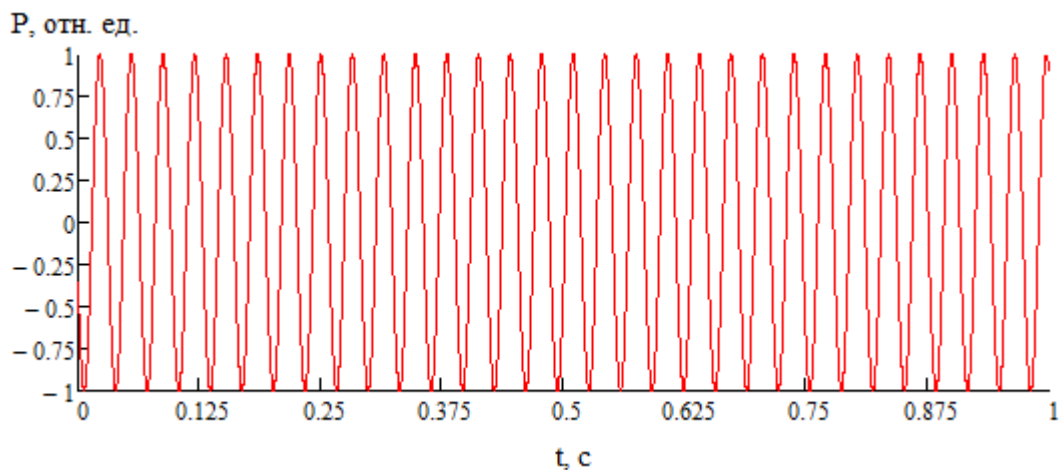


Рис. 2. Рассчитанная переменная нормированная составляющая автодинного сигнала при поступательном движении отражателя с постоянной скоростью

$$V = 10 \text{ мкм/с}$$

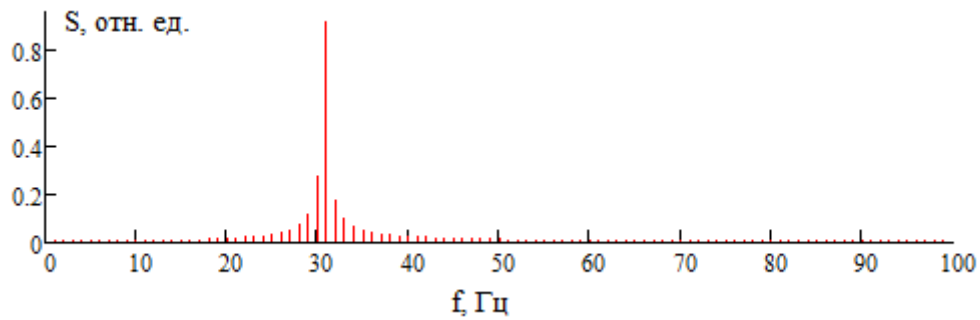


Рис. 3. Спектр переменной нормированной составляющей автодинного сигнала, приведенного на рис. 2.

Сопоставляя полученное выражение для переменной нормированной составляющей автодинного сигнала с гармонической функцией косинуса в виде

$$F = \cos(\Omega \cdot t + E) \quad , (4)$$

где E – начальная фаза, и учитывая, что $\Omega = 2\pi \cdot \nu$, где ν – частота, получаем:

$$E = \frac{4\pi \cdot L_0}{\lambda_0}, \quad \nu = \frac{2 \cdot \vartheta}{\lambda_0}, \quad (5)$$

откуда

$$\vartheta = \frac{1}{2} \lambda_0 \nu \quad (6)$$

Иными словами, скорость движения внешнего отражателя можно получить, определив частоту переменной нормированной составляющей автодинного сигнала по ее спектру с использованием выражения (6).

Ранее было определено ограничивающее обстоятельство, обнаруженное в процессе изучения скорости. Оказалось, что при

уменьшении скорости движения объекта частота переменной составляющей автодинного сигнала линейно уменьшается, это следует из выражения, связывающего частоту переменной составляющей автодинного сигнала и скорость движения объекта.

Измерения проводились на установке, блок-схема которой представлена на рисунке 4. В состав установки входили полупроводниковый автодин на лазерном диоде RLD-650(5) с длиной волны 654 нм – 1. Излучение лазерного автодина фокусировалось на поверхность отражателя – 4, закрепленного на пьезокерамике – 5, при этом диаметр пятна лазерного излучения на поверхности объекта составлял 1 мм. Ускоренное движение отражателя осуществлялось с помощью генератора сигналов, встроенного в лабораторную станцию виртуальных приборов NI ELVIS – 3. Рабочий режим тока питания лазерного диода задавался блоком управления током питания – 2.

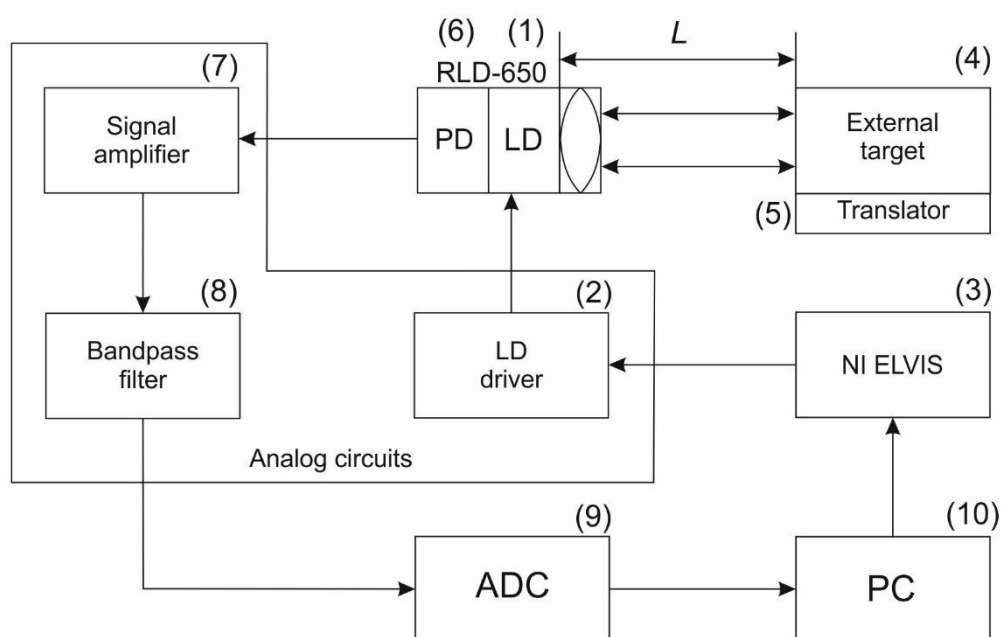
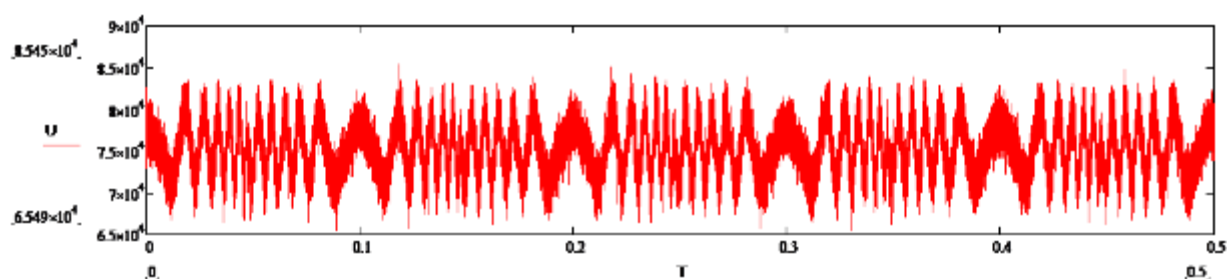


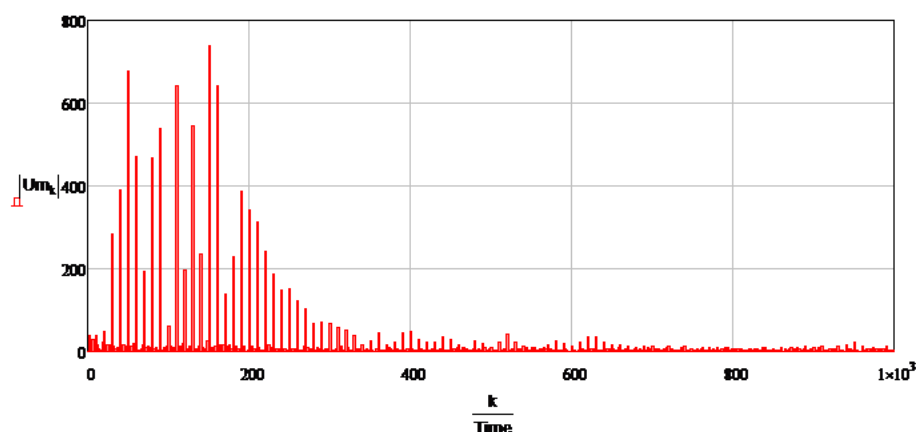
Рис. 4. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – лазерной автодин, 2 – блок управления током питания, 3 – генератор сигналов на базе платформы NI ELVIS, 4 – внешний отражатель, 5 – пьезокерамика, 6 – фотоприемник, 7 – усилитель сигнала, 8 – полосовой фильтр, 9 – АЦП, 10 – компьютер

Отраженное от внешнего отражателя излучение направлялось в резонатор лазера, изменение мощности которого фиксировалось фотоприемником – 6. Продетектированный с фотоприемника сигнал проходил через усилитель сигнала – 7, фильтр переменного сигнала – 8 и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя – 9 (с частотой дискретизации 100 кГц), соединенного с компьютером – 10. Изменение ускорения задавалось скоростью изменения напряжения, прикладываемого к пьезокерамике.

На рис. 5 и 6 приведены измеренные автодинные сигналы (а) и их спектры (б) для случая развертки напряжения по квадратичному закону в диапазоне от 0 до 0.5 В и в диапазоне от 0 до 1В соответственно, за время 50 мсек. По достижению максимального ускорения напряжения на пьезокерамике начинало уменьшаться по квадратичному закону до достижения нулевого значения. Для увеличения точности измерений развертка повторялась пять раз.

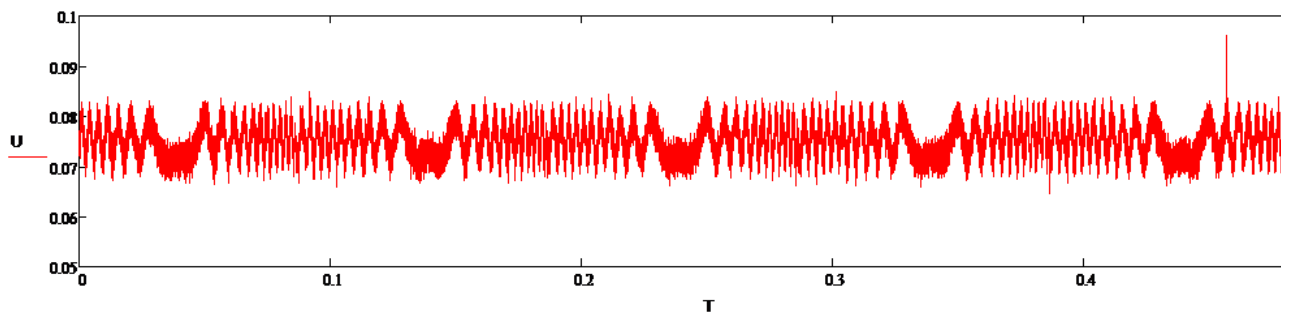


а)

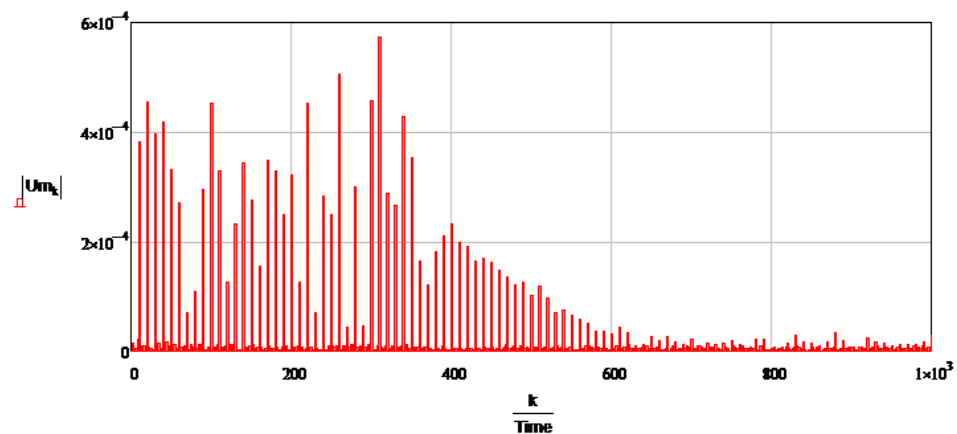


б)

Рис. 5. Автодинный сигнал (а) и его спектр (б) для случая развертки напряжения в диапазоне от 0 до 0.5 В.



а)



б)

Рис. 6. Автодинный сигнал (а) и его спектр (б) для случая развертки напряжения в диапазоне от 0 до 1 В.

Измеренные значения частот ν_{out} составили 200 Гц и 400 Гц соответственно для случаев, представленных на рис. 5 и 6. Вычисленные ускорения составили $a = 1.3 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$ и $a = 2.6 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}^2$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При использовании лазерных автодинов метод измерения ускорения реализуется как фазовый метод, что позволяет избежать необходимости проведения калибровки при таких измерениях. В качестве калибровочной величины используется длина волны лазерного излучения, с которой и сравниваются величины смещений при движении объекта с ускорением.

Традиционные методы измерения ускорения по изменению положения экстремумов на временной оси, требуют значительных усилий по обработке автодинного сигнала: фильтрации и выделения экстремумов. Предлагаемый метод измерения ускорения по спектру автодинного сигнала использует хорошо зарекомендовавший себя машинный метод Фурье-анализа, который широко используется для обработки сигналов сложной формы.

В ходе работы показано, что для наиболее распространенного случая движения объекта с нулевой начальной скоростью наблюдается линейная зависимость спектральной составляющей ν_{out} в конце интервала наблюдения от величины ускорения. Определены особенности метода измерения ускорения при движении объекта с ненулевой начальной скоростью. Экспериментально реализован случай движения объекта по квадратичному закону. Представлены результаты измерений ускоренного движения объекта по спектру автодинного сигнала.