

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

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

Кафедра физики твердого тела

**«МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ УСКОРЕНИЯ С  
ПОМОЩЬЮ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО  
ЛАЗЕРНОГО АВТОДИНА»**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 4051 группы  
направления 11.03.04 «Электроника и микроэлектроника»  
Института физики

**Киселева Ивана Алексеевича**

Научный руководитель

профессор, д.ф.- м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. 15.06.22

подпись, дата

Ан.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор, д.ф.- м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. 15.06.2022

подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2022

## **Введение**

Лазерное доплеровское измерение скорости (LDV) и лазерная доплеровская виброметрия – это хорошо известные методы измерения, широко используемые для точных дистанционных измерений скорости жидкостей, а также для точного измерения перемещения, скорости и ускорения твердых тел. Такими типами приборов можно измерить скорость и смещение поверхности, просто используя луч света. Востребованные функции, такие как высокая чувствительность, высокая точность и бесконтактная работа, привели к большому распространению этих инструментов. Они успешно применяются в области классической механики, модального анализа, анализа вибраций и в медицине, с очевидными преимуществами по сравнению с другими «классическими» датчиками, такими как акселерометры. Помимо явных преимуществ предлагаемых системами LDV некоторые недостатки практически ограничили область их применения. Основные недостатки:

- большие габариты оптической головки;
- вес;
- необходимость точного оптического выравнивания;
- высокая стоимость.

Высокая стоимость вызвана за счет использования большого количества оптических компонентов (линзы, зеркала, светоделители и даже акустооптические модуляторы).

По вышеуказанным причинам были проведены исследования для того, чтобы увеличить распространение лазерных методов за счет снижения сложности и стоимости систем.

Большое влияние в этой области оказала разработка метода интерферометрии с лазерным автодином (или с оптической обратной связью), который способен обеспечить высокие характеристики с чрезвычайно простой и недорогой экспериментальной установкой.

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.

В этом подходе, также называемом интерферометрией с обратной связью или индуцированной модуляцией, лазерный источник действует как чувствительный детектор для длины пути  $2ks$  (где  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $s$  — расстояние до цели), пройденного светом до цели, и назад, используя так называемую инъекцию-обнаружение. В первых демонстрациях этого принципа использовались газовые лазеры для обнаружения доплеровского сдвига, вызванного движущимся удаленным отражателем.

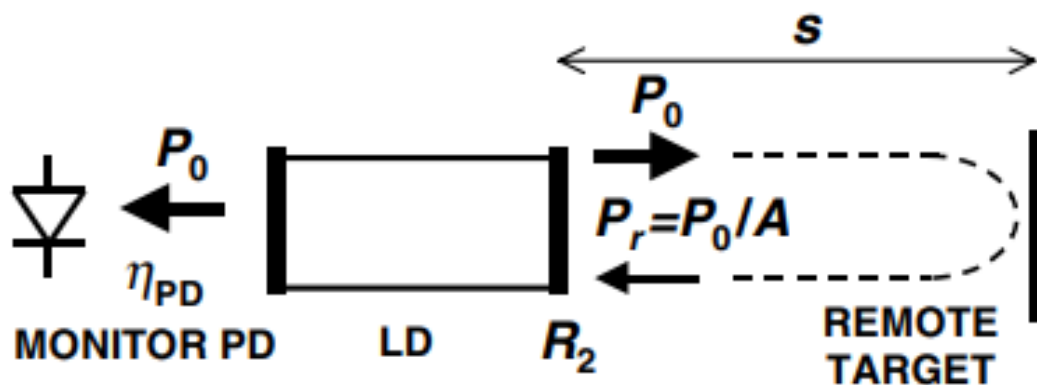


Рисунок 1. Обычная конфигурация автодина.

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.

**Целью** данной выпускной работы являлась практическая реализация одного из методов измерения ускорения с помощью лазерного автодина для выявления зависимости ускорения от амплитуды (напряжения).

Чтобы достигнуть заданной цели были поставлены следующие задачи:

- 1) сборка автодинной установки для получения сигнала;
- 2) формирование сигнала нужной формы;
- 3) калибровка излучения лазерного автодина;
- 4) обработка полученных сигналов для получения автодинного спектра;
- 5) вычисление ускорения по полученным спектрам;
- 6) построение экспериментальной и теоретической зависимостей и их сравнение.

Работа занимает 41 страницу и включает в себя 17 рисунков, список использованных источников, состоящий из 42 наименований.

### **Основное содержание работы**

**Во введении** рассматривается актуальность работы, определяются цель и задачи исследования. Описываются преимущества лазерных методов измерения.

**Первая глава** посвящена рассмотрению полупроводниковых лазерных автодинов. Выясняются преимущества лазерных автодинов и их особенности.

Описывается модель составного резонатора, а также рассматриваются режимы обратной связи.

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.

Автодинные системы нашли применение в процессе контроля перемещений. В частности, продемонстрирована их высокая чувствительность к микро- и нановибрациям и смещениям [1,2], описан способ измерений сверхмалых скоростей теплового расширения твердых тел в ограниченном временном интервале, проводимых на основе анализа низкочастотного спектра автодинного сигнала [3]. Область применения автодинных измерителей существенно расширяется при проведении измерений с высокой степенью локальности. В частности, удается определить параметры вибраций биологических объектов, непосредственное измерение параметров движений которых достаточно сложно вследствие их труднодоступности [4-7]. Однако при увеличении локальности отражения от объекта исследований может расти уровень внешней оптической обратной связи, которая оказывает существенное влияние на форму автодинного сигнала полупроводникового лазерного излучателя и, как результат, на точность определения параметров движения отражателя в автодинных системах [8]. Одним из преимуществ автодинной системы на полупроводниковом лазере является возможность создания систем измерения вибраций и перемещений методом, основанным на сравнении с эталоном, в качестве которого используется длина волны излучения полупроводникового лазера. В частности, таким образом измеряются

величина смещения или расстояние до отражателя. Если величина смещения существенно меньше длины волны лазерного излучения, то можно применить метод, основанный на возбуждении дополнительных колебаний с известными характеристиками [1,9].

Полупроводниковый лазер с внешней оптической обратной связью можно описать в рамках модели составного резонатора Лэнга и Кобаяши [10]. Теоретическая модель Лэнга и Кобаяши отражает основные эффекты, наблюдаемые экспериментально. На рис. 2 изображена модель составного резонатора полупроводникового лазера с обратной связью, которая использована для теоретического анализа влияния обратной связи на искажение интерференционного сигнала.

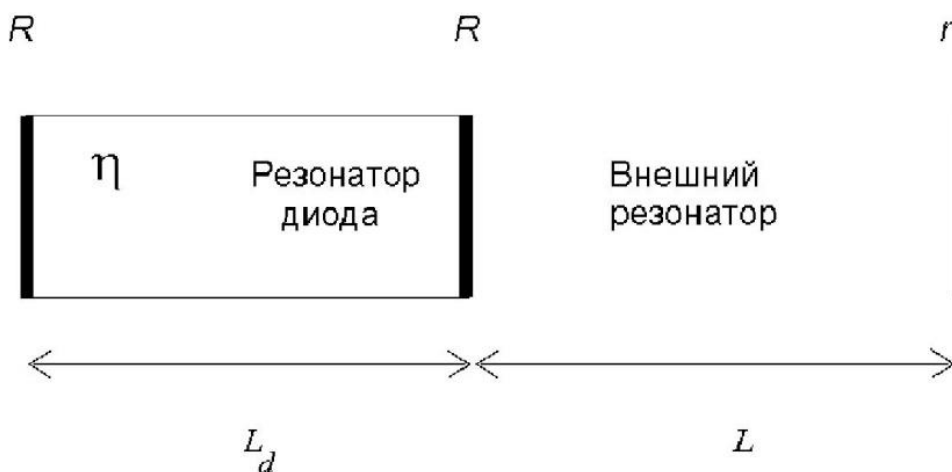


Рисунок 2. Модель составного резонатора полупроводникового лазера.

Оптическая обратная связь в лазерном диоде - тема, которая изучалась долгое время как теоретически, так и экспериментально. Ранее основное внимание уделялось классификации различных режимов обратной связи, модификации оптического спектра и характеристикам ВЧ-шума лазерного диода с обратной инжекцией. После этого были разработаны экспериментальные установки, ориентированные на зондирование, и предложены подходящие теоретические анализы.

**Во второй главе рассмотрены** методы измерения ускорения. Описаны преимущества и недостатки каждого из методов. Рассмотрен метод определения ускорения.

В одном из первых способов измерения ускорения, применялась методика, с использованием инерционной массы в виде шара и датчиков перемещения (см. патент RU №2017159, МПК G01P 15/08).

Также известен способ, реализующий принцип измерения ускорения при помощи электронно-оптического преобразователя, согласующего устройства, инерционной массы, оптико-электронного преобразователя и компьютера (см. патент RU №2010235, МПК G01P 15/08).

Известен способ, заключающийся в освещении объекта оптическим излучением, преобразовании отраженного сигнала в автодинный сигнал и регистрации его мощности (см. RU2420746, МПК G01P15/093).

В одном из методов использовался лазерный автодин с системой датчиков ультра-небольшого-угла, характеризующийся высоким разрешением детектирования и широким диапазоном измерений [11]. В нем используется технология измерения малого-угла, в результате чего могло быть определено ускоренное движение объекта, совершающего микро- и наноперемещения.

Ранее при определении ускорения применялся метод оптимизации (метод наименьших квадратов) [12-13].

Способ определения скорости движения объекта включает облучение лазерным излучением объекта, преобразование отраженного от него излучения в электрический сигнал, разложение сигнала в спектральный ряд и измерение частоты выбранных гармоник. При этом отраженный сигнал преобразуют в автодинный сигнал, обеспечивая обратную оптическую связь путем направления отраженного пучка в резонатор лазерного диода, в спектральном ряде выбирают максимальную гармонику, скорость движения определяют из приведенного математического соотношения. Система, состоящая из

полупроводникового лазера и внешнего отражателя, сочетает функции генератора и детектора фазы электромагнитной волны в одном устройстве. Возвращенная в диодный резонатор внешним отражателем волна приводит к изменению концентрации носителей заряда в активной среде, а также связанному с концентрацией показателя преломления активной области. Изменение показателя преломления, в свою очередь, вызывает изменение оптической частоты генерации. В силу вышесказанного форма автодинного сигнала будет отличаться от формы интерференционного сигнала, формируемого таким же движением отражателя в интерференционной системе с развязкой от источника излучения [14-15].

**В 3 главе описывается** практическая реализация одного из новейших методов измерения ускорения с помощью полупроводникового лазерного автодина.

Измерения проводились на установке, в состав которой входили: полупроводниковый автодин на лазерном диоде с длиной волны 654 нм, отражатель, пьезокерамика, генератор сигналов, встроенный в лабораторную станцию виртуальных приборов NIELVIS, блок управления током питания, фотоприемник, усилитель сигнала, фильтр переменного сигнала, АЦП, компьютер. Изменение ускорения задавалось скоростью изменения напряжения, прикладываемого к пьезокерамике.

В качестве формы сигнала была выбрана составная функция, которая состояла из трёх временных отрезков.

Измерения автодинного сигнала проводились в диапазоне напряжений от 1 до 6 В, за время 0,5 сек (всего 50000 точек). В результате эксперимента были получены автодинные сигналы при каждом из шести напряжений.

После этого происходила обработка данных. С помощью инструментов приближения и трассировки выбиралась область автодинного сигнала и по ней строился автодинный спектр с различными гармониками.

По увеличенному в масштабе участку сигнала были определены начальная и конечная точки, на которых наблюдалось ускорение. Также с помощью программы были построены автодинные спектры для всех 6 случаев. Также на данном этапе был вычислен период  $T$ , который в дальнейшем понадобился для расчёта ускорения.

В эксперименте ускорение высчитывалось по формулам:

$$v = \frac{f \cdot \lambda_0}{2}, \quad (1)$$

где  $f$ - частота,  $\lambda_0$ - длина волны лазерного автодина (const),  $v$ - скорость.

После определения скорости, можно посчитать ускорение по формуле:

$$a = \frac{v}{T}, \quad (2)$$

Где  $T$ -период,  $a$ - ускорение, которое в результате эксперимента и искалось.

После завершения обработки данных были получены ускорения для всех 6 случаев.

По этим данным строилась зависимость ускорения от амплитуды (напряжения).

Из данной зависимости было получено, что ускорение с увеличением напряжения линейно возрастает.

## **Заключение**

Используемый в эксперименте метод измерения ускорения по спектру автодинного сигнала использует хорошо зарекомендовавший себя машинный метод Фурье-анализа, который широко используется для обработки сигналов сложной формы.

Цель работы была достигнута через пошаговую реализацию поставленных задач. В результате анализа и обработки данных были получены автодинные спектры, по которым были вычислены ускорения для разных случаев. В ходе проведения практической части были построены экспериментальная и теоретическая зависимости ускорения от амплитуды, в процессе сравнения которых были выявлены отличия друг от друга. Различия между данными зависимостями объясняются тем, что в собранной ранее автодинной системе наблюдается такой эффект как резонанс. Появление данного явления обусловлено тем, что пьезокерамика закреплена на тонкой подложке, которая и вводит систему в резонанс.

### Список использованных источников

1. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Вагарин В. А. Определение амплитуды колебаний оптическим гомодинным методом по высшим гармоникам // ПТЭ. 1994. № 6. С. 162–165.
2. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение нанометровых вибраций полупроводниковым лазером на квантоворазмерных структурах, работающим в автодинном режиме // Письма в ЖТФ. 2003. № 9. С. 51–57.
3. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Камышанский А. С. Измерение скорости движения объекта по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах // Микросистемная техника. 2004. № 2. С. 19–23.
4. Усанов Д. А., Мареев О. В., Скрипаль А. В., Камышанский А. С. Измерение амплитуды колебаний барабанной перепонки по спектру автодинного 130 Д. А. Усанов, А. В. Скрипаль. Полупроводниковые лазерные автодины сигнала полупроводникового лазера на квантоворазмерных структурах // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2004. № 8–9. С. 94–97.
5. Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Вагарин А. Ю., Скрипаль Ан. В., Потапов В. В., Шмакова Т. Т., Мосияш С. С. Лазерная автодинная интерферометрия динамических параметров биообъектов // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24, вып. 5. С. 39–43.
6. Skripal A. V., Usanov D. A. Semiconductor laser interferometry of eye movements // Proc. SPIE. 2000. Vol. 3908. P. 7–12.
7. Усанов Д. А., Мареев О. В., Скрипаль А. В., Мареев Г. О. Лазерные автодинные измерения параметров движений барабанной перепонки // Рос. журн. биомеханики. 2012. Т. 16, № 1. С. 8–21.
8. Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Авдеев К. С. Изменение спектра сигнала лазерного полупроводникового автодина при фокусировке излучения // Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17, № 2. С. 54–65.

9. Пат. 2208769 Российская Федерация. МПК G01H9/00. Способ определения амплитуд вибраций / Усанов Д. А., Скрипаль А. В. – № 2002111302/28; заявл. 25.04.2002; опубл. 20.07.2003; Бюл. № 20.
- 10.Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties// IEEE J. Quantum Electron. 1980. Vol. QE-16. P. 347-355.
- 11.Bo Yanga , Dehui Wanga , Lin Zhoua , Shuang Wua , Rong Xianga , Wenhua Zhanga, Huaqiao Guib , Jianguo Liub , Huanqing Wangc , Liang Lua, Benli Yua. A ultra-small-angle self-mixing sensor system with high detection resolution and wide measurement range //Optics & Laser Technology 91 (2017) 92–97. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.11.024>
- 12.Donati S. Developing self-mixing interferometry for instrumentation and measurements. Laser Photonics Rev. 2012;6(3):393–417. <https://doi.org/10.1002/lpor.201100002>.
13. Usanov DA, Skripal AV. Measurement of micro-and nanovibrations and displacements using semiconductor laser autodynes. Quantum Electronics 2011; 41(1):86–94.
- 14.Скрипаль А.В. «Микро - и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов» // Квант. электроника, 2011. ТомС. 86–94.
- 15.Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Калинин М. Ю. Формирование автодинного сигнала в полупроводниковом лазере при движении внешнего отражателя// Изв. вузов. Прикладная нелинейная динамика. 1998. Т.6, №1. С.3–9.

