

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧЕРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**Автодинная интерферометрия расстояния при гармонической  
модуляции длины волны полупроводникового лазера**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 413 группы  
направления (специальности) 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»  
Факультета нано- и биомедицинских технологий  
Колесова Дмитрия Федоровича

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

должность, место работы, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Ан.В.Скрипаль

инициалы, фамилия

И.О. Зав. Кафедрой

профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Ал. В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2019

Абсолютные системы измерения расстояний с использованием гетеродинного лазерного излучения, в отличие от более распространенных систем измерения, представляют значительный интерес в области метрологии, особенно в обрабатывающей промышленности, медицине и крупных научных проектах. Измерительные системы с этими возможностями смогли бы сразу улучшить эффективность и точность производства больших сборок. Например, высокая точность изготовления больших крыльев для самолетов, привела бы к улучшению аэродинамики и, соответственно, к снижению расхода топлива. Другие применения лежали бы в ускорителях частиц и коллайдерах включающих более плотные допуски выравнивания и в свою очередь более сложные и предварительные конструкции. Создание таких средств измерения открывает возможности производства малогабаритных систем.

Ранее, достижению высокой точности препятствовала низкая проработанность вопроса. Алгоритмы обработки сигнала не позволяли достаточно точно определять параметры. Не высокая необходимость повышения точности в широких кругах не стимулировала развитие данного направления.

Но, с открытием новых физических эффектов, с выходом промышленности на новый уровень, а также с возникновением необходимости усовершенствования способов измерения, в первую очередь адаптируя их для простоты использования человеком, востребованность в точных измерительных приборах выросла. Вопросы повышения точности, стали приводить к поиску ответов. Стали прорабатываться различные методы, повышалась материально-техническая база, компетентность разработчиков также не стояла на месте.

Проблема дипломного исследования заключается в необходимости повышения точности автодинной интерферометрии расстояния с использованием гармонической модуляции длины волны

полупроводникового лазера, нахождению оптимальной выборки номеров гармоник и длинны волны модуляции для повышения точности измерения.

Объектом дипломного исследования является метод автодинной интерферометрии расстояния при модуляции длинны волны излучения полупроводникового лазера. Метод основан на регистрации фазы отраженного лазерного излучения. На данном методе построены системы с использованием лазеров с внешней оптической обратной связью, работающие в режиме автодинного детектирования в полупроводниковом лазере.

Целью дипломной работы является определение оптимальных соотношений модуляции длинны волны и измеряемой длинны для получения точности порядка десятка мкм.

Задачи дипломного исследования: изучить основные теоретические представления методов измерений расстояния, изучить различные алгоритмы выборки номеров гармоник и влияние длинны волны модуляции на точность измерения расстояния, выбрать оптимальный алгоритм, провести эксперимент способом математического моделирования, подвести итоги.

Можно предположить, что достаточной точности можно добиться, подстраивая длину волны девиации и количество интерференционных минимумов так, чтоб увеличить число спектральных гармоник, укладывающихся в данном расстоянии.

В качестве метода исследования было выбрано математическое моделирование, оно позволяет достаточно точно моделировать эксперимент, учитывая внешние шумы и погрешности, связанные с человеческим фактором.

Организация исследования включала следующие этапы: на первом, аналитическом была изучена теория вопроса на основании анализа выявленного массива научно – методических материалов и проблем. Это позволило определить степень научной разработанности проблемы,

сформировать цель, задачи, рабочую гипотезу. На втором этапе, диагностическом, были рассмотрены различные алгоритмы, и выбран метод гармонической токовой модуляции. На третьем этапе – формирующем (или проектном), на основании обобщения накопленного опыта и использовании методов математического моделирования было разработано обоснование использования гипотезы в целях повышения точности измерений.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования его результатов в медицинской практике, на производстве, а также в лабораторных исследованиях и экспериментах.

### **Существующие методы измерения расстояний с помощью лазеров.**

Существуют различные методы измерения расстояний с использованием лазерных диодов: метод триангуляции, импульсный метод, интерферометрический метод, метод сдвига фаз, автодинный метод.

#### **Метод триангуляции.**

Триангуляция – это геометрический метод, который используют для регистрации расстояний в высоком диапазоне – от пары миллиметров, до многих километров. Данный метод реализуется на способности распространения луча лазера с высокой плотностью пучка на достаточно больших расстояниях. Как правило, лазерным лучом освещается точка, до которой необходимо измерять расстояние. Рассеяние, или же отражение света от данной точки регистрируются детектором. Детектор устанавливается на некотором расстоянии от луча, таким образом, чтоб детектор, лазер и объект образовывали треугольник. На ПЗС матрицу фокусируется отраженный свет с помощью линзы. Входящий в детектор свет в виде яркого пятна фокусируется на матрице. По положению пятна, можно определить направление, а следовательно угол между отраженным светом и падающим на поверхность лучом. Отсюда можно рассчитать расстояние. Большие скорости детектирования позволяют контролировать положение динамических объектов.

## **Импульсный метод.**

Импульсный метод (его так же называют времяпролетным) основывается на измерении времени пролета лазерного импульсного луча от лазера до цели и обратно. Как правило, данный метод используется для регистрации больших расстояний, от сотен метров и до десятков километров. Для измерения расстояния, прибор посылает короткий импульс света, измеряет время до получения отраженного излучения. Таким образом можно рассчитать расстояние, так как скорость света известна.

## **Интерферометрические методы.**

Интерферометры базируются на эффекте интерференции. Все интерферометры одинаковы по принципу действия, различия составляют лишь измеряемые величины, а так же методы получения когерентных волн. Благодаря некоторому устройству пучок света делится на несколько когерентных пучков. Каждый пучок проходит свой оптический путь, в конце каждого пути пучки сводятся в один. В точке схождения всех пучков появляется интерференционная картина, которая по своему виду зависит от способов деления пучка, от разности оптического хода, от количества самих пучков, от интенсивности света, от источника излучения, а так же от спектральной составляющей света.

## **Метод сдвига фаз.**

Стоит отметить, что метод сдвига фаз иногда называется методом времени пролета, потому, что время пролета пропорционально фазовому сдвигу, но по факту время пролета в данном методе не измеряется. Данный метод измерения расстояния использует синусоидально модулированный по мощности лазерный луч. Отслеживая фазу отраженного света, сравнивают ее с первоначальной фазой и по измеренной разности фаз определяют расстояние. При высокой частоте модуляции можно получить высокую точность.

### Метод автодинной интерферометрии расстояния.

Физическое явление, благодаря которому использование полупроводникового лазера позволяет измерять расстояние в автодинном режиме - так называемые шумы, обусловленные обратным светом. Рассмотрим рисунок 1.

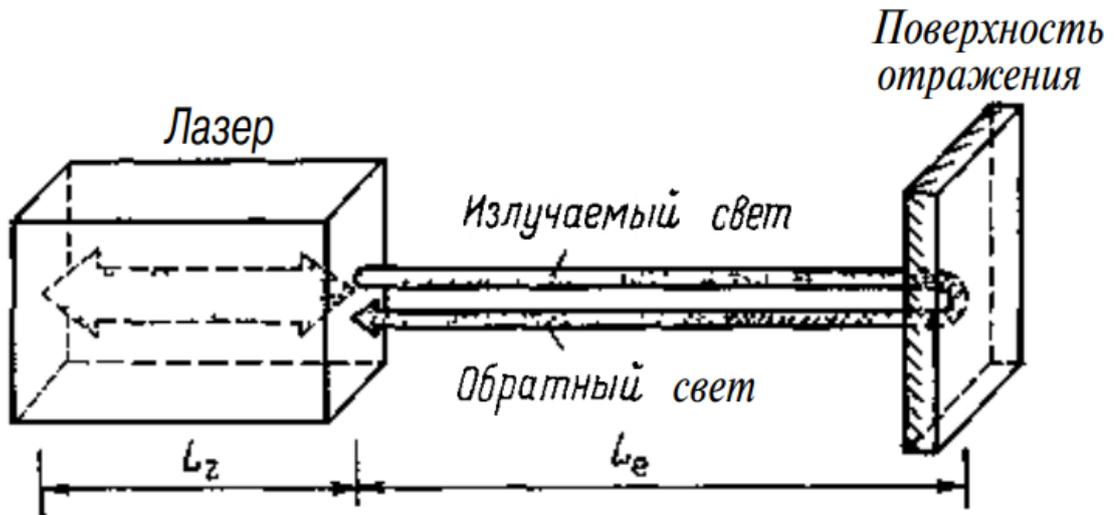


Рис. 1. Возникновение шумов от обратного света.

Если свет, излучаемый полупроводниковым лазером, отражается от внешнего зеркала, торца оптического волокна и других препятствий, а затем возвращается в лазер с произвольной фазой, то этот отраженный свет изменяет условия генерации лазера и значительно увеличивает уровень модуляционных шумов интенсивности и шумов частотной модуляции. Эти вносимые шумы называются в силу своей природы шумами от обратного света. В той или иной степени, это явление характерно для лазеров всех типов, но в полупроводниковых лазерах коэффициент отражения торцевой поверхности резонатора примерно на 30 % меньше по сравнению с лазерами других типов, поэтому обратный свет легче проникает внутрь резонатора и его влияние столь заметно. На рисунке 2 приведены диаграммы, которые показывают, как с увеличением интенсивности обратного света увеличиваются и колебания мощности излучаемого света.

Это влияние обратного света заметно при интенсивности его 0,003 % по отношению к излучаемому свету, а при 5 % обратный свет приводит уже к генерации импульсного типа.

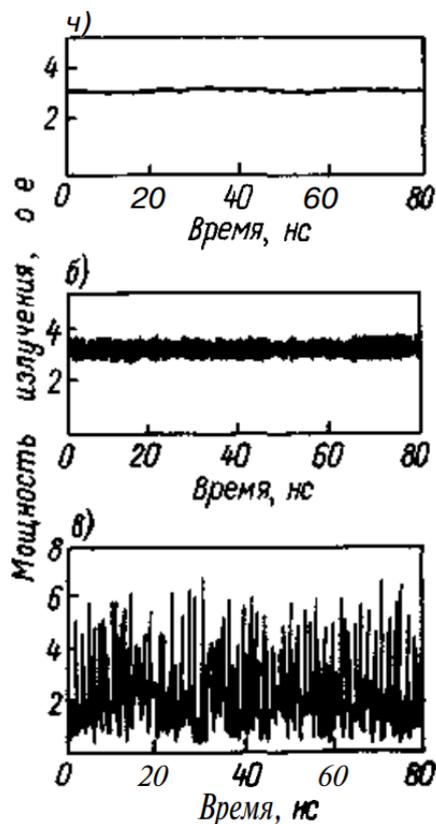


Рис. 2. Временные колебания мощности лазерного луча из-за обратного света при  $l_e=5$  см и соотношении мощности обратного и излучаемого света, равном нулю (а), 0,003% (б) и 5% (в). [30]

Использование данных шумов определенным образом позволяет измерять микро- и нано- колебания.

#### **Устройство измерительной установки и принцип ее действия.**

Рассмотрим устройство автодинной измерительной установки. Она будет состоять из полупроводникового лазера, источника тока для накачки лазера, фотодетектор, усилитель с фильтром переменного сигнала, аналого-цифровой преобразователь, компьютер, обрабатывающий цифровой сигнал в специальной программе и, конечно же, измеряемое тело, состоящее из отражательного элемента на пьезокерамической

подложке с микрометрическим механизмом и генератора колебаний. Общий вид установки изображен на рисунке 3.

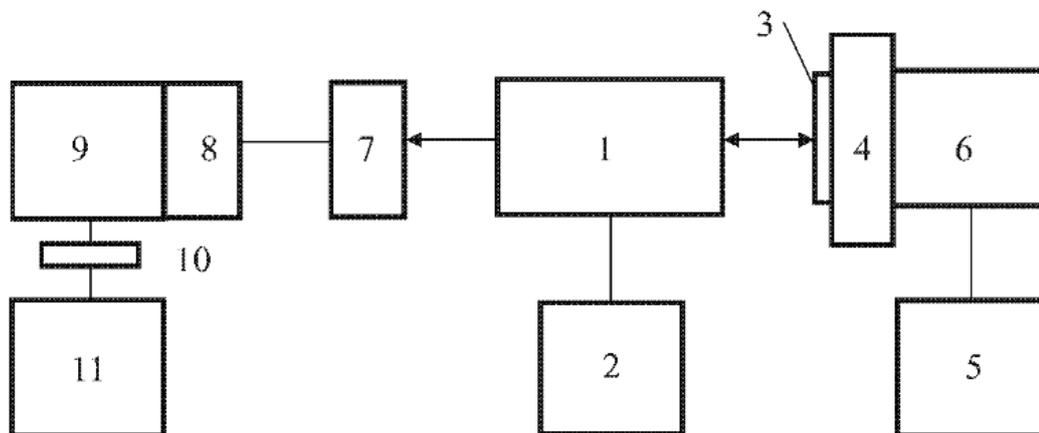


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – источник тока, 3 – отражатель, 4 – пьезокерамика, 5 – генератор звуковых колебаний, 6 – микрометрический механизм, 7 – фотодетектор, 8 – фильтр переменного сигнала, 9 – усилитель, 10 – аналого-цифровой преобразователь, 11 – компьютер

Принцип работы данной установки: излучение полупроводникового лазера 1, стабилизированного источником тока 2, направляется на объект 3, закрепленный на пьезокерамике 4, колебания которой возбуждал генератор звуковых колебаний 5. С помощью микрометрического механизма 6 осуществляется возможность перемещения колеблющегося объекта. Часть отраженного от объекта излучения возвращалось в резонатор полупроводникового лазера, изменение выходной мощности которого регистрировалось фотодетектором 7. Сигнал с фотодетектора через усилитель 9, содержащий в себе фильтр переменного сигнала 8, поступал на вход аналого-цифрового преобразователя 10, а затем в компьютер 11 с установленной программой обработки цифрового сигнала по определенному алгоритму.

## Измерения расстояния до объекта по спектру лазерного автодина при частотной модуляции лазера.

Существуют различные виды модуляции: пилообразная и гармоническая.

При изменении тока накачки полупроводникового лазера по пилообразному закону изменяется фаза отраженного от объекта излучения. Благодаря этому при неподвижном объекте интерференция излучений приводит к тому, что выходной ток фотодиода периодически изменяется с частотой, определяемой модуляционной характеристикой лазерного диода и расстоянием до объекта. Сигнал с фотодетектора приобретает вид высокоамплитудной треугольной составляющей за счет пилообразной токовой модуляции лазерного диода с наложенной на нее низкоамплитудной фазовой модуляцией, формируемой за счет изменения фазы отраженного от объекта лазерного излучения (рис. 4).

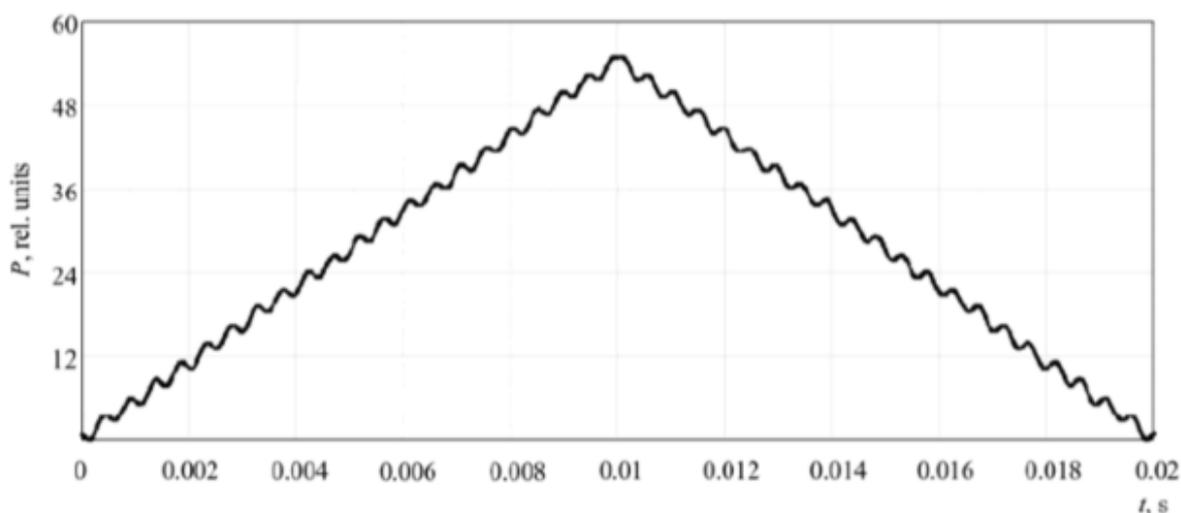


Рис. 4. Пилообразная токовая модуляция лазерного диода

С ростом расстояния погрешность измерения методом пилообразной токовой модуляции значительно уменьшается, а при гармонической модуляции погрешность измерений увеличивается, что связано с уменьшением точности измерений амплитуд спектральных составляющих, имеющих более высокие частоты. Однако, было теоретически и

экспериментально показано, что при измерениях расстояний до 35 см более высокую точность обеспечивает метод с гармонической токовой модуляцией (рис. 5), а при измерениях расстояний больших 40 см более высокую точность дает метод с пилообразной токовой модуляцией. [29]

Потому большой интерес представляет измерение расстояния до объекта при гармонической токовой модуляции лазера. Как уже отмечалось, система, состоящая из полупроводникового лазера и внешнего отражателя, сочетает функции генератора и приёмника электромагнитной волны в одном устройстве. Возвращенная внешним отражателем в резонатор лазера волна приводит к изменению мощности излучения лазерного диода.

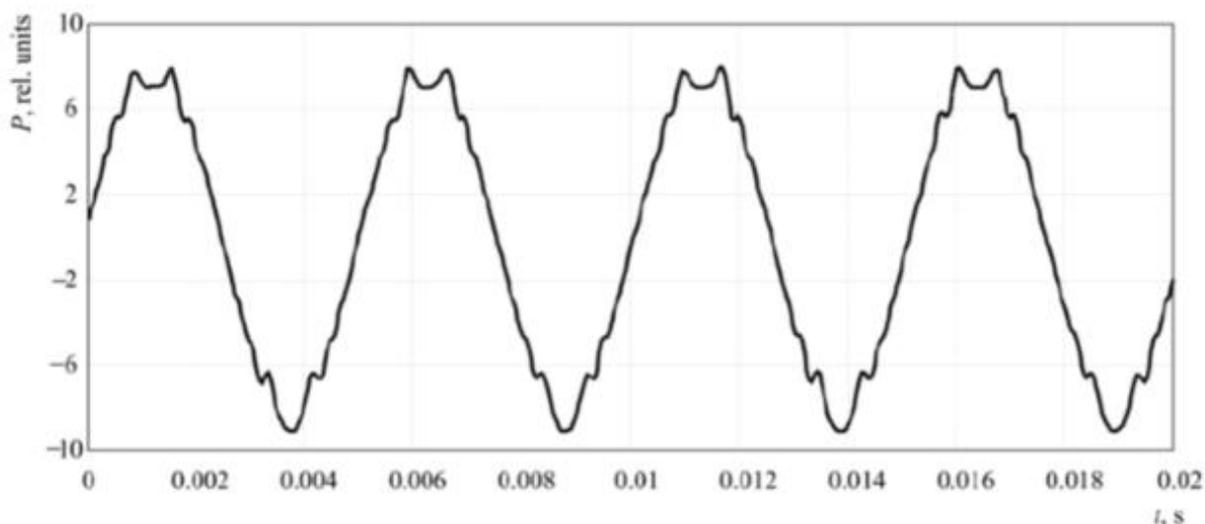


Рис. 5. Гармоническая токовая модуляция лазера

Для определения расстояния до отражателя используется частотная модуляция тока накачки лазерного диода. Расстояние находится по отношению спектральных составляющих автодинного сигнала полупроводникового лазера. Расстояние до объекта находится по формуле:

$$— —$$

Где,  $c$  - скорость света,  $\sigma = \omega_A \tau_0$ ,  $\omega_A$  - девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода,  $\tau_0$  — время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя.

## **Компьютерное моделирование автодинного сигнала и его низкочастотного спектра при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода.**

Компьютерное моделирование автодинного сигнала и спектра частотно-модулированного полупроводникового лазера проводилось при следующих параметрах: длина волны излучения лазера  $\lambda = 650$  нанометров, частота модуляции тока питания лазерного диода  $\nu_1 = 100$  Герц. Измерения проводились для расстояний  $L = 0.14, 0.28, 0.362$  метра. Варьируя длину волны девиации  $\Delta\lambda$  и  $n$ , так, чтобы расстояние не изменялось измеряли погрешности.

Увеличение девиации и числа интерференционных максимумов приводит к обогащению низкочастотного автодинного сигнала, а так же его спектра гармониками.

На рис. 6 изображен график изменения погрешности для  $L = 0.14$  метров.

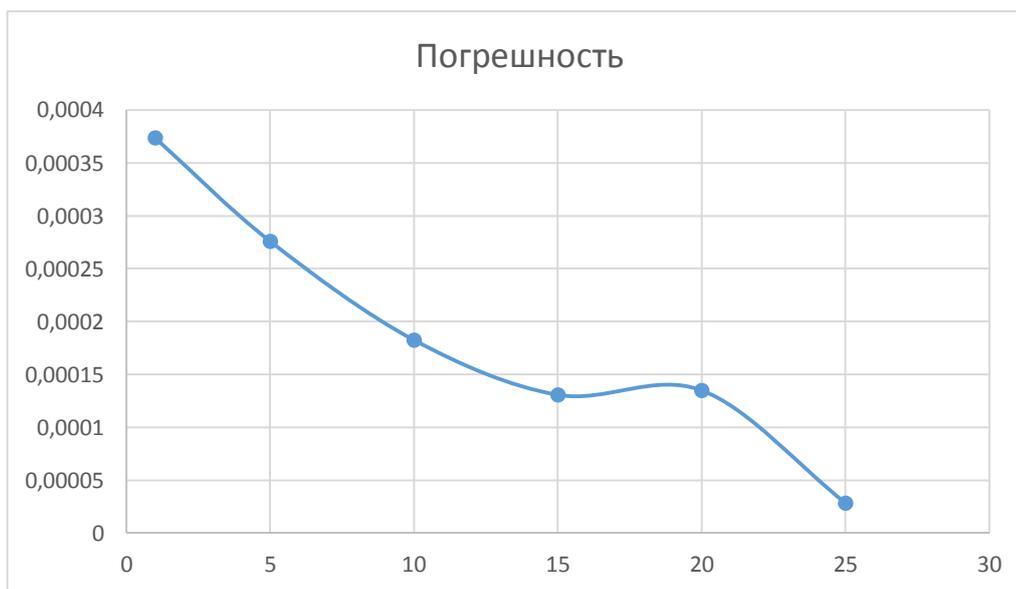


Рис 6. – погрешность измерения расстояния при  $L=0.14$  м.

Резюмируя данный рисунок можно сказать, что обогащение автодинного сигнала гармониками ведет к увеличению точности на порядок.

### **Применение в рамках производства.**

Упругие элементы являются необходимыми деталями многих приборов. Они используются в различных целях: для создания

определенного натяга между деталями, аккумуляции механической энергии, как элементы передачи движения, упругие опоры, амортизаторы и т. д. Особенно ответственна роль упругих элементов в измерительных приборах, если они применяются в качестве чувствительных элементов, воспринимающих измеряемую величину. В этих случаях точность и надежность работы прибора во многом зависят от качества чувствительного упругого элемента.

Если измеряемая величина воспринимается упругим чувствительным элементом низкого качества, то как бы ни была высока точность дальнейших преобразований, погрешность упругого элемента будет ограничивать точность прибора в целом.

Одной из причин неудовлетворительного качества упругих чувствительных элементов является недостаточное внедрение теории и расчета в практику конструирования приборов.

Многие ответственные упругие элементы подбираются чисто опытным путем, что затрудняет поиски оптимального для данных требований упругого элемента. [34]

Одним из перспективных применений метода измерений расстояний на производстве, представляется применение измерительной установки в качестве метрологического прибора для контроля идентичности упругих элементов, использующихся в дифференциальных датчиках давления.

Дифференциальный датчик давления – это датчик, который воспринимает разницу в давлении между первым входным (низким) давлением или "опорным давлением" и вторым входным (высоким) давлением и обеспечивает дифференциальный сигнал датчика, представляющий разницу в давлении. Такие дифференциальные датчики дают возможность измерять разность давления между двумя соединениями элемента. Такие датчики имеют два входных измерительных порта. На этих портах, имеются закрытые камеры с гофрированными мембранами, которые непосредственно контактируют со средой, будь то газы или

жидкости. Разность давлений между портами преобразуется в электрический сигнал, удобный для дальнейшей обработки и индикации. Для наиболее точного измерения, необходимо, чтобы обе мембраны были максимально идентичны.

Идентичность мембран можно обеспечить путем измерения изгиба всех изготовленных мембран в партии методом лазерной интерферометрии расстояния, и подбором близких по значению сопротивления давлению пар мембран. Это обеспечит более точные дифференциальные измерения, убирая вклад анизотропии мембран при штамповке. В дальнейшем это приведет к уменьшению брака производства датчиков, улучшению их метрологических характеристик.

Исследования, проведенные в рамках дипломной работы, показали возможность измерения расстояния с высокой точностью оптическими методами. Эти исследования могут быть применены для калибровки выпускаемых на производстве дифференциальных датчиков давления.

### **Заключение.**

В дипломной работе было проведено математическое моделирование работы лазерного автодина при различных диапазонах модуляции длины волны лазерного излучения и числа интерференционных максимумов.

Показано что при увеличении диапазона модуляции длины волны лазерного излучения и числа интерференционных максимумов, в низкочастотном спектре автодинного сигнала наблюдается появление большего числа спектральных составляющих. Анализ спектра автодинного сигнала выявил, что при расчёте расстояния до объекта по большему числу спектральных составляющих увеличивается точность определения расстояния.

Исследования, проведенные в рамках дипломной работы, показали возможность измерения расстояния с высокой точностью оптическими

методами. Эти исследования могут быть применены для калибровки выпускаемых на производстве дифференциальных датчиков давления.