

Министерство образования и науки Российской Федерации

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.  
ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики твердого тела

**ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ПРИ ТОКОВОЙ МОДУЛЯЦИИ  
ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**  
студента 4 курса

направления 210601 «Электроника и нано-электроника»  
факультета нано-и биомедицинских технологий

Джафарова Алексея Владимировича

Научный руководитель

профессор,

доктор физ.- мат. наук

А.В. Скрипаль

\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч.  
звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор,

доктор физ.- мат. наук.

Д.А. Усанов

\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч.  
звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Саратов, 2017

Значительный интерес к эффекту автодинного детектирования в полупроводниковых лазерах обусловлен возможностью создания на их основе простых измерительных датчиков с высокой чувствительностью к отраженному сигналу.

Целью данной работы является рассмотрение возможности повышения разрешающей способности лазерного автодина при определении расстояния до объекта за счёт использования широкого диапазона модуляции длины волны лазерного излучения.

Выпускная квалификационная работа содержит 4 главы:

- 1) Методы лазерной интерферометрии для измерения расстояния.
- 2) Полупроводниковые лазерные автодины.
- 3) Формирование автодинного сигнала при модуляции длины волны излучения лазерного диода.
- 4) Экспериментальная часть.

Уникальные характеристики полупроводниковых лазеров открыли широкие перспективы дальнейшего развития высокоразрешающей спектроскопии, оптоэлектроники и метрологии. Высокая чувствительность этих лазеров к рассеянному излучению, считавшаяся ранее большим недостатком, в последнее время широко используется и привела к созданию нового направления в оптико-физических измерениях - интерферометрии с оптической обратной связью (Self-mix interferometry), а возможность существенного (до десятков гигагерц) изменения частоты излучения простым изменением инжекционного тока создала предпосылки для разработки методов интерферометрии с частотной модуляцией.

Конкуренцию таким интерферометрам, да и то только в области дальнометрии, могут составить лишь ультразвуковые приборы и лазерные дальнометры триангуляционного типа. Но даже в этой области, как показано в, имеется зона дальности, где интерферометры с частотной модуляцией могут найти свою нишу.

Одним из путей расширения возможностей лазерной интерферометрии, упрощения конструкции и снижения стоимости соответствующих приборов является объединение явлений оптической обратной связи и частотной модуляции в одном устройстве.

При определении расстояния до объекта с помощью оптического зондирования, в настоящий момент, представляются перспективными методы оптической интерферометрии с изменением длины волны, основанные на регистрации фазы отраженного лазерного излучения. Применение полупроводниковых лазерных диодов в качестве перестраиваемых источников когерентного излучения открывает возможности создания малогабаритных измерительных систем. К ним относятся системы с использованием лазеров с внешней оптической обратной связью, работающие в режиме автодинного детектирования в полупроводниковом лазере.

В основу рассматриваемой методики измерений дальности до исследуемых объектов и параметров их движения положено свойство полупроводниковых лазеров изменять частоту излучения под воздействием изменений инжекционного тока. При небольших (до 5 %) изменениях тока [14] частота излучения меняется линейно, и если этот ток периодически модулируется, то соответственно меняются мощность и частота излучения.

Модулированный таким образом пучок света направляется на исследуемый объект, как показано на рис. 1. Рассеянное им излучение попадает обратно в активную среду лазера, где усиливается и интерферирует с исходным излучением. Из-за конечного значения скорости света рассеянное излучение приходит в лазер с некоторой задержкой, вследствие чего частота этого излучения не совпадает с частотой, генерируемой лазером в данный момент. В результате на выходе встроенного в лазер фотодиода возникает электрический сигнал, параметры которого несут полезную информацию об отражающей способности исследуемого объекта, его удаленности и характеристиках движения.

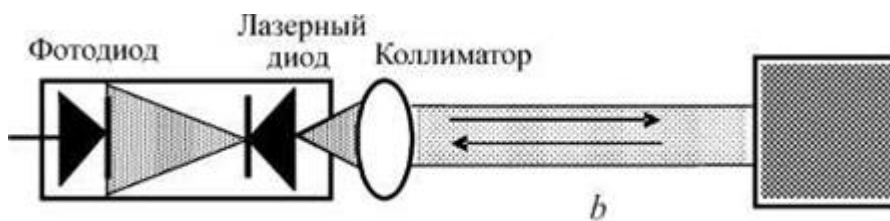


Рис.1 Схема установки автодинного детектирования

### **3. Исследование автодинного сигнала при изменении глубины токовой модуляции лазерного диода**

Для проверки предположения о меньшей величине погрешности при определении расстояния до объекта за счёт использования более широкого диапазона токовой модуляции, с помощью лазерной автодинной интерферометрии, было проведено математическое моделирование в программном пакете Mathcad 15.

Полупроводниковый лазерный автодин с внешней оптической обратной связью был описан в рамках модели составного резонатора Лэнга и Кобаяши, используя соотношения:(1)-(15).

Моделирование автодинного сигнала проводилось при следующих параметрах: длина волны излучения лазерного диода  $\lambda=650\text{nm}$ , заданное моделью расстояние 10см, при различных значениях девиации длины волны излучения лазерного диода, составляющих 0.002нм, 0,02нм и 0,2нм.

Также для соответствия модели реальным условиям в автодинный сигнал был добавлен шум, составляющий в среднем 10% от величины амплитуды колебаний мощности автодинного сигнала. На рисунках 2-4 представлены графики автодинных сигналов.

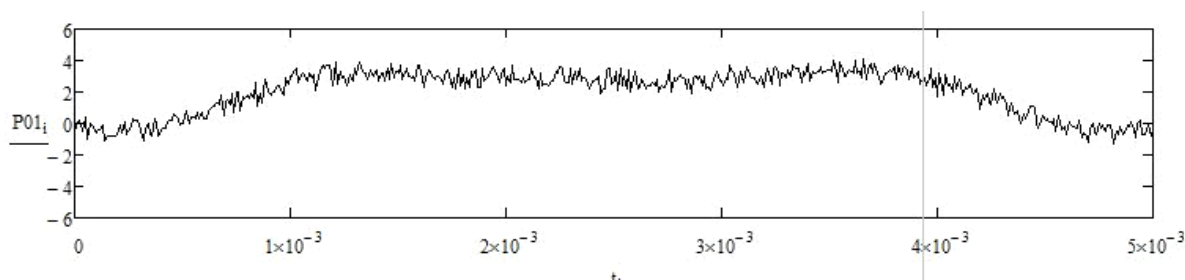


Рис. 2 Смоделированный частотномодулированный автодинный сигнал, при девиации длины волны излучения лазерного автодина  $\Delta\lambda=0,002\text{нм}$ .

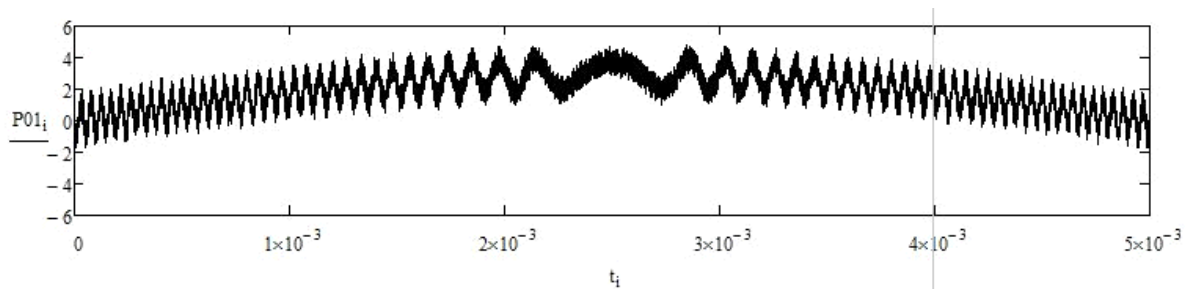


Рис. 3 Смоделированный частотномодулированный автодинный сигнал, при девиации длины волны излучения лазерного автодина  $\Delta\lambda=0,02\text{нм}$

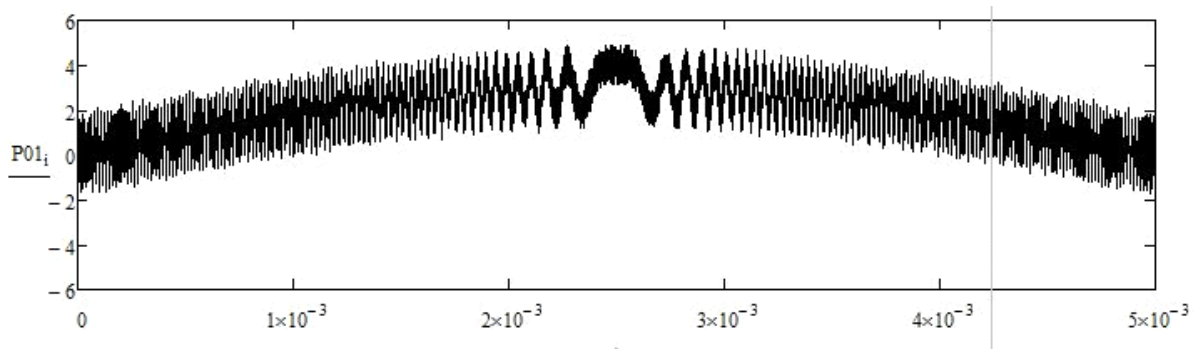


Рис. 4 Смоделированный частотномодулированный автодинный сигнал, при девиации длины волны излучения лазерного автодина  $\Delta\lambda=0,2\text{нм}$

Для описания низкочастотного спектра автодинного сигнала при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода мощность автодинного сигнала была представлена в виде разложения в ряд по функциям Бесселя первого рода  $J_n$  и в ряд Фурье с коэффициентами разложения  $a_n$  и  $b_n$  аналогично тому, как это сделано в работе. Спектры полученных автодинных сигналов представлены на рисунках 5-7.

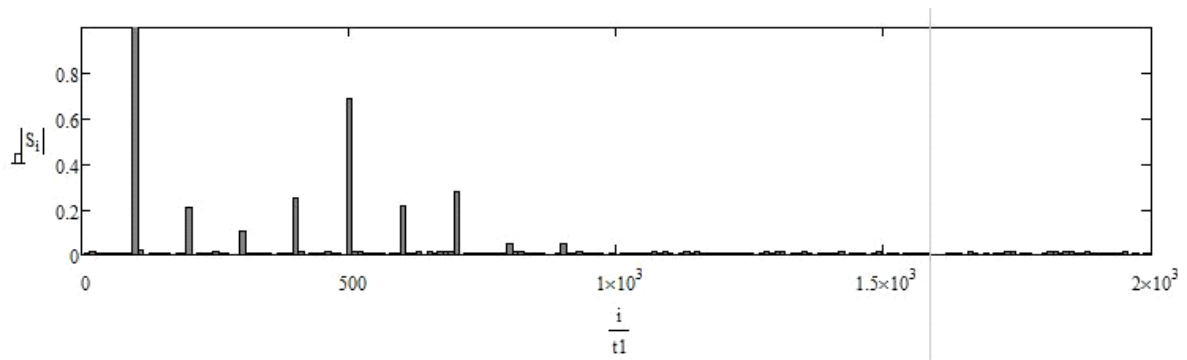
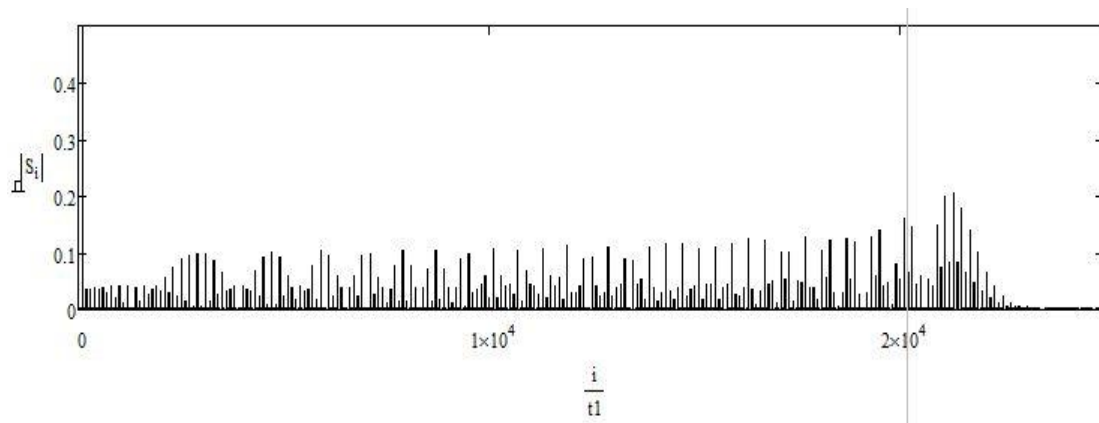
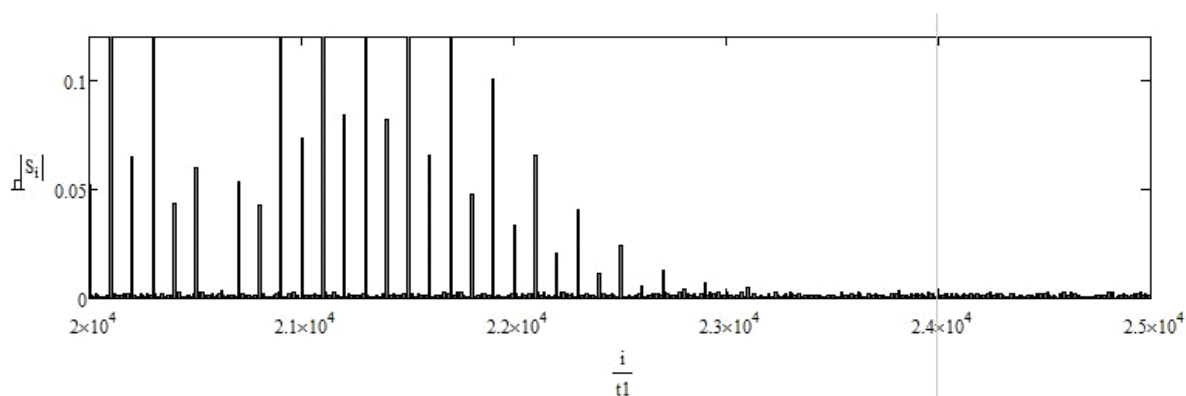


Рис. 5 Спектр смоделированного частотномодулированного автодинного сигнала, при девиации длины волны излучения лазерного автодина  $\Delta\lambda=0,002\text{нм}$ .

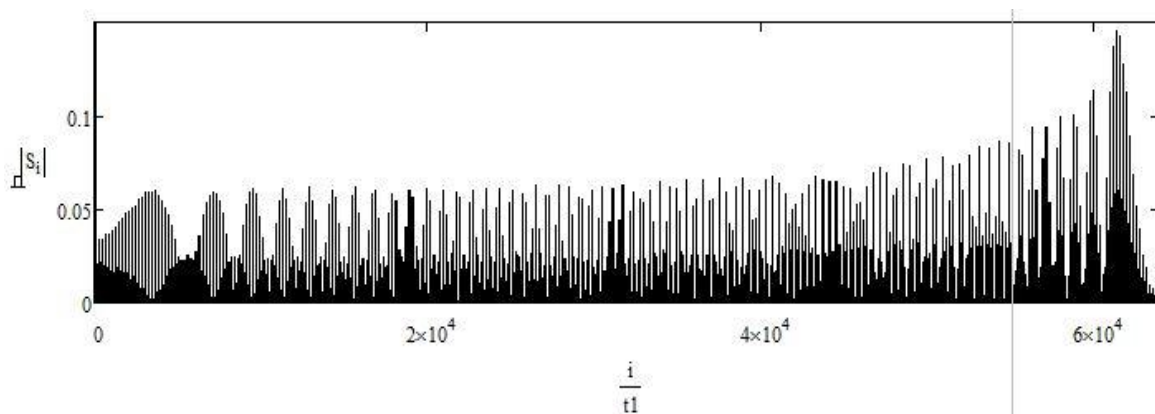


а)

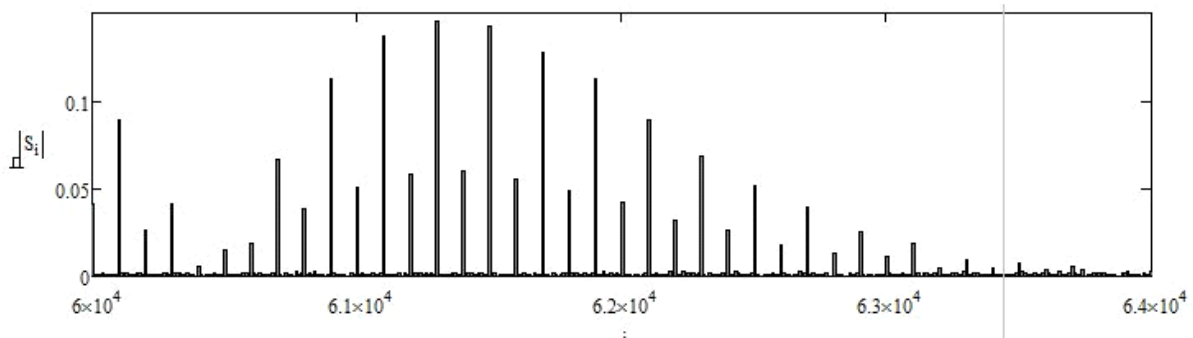


б)

Рис. 6 а).Полный спектр смоделированного частотномодулированного автодинного сигнала б).Спектр крайних гармоник автодинного сигнала при девиации длины волны излучения лазерного автодина  $\Delta\lambda=0,02\text{нм}$ .



а)



б)

Рис. 7 а). Полный спектр смоделированного частотномодулированного автодинного сигнала б). Спектр крайних гармоник автодинного сигнала при девиации длины волны излучения лазерного автодина  $\Delta\lambda=0,2\text{нм}$ .

С увеличением величины амплитуды токовой модуляции спектр обогащается дополнительными гармониками.

В работе авторы выяснили, что, так как при использовании широкого диапазона девиации частоты излучения лазерного диода в низкочастотном спектре автодинного сигнала полупроводникового лазера наблюдаются спектральные составляющие высоких порядков, использование отношения второй и четвертой спектральных составляющих автодинного сигнала, ограничивается областью неоднозначности функций Бесселя. также авторы выяснили, что для повышения разрешающей способности метода автодинной интерферометрии при гармонической токовой модуляции, при решении обратной задачи, необходимо использовать последние гармоники в спектре автодинного сигнала, так как область однозначности функций Бесселя увеличивается с возрастанием используемого в расчетах порядка функций Бесселя  $n$ . Для определения расстояния до объекта  $L$ , используем отношение  $2n$  и  $2n+2$  спектральных гармоник и отношение  $2n+1$  и  $2n+3$  спектральных гармоник. При  $\Delta\lambda=0,002\text{нм}$  расчёт производился по седьмой и девятой гармоникам, при  $\Delta\lambda=0,02\text{нм}$  – по  $S_{219}$  и  $S_{221}$ , при  $\Delta\lambda=0,2\text{нм}$  – по  $S_{621}$  и  $S_{623}$ . По этим гармоникам было вычислено среднее расстояние при различных случайных (шумовых) составляющих автодинного сигнала.



Далее были рассчитаны средняя абсолютная и относительная погрешности.

Рассчитанные значения абсолютных и относительных погрешностей в модели определения расстояния до объекта с помощью автодинной гармонической токовой модуляции представлены в таблице 1.

Таблица 1. Рассчитанные значения абсолютных и относительных погрешностей

| $\Delta\lambda$ , нм | $\Delta L$ , м         | $\delta L$ , % |
|----------------------|------------------------|----------------|
| 0.002                | $3.284 \times 10^{-3}$ | 3.3            |
| 0.02                 | $1.606 \times 10^{-4}$ | 0,160          |
| 0.2                  | $1.265 \times 10^{-4}$ | 0,126          |

где  $\Delta\lambda$ , нм – девиации длины волны излучения лазерного диода,  $\Delta L$ , м – среднее значение абсолютной погрешности при определении расстояния,  $\delta L$ , % – величина относительной погрешности.

Из представленных выше данных можно сделать вывод, об обратной пропорциональной зависимости величины девиации волны лазерного излучения и величин абсолютной и относительной погрешности определения расстояния, следовательно, при увеличении  $\Delta\lambda$  растёт разрешающая способность метода.

Измерения проводились на установке, изображение которой представлено на рис. 8.

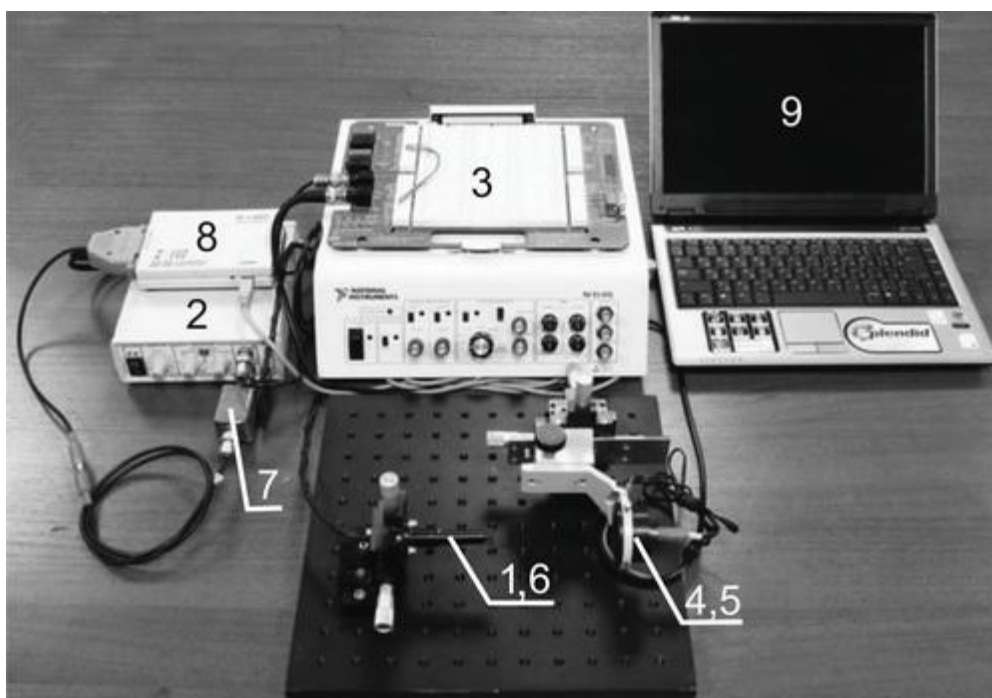


Рис. 8. Вид экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – блок управления током питания, 3 – генератор сигналов на базе платформы NI ELVIS, 4 – объект, 5 – микромеханическая подача, 6 – фотоприемник, 7 – фильтр переменного сигнала, 8 – АЦП, 9 – компьютер

В состав установки входили: частотномодулированный полупроводниковый лазерный автодин на лазерном диоде RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с длиной волны 654 нм – 1, его излучение направлялось на поверхность объекта 4, который был закреплен на микромеханической подаче – 5, также при этом значение измеренного диаметра пятна лазерного излучения на поверхности объекта 4 составило 1 мм. Модуляция длины волны излучения лазерного диода осуществлялась на частоте  $\nu = 300$  Гц с помощью модуляции тока питания лазера посредством встроенного в учебную лабораторную станцию виртуальных приборов NI ELVIS генератора сигналов – 3. Изменение тока питания, лазерного диода

осуществлялось путем изменения напряжения питания, подаваемого на полупроводниковую структуру от блока управления током питания – 2.

Питание лазерного диода осуществлялось с помощью источника тока. Отраженное излучение направлялось обратно, в резонатор лазера, изменение мощности которого фиксировалось фотоприемником – 6. Протектированный и усиленный сигнал с фотоприемника проходил через фильтр переменного сигнала – 7 и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя – 8 (частота дискретизации сигнала – 100 кГц), который, в свою очередь, соединён с компьютером – 9. Величина гармонической девиации частоты излучения лазерного диода  $\Delta\lambda$  измерялась спектрометром высокого разрешения SHR (Solar Laser Systems). Отражающая поверхность объекта находилась на расстоянии 9 сантиметров.

На рисунке 9 приведён вид автодинного сигнала, а на рисунке 13 его спектр при девиации напряжения смещения  $U_{см}=0,03В$ , что соответствует девиации длины волны излучения  $\Delta\lambda=0.007нм$ , что составляет  $1\times 10^{-5}\%$  от рабочей длины волны лазера.

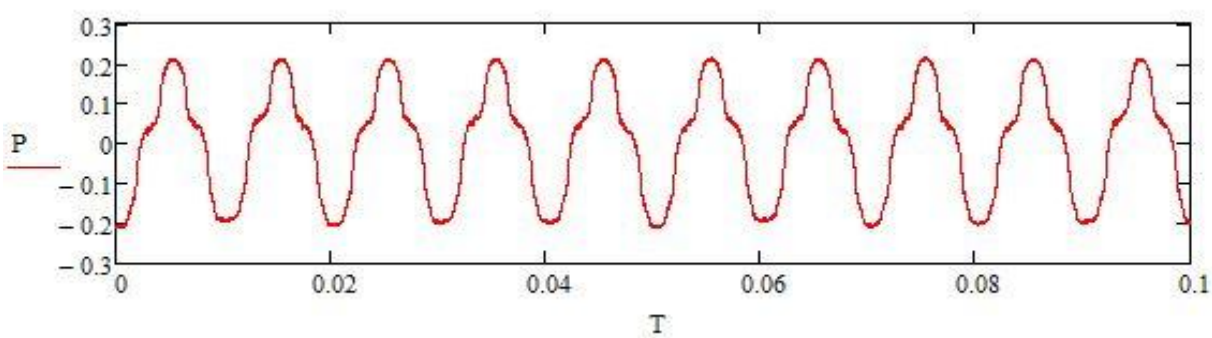


Рис.9 Частотномодулированный автодинный сигнал, полученный на экспериментальной установке при девиации частоты излучения лазерного диода  $\Delta\lambda=0.007нм$

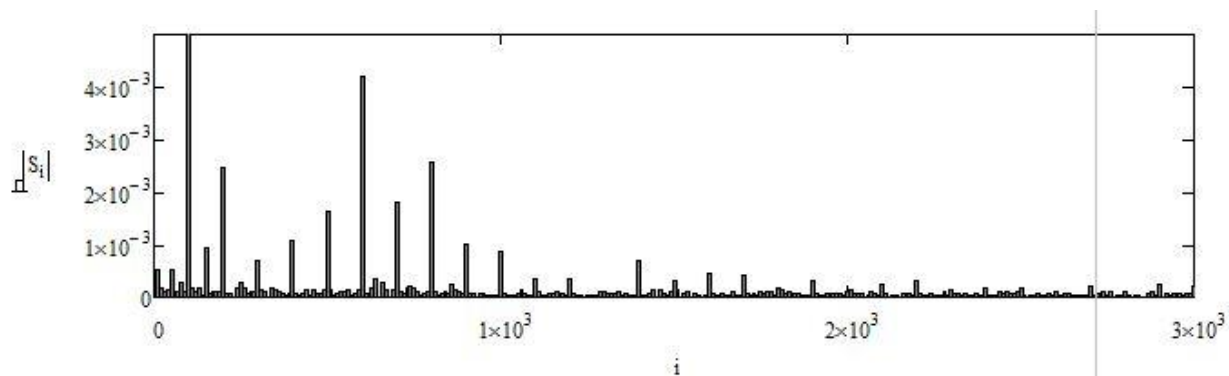


Рис.10 Спектр частотномодулированного автодинного сигнала, полученный на экспериментальной установке при девиации частоты излучения лазерного диода  $\Delta\lambda=0.007\text{нм}$ .

При расчёте расстояния, по отношению девятой и одиннадцатой спектральных составляющих были проведены 10 измерений заданного расстояния. Затем был проведён расчёт значения среднеквадратичного отклонения.

Полученные данные представлены в таблице 2.

Таблица 2. Рассчитанные значения расстояний при девиации величины напряжения на лазерном диоде  $U=0.03\text{В}$ .

| № Измерения | Значение измеренного расстояния, м | S, м                           |
|-------------|------------------------------------|--------------------------------|
| 1           | 0.048                              | $2,046 \times 10^{-3}\text{м}$ |
| 2           | 0.042                              |                                |
| 3           | 0.043                              |                                |
| 4           | 0.043                              |                                |
| 5           | 0.044                              |                                |
| 6           | 0.045                              |                                |
| 7           | 0.044                              |                                |
| 8           | 0.047                              |                                |
| 9           | 0.045                              |                                |
| 10          | 0.047                              |                                |

Затем были проведены измерения расстояния при большей глубине токовой модуляции. Величина напряжения для модуляции лазера составила  $0.3\text{В}$ , что соответствовало величине девиации  $\Delta\lambda=0.055\text{нм}$ .

На рисунке 11 приведён вид данного автодинного сигнала, при данных условиях модуляции, а на рисунке 12 его спектр.

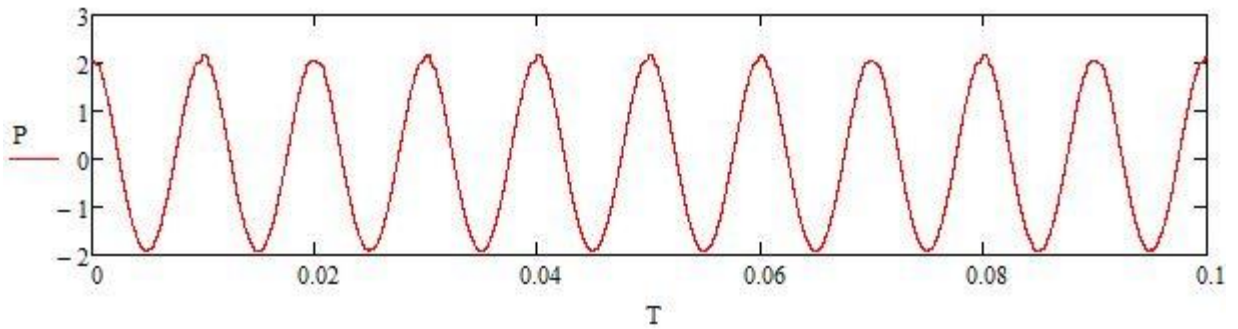


Рис.11 Частотномодулированный автодинный сигнал, полученный на экспериментальной установке при девиации частоты излучения лазерного диода  $\Delta\lambda=0.055\text{nm}$ .

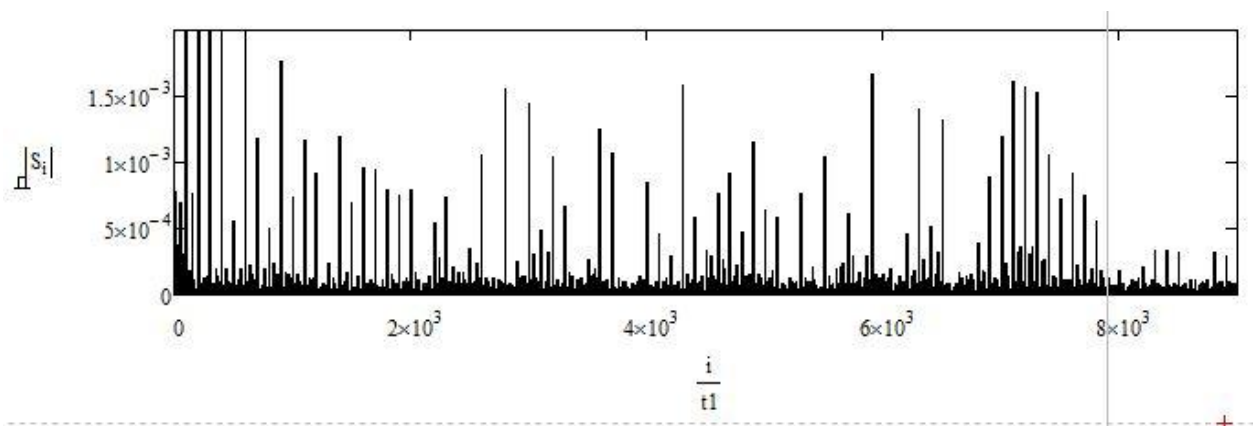


Рис.12 Спектр частотномодулированного автодинного сигнала, полученный на экспериментальной установке при девиации частоты излучения лазерного диода  $\Delta\lambda=0.055\text{nm}$ .

При расчёте расстояния, по отношению семьдесят первой и семьдесят третьей спектральных составляющих были проведены 10 измерений заданного расстояния. Затем был проведён расчёт среднеквадратичного значения отклонения.

Полученные данные представлены в таблице 3.

Таблица 3. Рассчитанные значения расстояний при девиации величины напряжения на лазерном диоде  $U=0.3В$ .

| № Измерения | Значение измеренного расстояния, м | S, м                   |
|-------------|------------------------------------|------------------------|
| 1           | 0.044                              | $5.953 \times 10^{-4}$ |
| 2           | 0.044                              |                        |
| 3           | 0.044                              |                        |
| 4           | 0.044                              |                        |
| 5           | 0.044                              |                        |
| 6           | 0.045                              |                        |
| 7           | 0.045                              |                        |
| 8           | 0.043                              |                        |
| 9           | 0.045                              |                        |
| 10          | 0.045                              |                        |

Как видно из результатов, полученных при проведении экспериментов по определению расстояния до объекта с помощью лазерного полупроводникового автодина с гармонической токовой модуляцией, при большей глубине модуляции и, как следствие, большей величине девиации длины волны излучения лазерного диода, погрешность определения расстояния до объекта уменьшается.

Также на графике зависимости величины автодинного сигнала от времени наблюдается увеличение числа интерференционных максимумов. и увеличение числа интерференционных максимумов. При этом в низкочастотном спектре автодинного сигнала наблюдается появление большего числа спектральных составляющих.

В целом, полученные данные говорят об увеличении разрешающей способности метода автодинной лазерной интерферометрии при гармонической токовой модуляции за счёт увеличения диапазона модуляции длины волны лазерного излучения и использования для решения обратной задачи гармоник высоких порядков для измерения расстояния .



## **Заключение**

В данной работе было проведено математическое моделирование работы лазерного автодина при различных диапазонах модуляции длины волны лазерного излучения.

Показано что при увеличении диапазона модуляции длины волны лазерного излучения на графике зависимости величины автодинного сигнала от времени наблюдается увеличение числа интерференционных максимумов. При этом 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.

Экспериментальные исследования на лазерном диоде RLD-650 подтвердили предположения о увеличении разрешающей способности метода автодинной лазерной интерферометрии при гармонической токовой модуляции за счёт увеличения диапазона модуляции длины волны лазерного излучения и использования для решения обратной задачи гармоник высоких порядков для измерения расстояния.