

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра физики твердого тела

МЕТОДЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВОЙ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса

направления 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

факультета нано- и биомедицинских технологий

Тютюкова Ильи Геннадьевича

Научный руководитель:
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Ан.В.Скрипаль

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

должность, уч. степень, уч. звание

Д.А.Усанов

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов, 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1. МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ
РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА

2. МЕТОД АВТОДИННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА ПО ВЫСШИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ
ГАРМОНИКАМ

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА
ПО ВЫСШИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ГАРМОНИКАМ

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время для измерения расстояния до объекта с помощью оптического зондирования представляются перспективными методы лазерной интерферометрии с изменением длины волны, основанные на регистрации фазы отраженного лазерного излучения [1]. Использование полупроводниковых лазеров в качестве перестраиваемых источников когерентного излучения дает возможности создания малогабаритных измерительных систем [2]. К ним относятся системы с использованием лазеров с внешней оптической обратной связью, работающие в режиме автодинного детектирования в полупроводниковом лазере [3,4].

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

Известен ряд работ показывающих успешное применение токовой модуляции полупроводникового лазера для определения расстояний, параметров движения, вибраций объектов [5]. В этих работах применяется линейное изменение инжекционного тока лазера, приводящее к изменению длины волны излучения лазерного диода.

Целью данной работы: является теоретическое и экспериментальное обоснование возможности измерения расстояния до объекта по наборам спектральных гармоник автодинного сигнала частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина высших порядков. Для достижения поставленной цели будут выполнены следующие задачи: изучение модели полупроводникового лазерного автодина с частотной модуляцией, проведение критического анализа методов определения расстояния до объекта, проведение эксперимента и компьютерного моделирования по определению расстояния до объекта по высшим спектральным гармоникам.

1. МЕТОДЫ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА

Триангуляционный метод измерения расстояния до объекта лазерным датчиком.

Принцип работы лазерного датчика основан на триангуляционном методе измерения расстояния до объекта. Лазерный луч из приемника датчика, падает на поверхность и отражается под тем же углом. Угол падения луча лазера изменяется в зависимости от расстояния до объекта, и, таким образом, изменяется положение точки лазера на приемнике, который представляющий собой фотодиодную линию. Данные с фотодиодной линии считываются интегрированным микроконтроллером. Контроллер производит расчет угла распределения света на фотодиодной линии, и по этим данным определяет расстояние до объекта. Точность измерения расстояния у большинства триангуляционных датчиков составляет 0,4 мм.

Лазерные импульсные дальномеры для измерения расстояния до объекта

Принцип действия лазерных импульсных дальномеров, заключается в измерении интервала времени между моментом излучения зондирующего лазерного импульса и моментом приема излучения, отраженного от объекта. Источником излучения в таких приборах является импульсный лазер (обычно твердотельный или полупроводниковый), излучение которого коллимируется с помощью оптической формирующей системы. При формировании лазерного импульса часть лазерного излучения с помощью светоделителя отводится на фотоприемное устройство ФПУ1. Отраженное от объекта излучение попадает в приемный канал, состоящий из приемного объектива, ФПУ2 (приемника излучения) и усилителя сигнала. Измеритель временных интервалов (ИВИ) начинает работу в момент излучения лазерного

импульса по сигналу ФПУ1 и завершает ее в момент приема отраженного излучения по сигналу ФПУ2, выдавая цифровой код полученного результата. Блок синхронизации и управления осуществляет интерпретацию и повышение точности полученных результатов, формирует сигнал на индикаторе, а также принимает команды органов управления.

При постоянной скорости распространения электромагнитного излучения в слое среды (атмосфере, космосе, воде) дальность до объекта

$$L = \frac{c\Delta t}{2n},$$

можно рассчитать с помощью следующего выражения

Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией

Авторами работы [5] представлен метод лазерной автодинной интерферометрии с использованием линейно изменяемой модуляции длины волны излучения лазерного диода для определения расстояния до объекта.

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 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. 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.

2. МЕТОД АВТОДИННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА ПО ВЫСШИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ГАРМОНИКАМ

Существенным недостатком метода автодинной интерферометрии для определения расстояния при модуляции длины волны лазерного излучения было уменьшение точности измерений с увеличением расстояния до объекта, так как происходит линейный рост σ , являющийся аргументом функций Бесселя, и как следствие этого высокая точность измерений достигается в узком диапазоне значений σ .

Ограничения метода определения расстояния по первым четырем спектральным гармоникам, удается избежать используя спектральные гармоники высших порядков (C_4, C_5, C_6, C_7, C_8 и т.д.)

$$C_{2n}/C_{2n+2} = (J_{2n}(\sigma))/(J_{2n+2}(\sigma)), \quad (8)$$

$$C_{2n+1}/C_{2n+3} = (J_{2n+1}(\sigma))/(J_{2n+3}(\sigma)), \quad (9)$$

Из соотношений (8) и (9) рассчитывается величина $\sigma = \omega_A \tau$, откуда, при известном значении ω_A , вычисляется величина времени обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя τ . Принимая во внимание, что $\tau_0 = 2L/c$, получаем соотношение для определения расстояния до объекта

$$L = \frac{c}{2} \frac{\sigma}{\omega_A}. \quad (10)$$

где c -скорость света.

Для определения номеров спектральных гармоник, используемых для корректного решения обратной задачи, были проведены расчеты функций Бесселя, входящих в уравнения (2.2). На рис. 2.1 приведены зависимости функций Бесселя различных порядков от аргумента

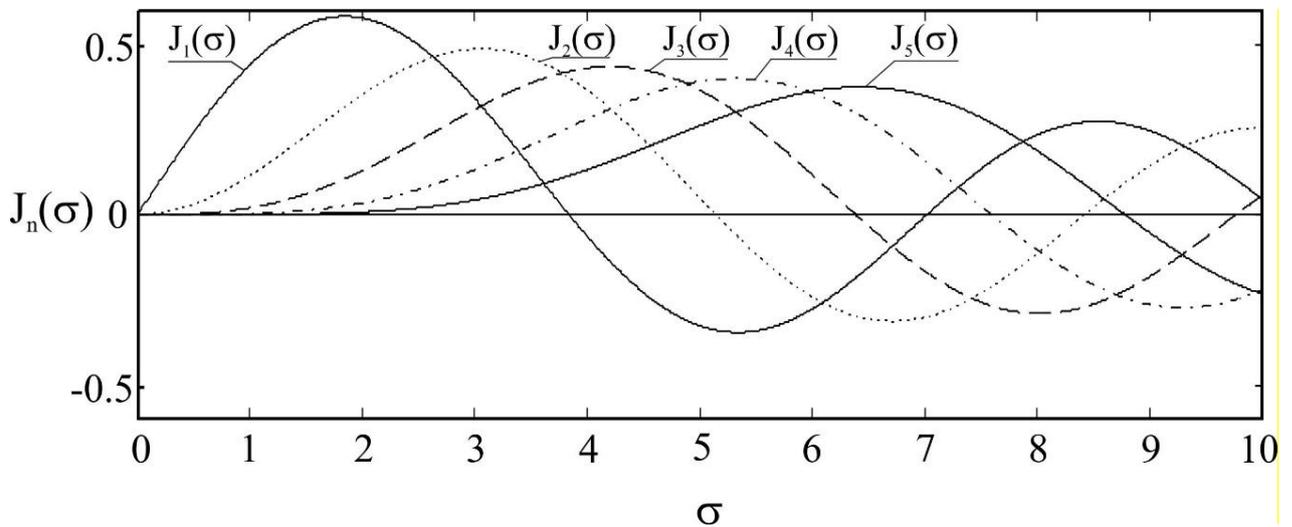


Рисунок 2.1. Зависимость функций Бесселя 1-5 порядка от аргумента функции

Как видно из приведенных зависимостей, область однозначности функций Бесселя возрастает с увеличением используемого в расчетах порядка n .

На рисунке 2.2 приведены зависимости функции модуля отношения двух спектральных гармоник автодинного сигнала имеющих вид уравнения (2.2).

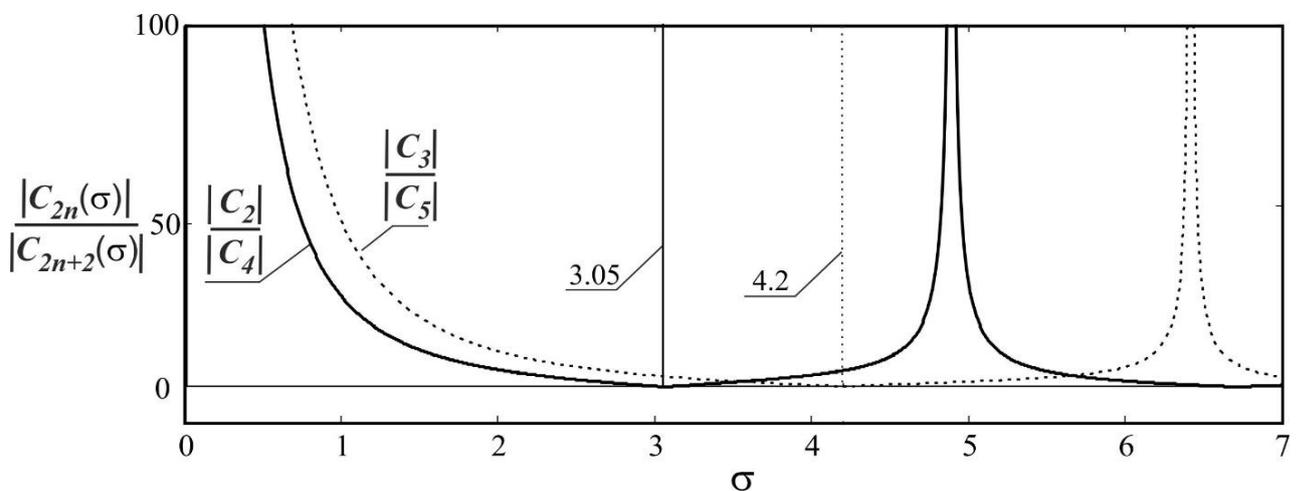


Рисунок 2.2. Зависимость функции отношения двух спектральных гармоник автодинного сигнала

Как видно из этого рисунка, существует область однозначности функций отношения двух спектральных гармоник автодинного сигнала, определяемая пересечением функции с осью абсцисс.

В таблице 1 приведены области однозначности функций отношения двух спектральных гармоник автодинного сигнала, для различных наборов спектральных гармоник определяемых в уравнении (2.2) и номером n .

Таблица 1

Значения аргумента функций отношения двух спектральных гармоник автодинного сигнала, соответствующих области однозначности.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\sigma <$	3.05	4.2	5.3	6.4	7.5	8.6	9.6	10.7	11.8	12.8

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАССТОЯНИЯ ДО ОБЪЕКТА ПО ВЫСШИМ СПЕКТРАЛЬНЫМ ГАРМОНИКАМ

Измерение расстояния до поверхности исследуемого объекта проводились на установке представленной, на рис. 3.1.

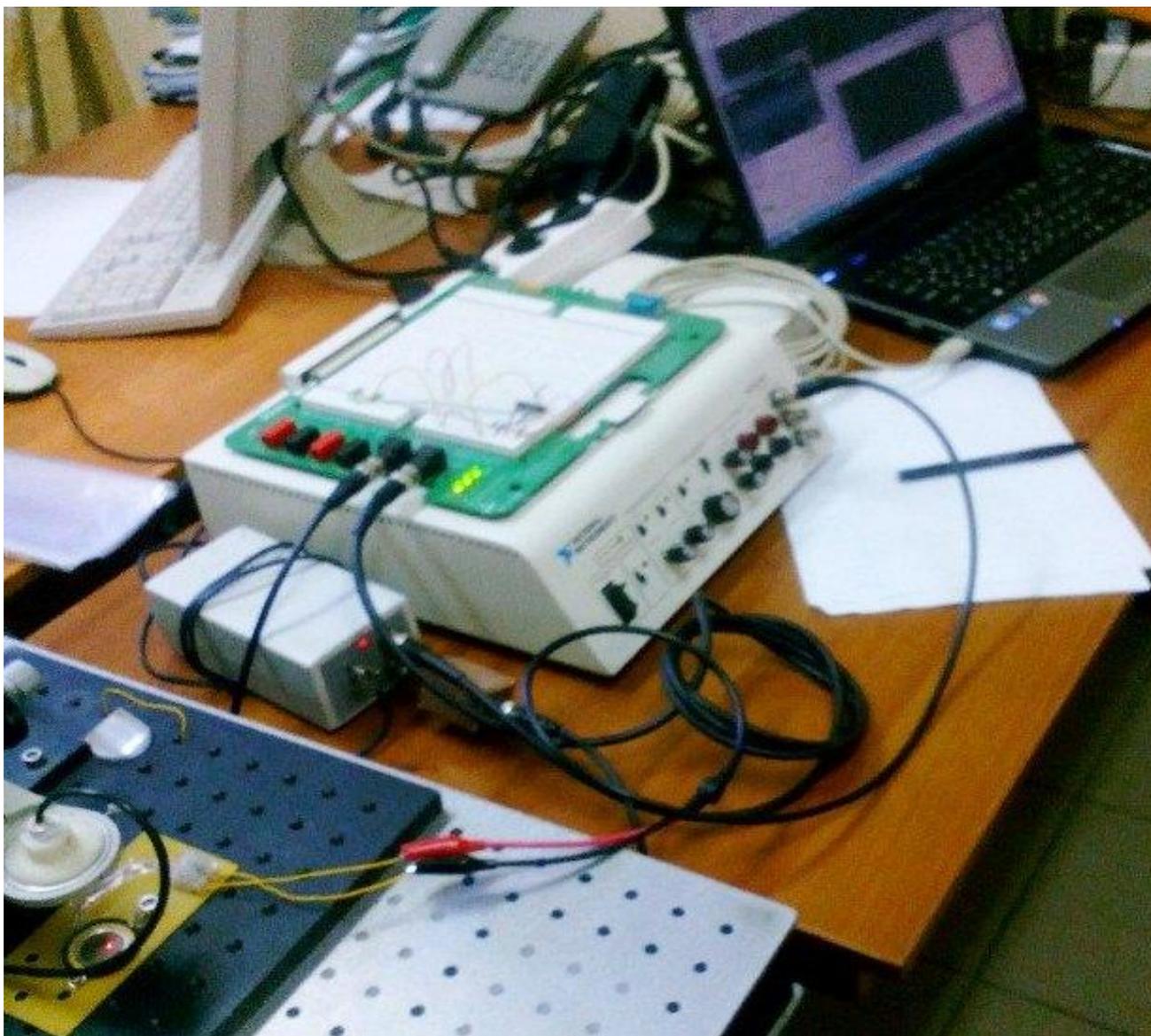


Рисунок. 3.1. Вид экспериментальной установки.

Блок-схема установки изображена на рис. 3.2.

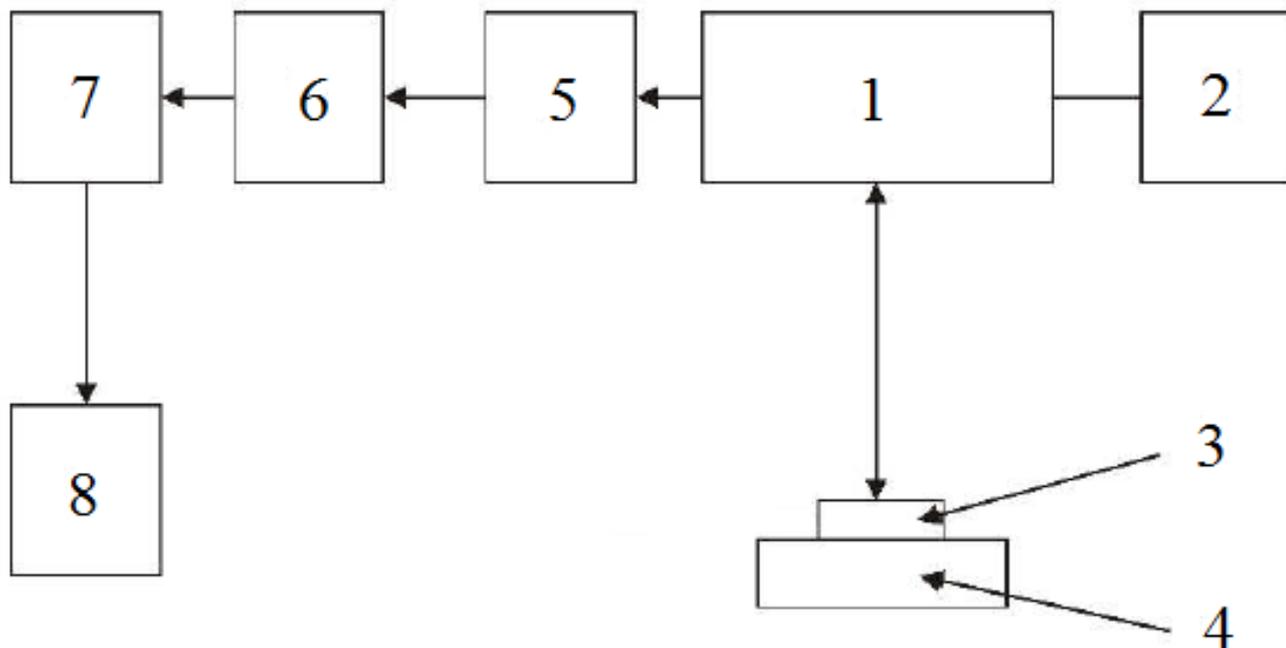


Рисунок 3.2. 1 – полупроводниковый лазер, 2 – блок управления током, 3 – исследуемый объект, 4 – механизм фиксации, 5 – встроенный фотодетектор, 6 – генератор сигналов на базе платформы NI ELVIS , 7 – аналого-цифровой преобразователь, 8 –ЭВМ.

Экспериментальные измерения были проведены с использованием частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина на лазерном диоде RLD-650(5) на квантово-размерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с длиной волны 654 нм – 1, излучение направлялось на исследуемый образец – 3, удерживаемый механизмом фиксации – 4, диаметр лазерного луча на объекте составлял 1мм. Модуляция длины волны излучения проводилось на частоте $\Omega = 300$ Гц с помощью генератора сигналов на базе платформы NI ELVIS – 6. Изменение тока питания лазерного диода мы осуществляли путем изменения напряжения питания, подаваемого на полупроводниковую структуру от источника питания – 2.

Экспериментально было установлено, что эффективная модуляция тока питания лазерного диода наблюдалась при амплитуде модулирующего сигнала от 20 мВ до 500 мВ, это обеспечивало наличие в спектре автодинного сигнала спектральных составляющих высших порядков. Отраженное излучение попадало в резонатор лазера. Изменение мощности лазера фиксировалось фотодетектором – 5.

Продетектированный и усиленный сигнал с фотодетектора поступал в аналого-цифрового преобразователя – 7, который был соединен с ЭВМ - 8. Значение ω_A измерялось с помощью спектрометра высокого разрешения SHR (Solar Laser Systems).

На рисунке 3.3 и 3.4 приведен вид автодинного сигнала и его спектр, полученный при $\omega_A = 132 \cdot 10^8$ рад./с.

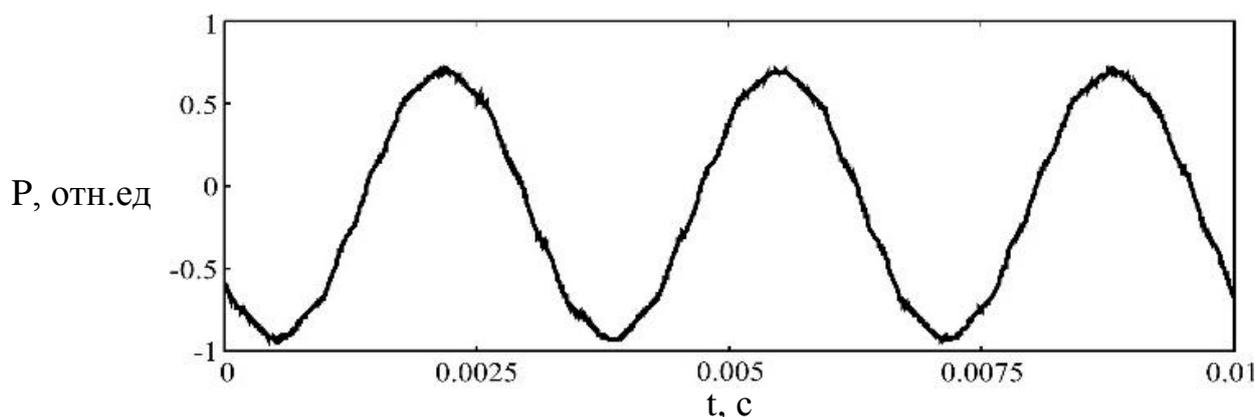


Рисунок 3.3. Частотномодулированный автодинный сигнал полученный на экспериментальной установке при $\omega_A = 132 \cdot 10^8$ рад./с

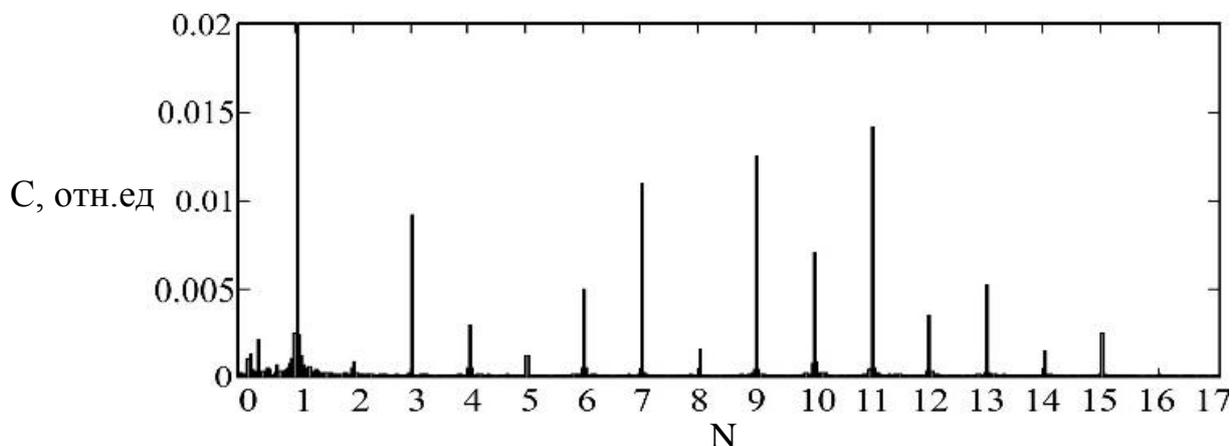


Рисунок 3.4. Спектр автодинного сигнала, приведенного на рис. 3.3

На рисунке 3.5 приведены результаты вычислений параметра σ для различных наборов спектральных гармоник n и $n+2$.

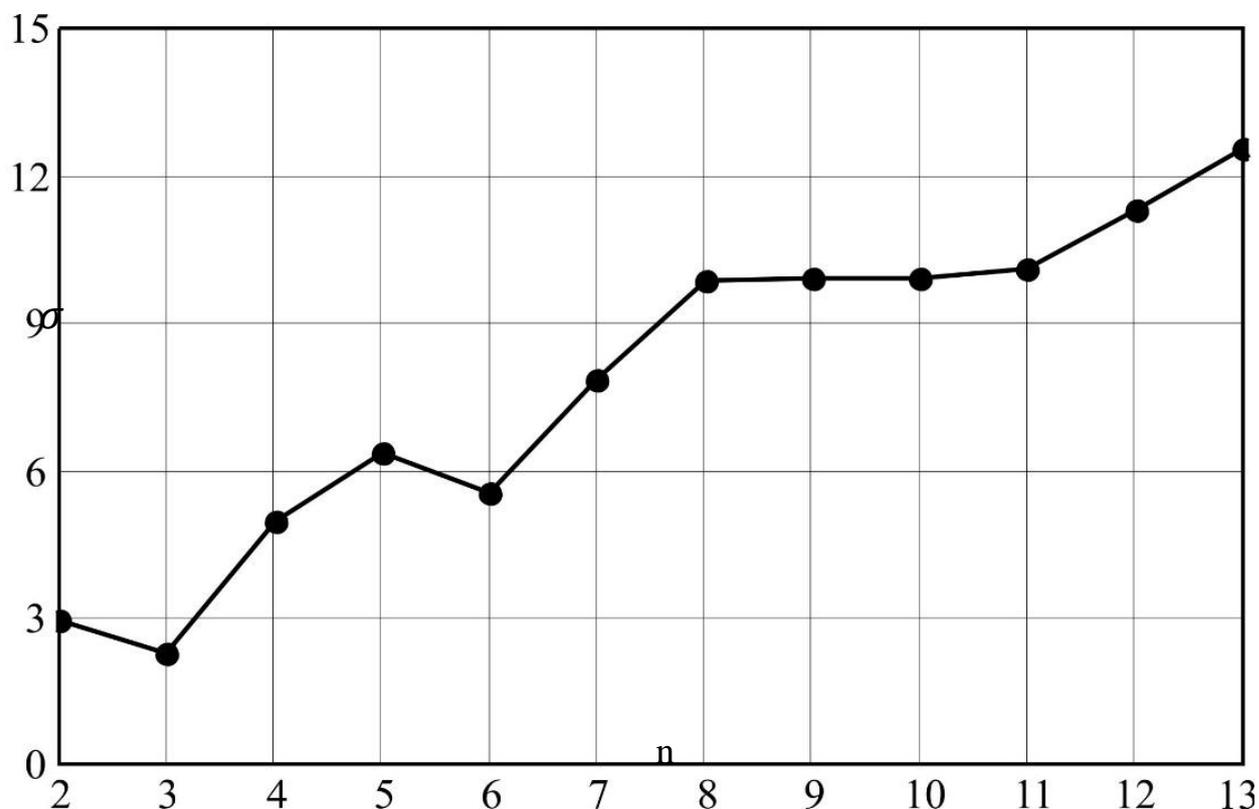


Рисунок 3.5. Результаты вычислений параметра σ для различных наборов отношений n и $n+2$

Из рисунка 3.5 видно, что для номеров n равных 8,9,10 наблюдается минимальный разброс параметра σ . Проверка однозначности вычисленного параметра σ и порядка функции Бесселя, показывает, что начиная с номера n равного 8, наблюдается однозначное решение. При номерах n , начиная с 11, в спектре сигнала наблюдается значительное уменьшение амплитуды спектральных составляющих, что приводит к увеличению погрешности определения параметра σ .

Исходя из области однозначности функций Бесселя, по отношению спектральных составляющих с 8 по 12 вычисленное значение параметра σ

составило 9.883 ± 0.033 , при этом расстояние до объекта составило 11.231 ± 0.030 см.

Таким образом, показано, что гармоническая модуляция длины волны излучения посредством частотной модуляции тока накачки лазерного диода позволяет определять расстояния до объекта по отношению спектральных составляющих автодинного сигнала полупроводникового лазера. Проверка области однозначности аргумента и порядка функции Бесселя, имеющей однозначное решение, позволяет использовать различные наборы спектральных гармоник автодинного сигнала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Был проведен критический анализ методов по определению расстояния до объекта, моделирование полупроводникового лазерного автодина с частотной модуляцией.

Было показано, что относительная погрешность метода автодинной интерферометрии для определения расстояния при модуляции длины волны лазерного излучения не превосходит 1,2%

В работе активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией, авторами было установлено, что среднеквадратичные отклонения оценок дальности не превышают 0,5 мм.

Было показано что точность измерения расстояния с помощью триангуляционных датчиков составляет 0,4 мм

Показано, что гармоническая модуляция длины волны излучения посредством частотной модуляции тока накачки лазерного диода позволяет определять расстояния до объекта по отношению спектральных составляющих автодинного сигнала полупроводникового лазера. Проверка области однозначности аргумента и порядка функции Бесселя, имеющей однозначное решение, позволяет использовать различные наборы спектральных гармоник автодинного сигнала.

Нами был проведен эксперимент по определению расстояния до объекта по высшим спектральным гармоникам частотно-модулированного автодинного сигнала в котором была достигнута следующая точность измерения расстояния 0.3 мм при расстоянии 10 см.

Как следует из результатов измерений абсолютных расстояний описанным выше методом, полученная нами, точность измерений соответствует указанным достижениям в работах представленных в критическом анализе.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., and Rioux M., Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement // Opt. Eng. 40, 10–19 (2001).
2. Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T., Laser diode self-mixing technique for sensing applications // J.Opt.A:PureAppl.Opt.4(6)(2002)S283–S294.
3. 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.
4. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов // Квант. Электроника. 2011. 41 (1). С. 86–94.
5. Соболев В.С., Кашеева Г.А. Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией // Автометрия. 2008. том 44. №6. С. 49-65.
6. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях, / Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. 136 с.
7. Гершензон Е.М., Туманов Б.Н., Левит Б.И. // Изв. вузов.Радиофизика. 1980. Т. 23. № 5. С. 535–541.
8. Малыкин Г.Б., Носков В.Я., Смольский С.М. // Радиотехника. 2012. № 6. С. 20–24.
9. Астахов Е.И., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю. // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15. № 3. С. 12–18.
10. Unlocking dynamical diversity: Optical feedback effects on semiconductor lasers // Ed. by Deborah M. Kane and K. Alan Shore. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium. 2005. 333 p.
11. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 21. С. 72–77.
12. Lang R., Kobayashi K. // IEEE J. Quantum Electron. 1980. V. QE-16. N 3. P. 347–355.