

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

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

Кафедра физики твердого тела

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ АБСОЛЮТНОГО РАССТОЯНИЯ ПО  
НИЗКОЧАСТОТНОМУ СПЕКТРУ ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО  
ЛАЗЕРНОГО АВТОДИНА**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 2 курса 2251 группы

направления (специальности) 11.04.04 «Электроника и наноэлектроника»

Института физики

Лексина Михаила Сергеевича

Научный руководитель

д. ф.- м. н., профессор

Ан. В. Скрипаль

должность, уч. степени, уч задание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой физики твердого тела

д. ф.- м. н., профессор

Ал. В. Скрипаль

должность, уч. степени, уч задание

подпись, дата

инициалы, фамилия

Саратов 2021

В различных статьях предлагается использовать метод измерения расстояния, основанный на использовании модуляции длины волны лазерного излучения по гармоническому закону. Актуальность моей научной исследовательской работы заключается в следующем: был проанализирован метод, основанный на использовании треугольной модуляции излучения лазерного автодина и предложен метод определения абсолютного расстояния без измерения величины девиации длины волны лазерного автодина.

Целью научной исследовательской работы является: исследование возможности определения абсолютного расстояния по низкочастотному спектру полупроводникового лазерного автодина при треугольной модуляции длины волны лазерного излучения без измерения величины девиации длины волны лазерного автодина.

Задачами научной исследовательской работы в связи с указанной целью являются:

1. Анализ методов определения расстояния интерферометрии и триангуляции.
2. Анализ метода определения расстояния с помощью лазерного автодина.
3. Анализ методов измерения расстояния при пилообразной модуляции излучения лазерного автодина.
4. Проведение моделирования определения абсолютного расстояния по спектру автодинного сигнала без измерения величины девиации длины волны лазерного автодина.
5. Проведение экспериментальное по определению расстояния от автодина до отражателя по спектру и длине волны девиации без измерения величины девиации длины волны лазерного автодина.

## Моделирование определения абсолютного расстояния по спектру автодинного сигнала.

Для нахождения расстояния от лазера до отражателя с помощью двух спектров на разных расстояниях и регулирования длины волны девиации, было проведено математическое моделирование в программном пакете Mathcad 15.

Моделирование автодинного сигнала проводилось при следующих параметрах: длина волны излучения лазерного диода  $\lambda=650\text{нм}$ , количество полуволин автодинного сигнала на участке подъёма и спада  $N=23$ , девиация длины волны излучения  $\Delta\lambda_1=0,03547\text{нм}$  и расстояние, рассчитанное по формуле (38)  $L_1= 0.06849097\text{м}$ . На рис. 1 представлен вид автодинного сигнала, а на рис. 2 его спектр.

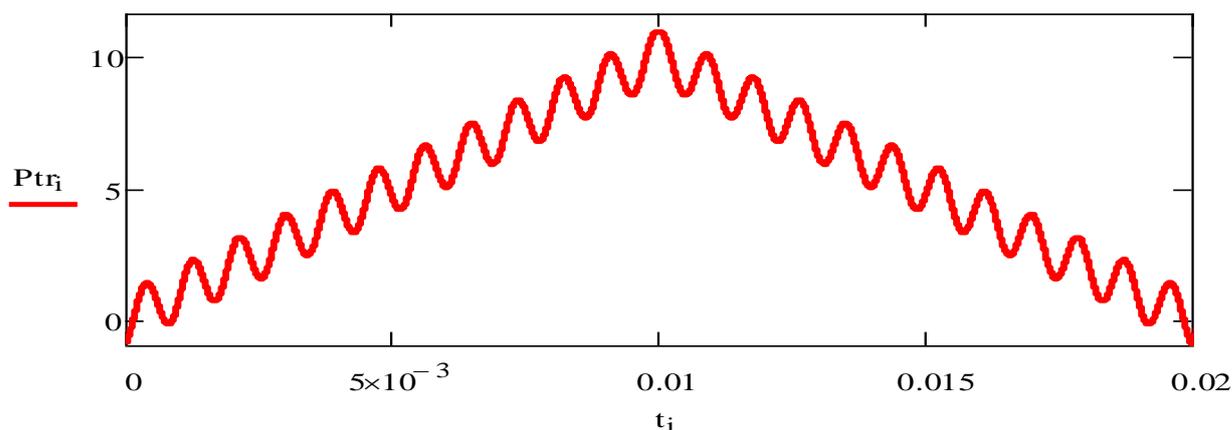


Рисунок 1 – Смоделированный автодинный сигнал при изменении длины волны излучения лазера  $\Delta\lambda_1=0,03547\text{нм}$  и заданном расстоянии  $L_1= 0.06849097\text{м}$ .

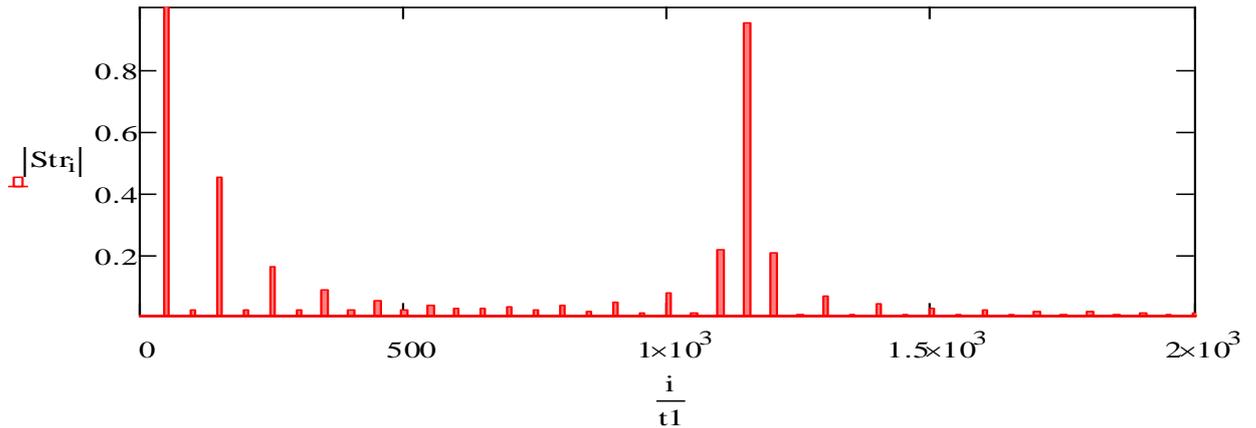


Рисунок 2 – Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 10.

С помощью встроенной функции Mathcad трассировки, по спектру была определена частота  $f_1=1150$  интересующей нас гармоники.

Далее моделирование автодинного сигнала проводилось при следующих параметрах: длина волны излучения лазерного диода оставалась прежней, количество полуволн автодинного сигнала на участке подъёма и спада  $N=27$ , девиация длины волны излучения оставалась без изменений и расстояние, рассчитанное по формуле (38)  $L_2=0.08040245\text{м}$ . На рис. 3 представлен график автодинного сигнала, а на рис. 4 его спектр.

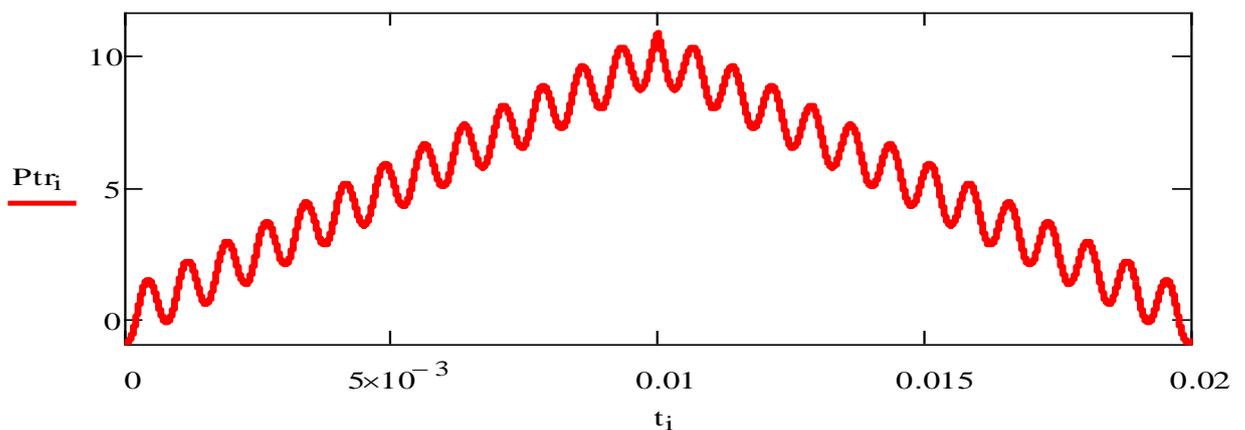


Рисунок 3 – Смоделированный автодинный сигнал при изменении длины волны излучения лазера  $\Delta\lambda_1=0,03547$  нм и заданном расстоянии  $L_2=0.08040245\text{м}$ .

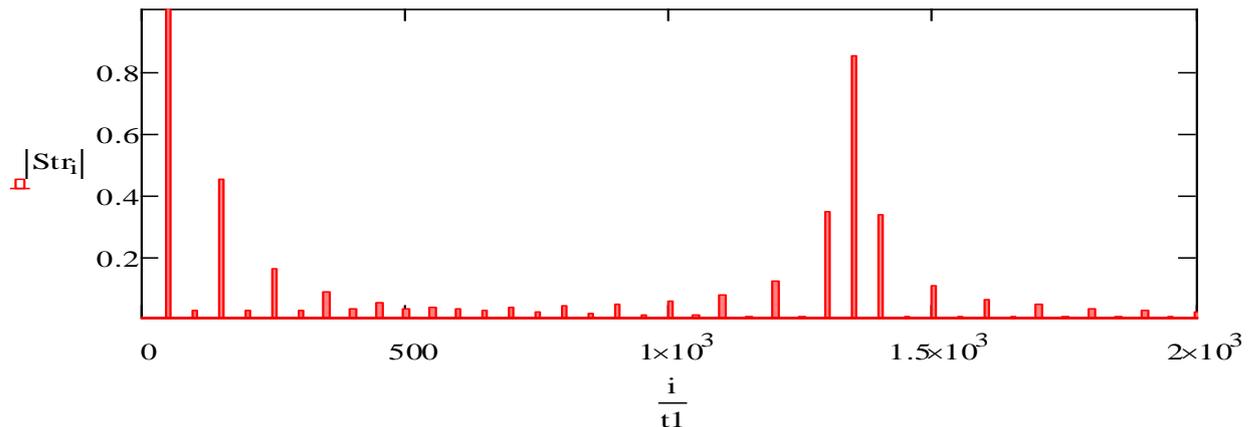


Рисунок 4 – Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис. 3.

С помощью трассировки, по спектру была определена частота  $f_2=1350$  интересующей нас гармоники.

Следующим шагом изменялась длина волны девиации  $\Delta\lambda$ , не меняя расстояние, нужно было, чтобы  $f_2$  было равно  $f_1$ , т.е. проводилось уменьшение  $\Delta\lambda$  до тех пор, пока выраженная гармоника не стала равной гармонике при первоначальных условиях.

Моделирование автодинного сигнала при изменении  $\Delta\lambda$  и следующих параметрах: длина волны излучения лазерного диода оставалась прежней, количество полувольт автодинного сигнала на участке подъёма и спада  $N=23$ , девиация длины волны излучения стала равна  $\Delta\lambda_3=0.0302152$  нм и расстояние осталось прежним  $L_2=0.08040245$ м.

Далее проводилось подобное моделирование, но для расстояния  $L_1$ , при этом изменялась длина волны девиации  $\Delta\lambda$ , не меняя расстояние, таким образом, чтобы  $f_1$  было равно  $f_2$ , т.е. увеличивать  $\Delta\lambda$  до тех пор, пока выраженная гармоника не будет равна гармонике как при условиях  $L_2=0.08040245$ м,  $\Delta\lambda_1=0,03547$  нм.

Моделирование автодинного сигнала при изменении  $\Delta\lambda$  и следующих параметрах: длина волны излучения лазерного диода оставалась прежней, количество полувольт автодинного сигнала на участке подъёма и спада  $N=27$ , девиация длины волны излучения стала равна  $\Delta\lambda_2=0,0407248$  нм и расстояние вернули к первоначальному  $L_1=0.06849097$ м.

Далее проводилось вычисление для нахождения расстояния  $L_1$ , а точнее решение обратной задачи. Ниже представлены формулы нахождения расстояния для четырёх случаев, которые были рассмотрены выше.

Для случая, когда расстояние  $L_1$  и напряжение  $\Delta\lambda_1$  не изменялось.

$$L_1 = \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda_1} N_1$$

Для случая, когда расстояние  $L_2$  и напряжение  $\Delta\lambda_1$  не изменялось.

$$L_2 = L_1 + \Delta L = \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda_1} N_2$$

Далее рассмотрен случай, когда расстояние  $L_1$ , а вырожденная гармоника равна спектру для  $L_2$ .

$$L_1 = \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda_2} N_2$$

Для случая, когда расстояние  $L_2$ , а вырожденная гармоника равна спектру для  $L_1$ .

$$L_2 = L_1 + \Delta L = \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda_3} N_1$$

Таким образом было получено 4 уравнения. Далее было выражено  $N_1$  и  $N_2$  из этих уравнений.

$$N_1 = \frac{4\Delta\lambda_3(L_1 + \Delta L)}{\lambda^2} = \frac{4\Delta\lambda_1 L_1}{\lambda^2}$$

$$N_2 = \frac{4\Delta\lambda_1(L_1 + \Delta L)}{\lambda^2} = \frac{4\Delta\lambda_2 L_1}{\lambda^2}$$

Известно, что  $N$  и  $\Delta\lambda$  для одного расстояния должны изменяться прямо пропорционально.

Т. о. мы можем записать, что

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\Delta\lambda_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \text{и} \quad \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_3} = \frac{N_2}{N_1}$$

Отсюда получили, что

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\Delta\lambda_1} = \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_3} = \frac{L_1 + \Delta L}{L_1}$$

Из полученного выше соотношения можно выразить  $L_1$

$$L_1 = \frac{\Delta L}{\frac{\Delta\lambda_1}{\Delta\lambda_3} - 1}$$

Мы получим

$$L_1 = \frac{0,012}{1,174-1} = 0,06849124\text{м}$$

Ниже подсчитана абсолютная и относительная погрешность данного метода.

Абсолютная погрешность составляет:

$$L_{\text{абс}} = 0,06849124\text{м} - 0,06849097\text{м} = 0,00000027\text{м} = 270\text{нм}$$

Относительная погрешность составляет:

$$L_{\text{отн}} = \frac{0,06849124 - 0,06849097}{0,06849097} = 0,000394\%$$

Из полученных результатов можно сделать вывод, что данный метод пригоден для использования, по точности он не уступает своим аналогам, а является даже точнее некоторых. Рассмотренный метод даёт возможность нахождения расстояния по спектру не зная длину волны девиации, а зная только характеристику, от которой бы прямо пропорционально зависела длина волны девиации. Например, как представлено в эксперименте, этой характеристикой являлась девиация напряжения смещения  $U_{\text{см}}$ .

## Экспериментальное определение расстояния от автодина до отражателя по спектру без измерения величины девиации длины волны лазерного автодина.

Измерения проводились на установке, изображение которой представлено на рис. 5.

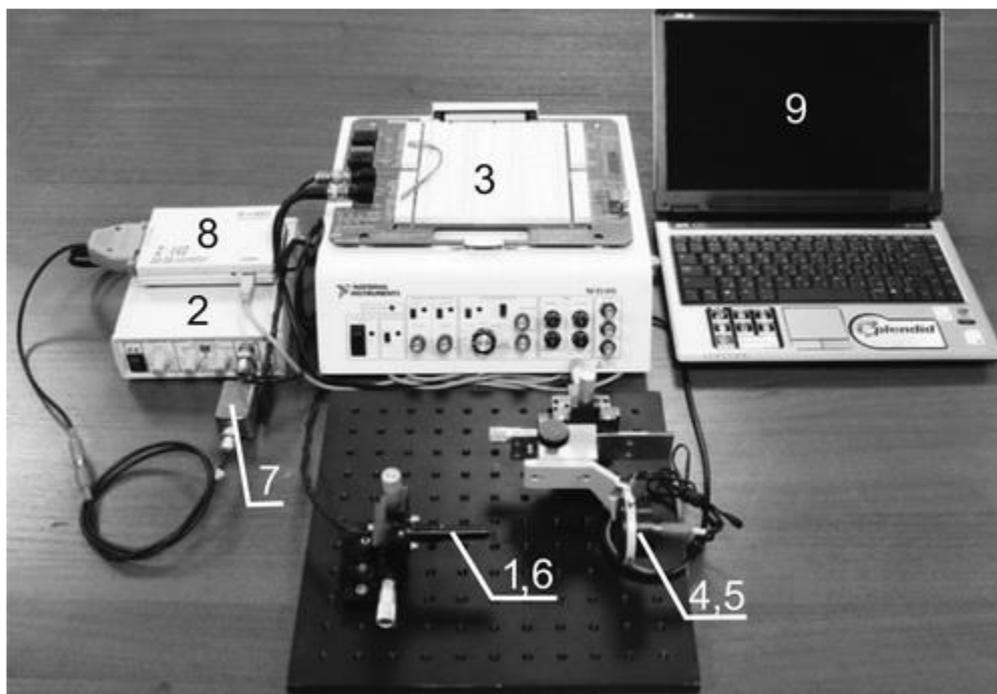


Рисунок 5 – Вид экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – блок управления током питания, 3 – генератор сигналов на базе платформы NI ELVIS, 4 – объект, 5 – микромеханическая подача, 6 – фотоприемник, 7 – фильтр переменного сигнала, 8 – АЦП, 9 – компьютер

Проделанная практическая работа состоит из трех этапов.

**Этап1.** Устанавливался отражатель на расстояние  $L_1$  (неизвестное) от автодина. Фиксировался спектр на протяжении небольшого интервала времени (5 снимков). На рис. 6 приведён вид автодинного сигнала, а на рис. 7 его спектр при девиации напряжения смещения  $U_{см1}=2.112$  В и расстоянии  $L_1$ .

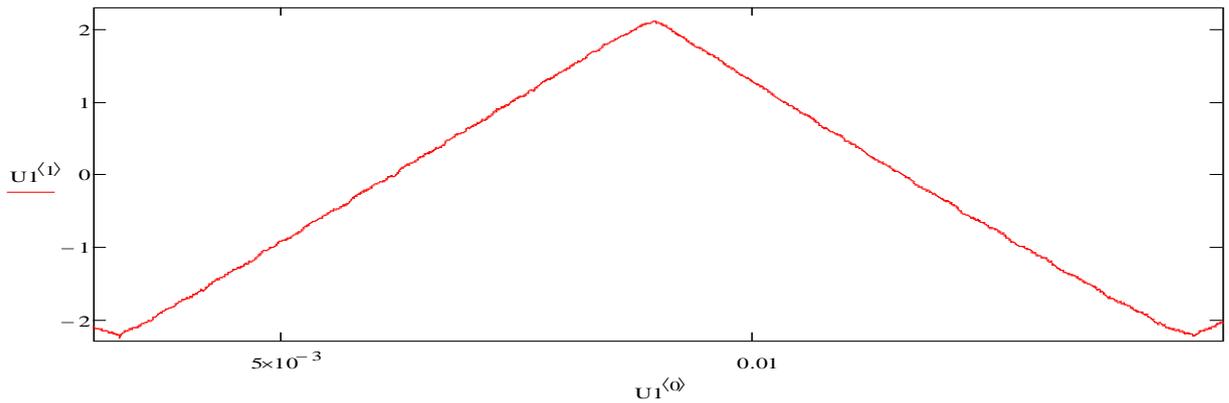


Рисунок 6 – Частотно-модулированный автодинный сигнал, полученный на экспериментальной установке при девиации напряжения смещения лазерного диода  $U_{см1} = 2.112$  В и расстоянии  $L_1$ .

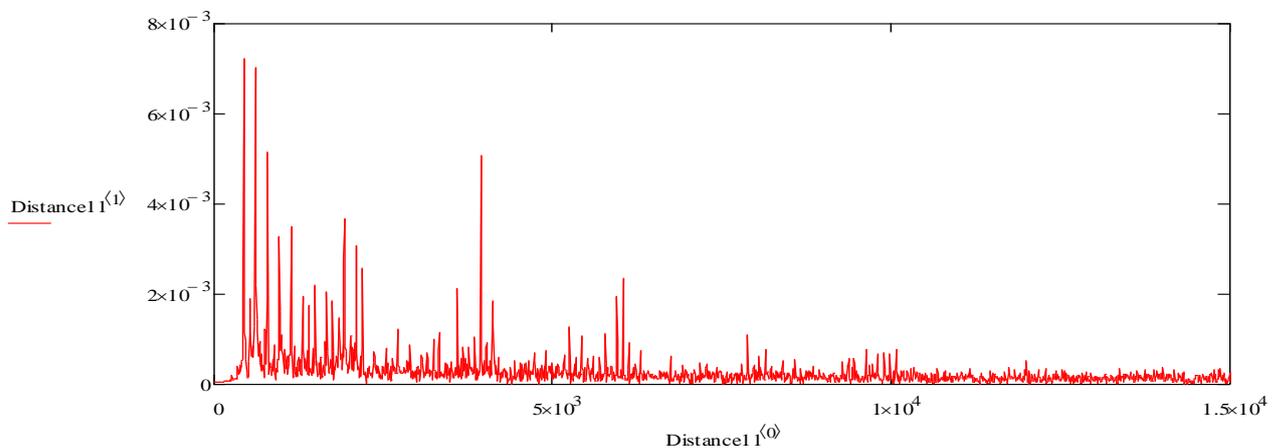


Рисунок 7 – Спектр частотно-модулированного автодинного сигнала, полученный на экспериментальной установке при девиации напряжения смещения лазерного диода  $U_{см1} = 2.112$  В и расстоянии  $L_1$ .

После определения выраженной гармоники на расстоянии  $L_1$ , менялось расстояние между отражателем и автодином на  $\Delta L$  и получили новое расстояние  $L_2=L_1+\Delta L$ , где  $\Delta L = 0.01$ м. Аналогичным образом фиксировался спектр. Ниже представлен вид автодинного сигнала и его спектр. На рис. 8 приведён вид автодинного сигнала, а на рис. 9 его спектр при девиации напряжения смещения  $U_{см1} = 2.112$  В и расстоянии  $L_2$ .

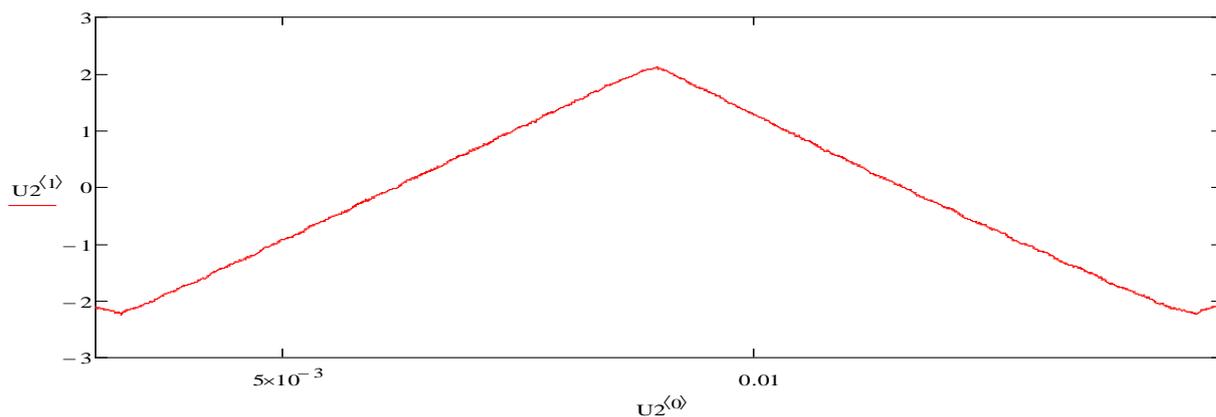


Рисунок 8 – Частотно-модулированный автодинный сигнал, полученный на экспериментальной установке при девиации напряжения смещения лазерного диода  $U_{см1} = 2.112$  В и расстоянии  $L_2$ .

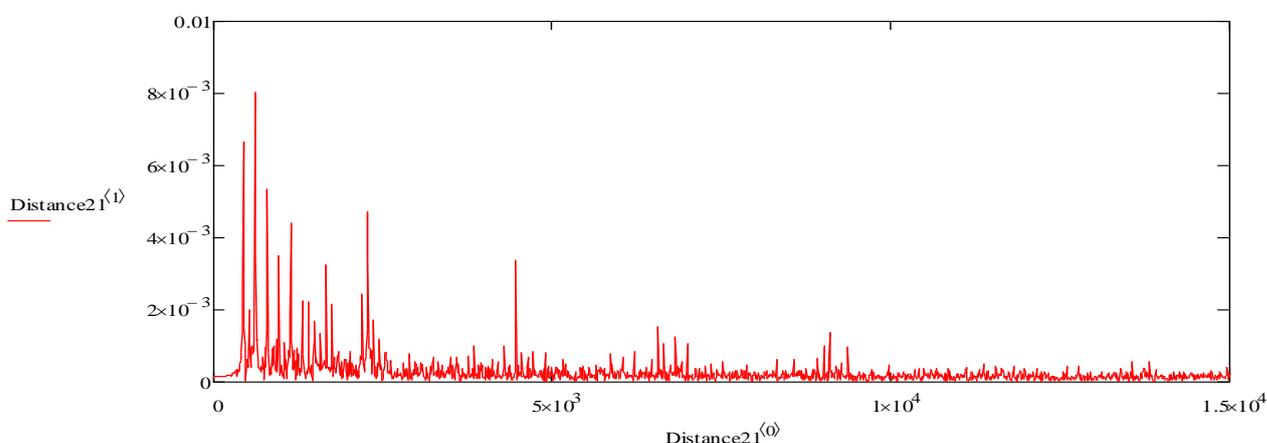


Рисунок 9 – Спектр частотно-модулированного автодинного сигнала, полученный на экспериментальной установке при девиации напряжения смещения лазерного диода  $U_{см1} = 2.112$  В и расстоянии  $L_2$ .

Во время всего первого этапа значение напряжения смещения лазерного диода  $U_{см}$  не изменялось. В следующем этапе оно будет задействовано.

**Этап 2.** Следующим шагом эксперимента являлось смещение ярко выраженной гармоники. На экспериментальной установке выставлялось первоначальное расстояние  $L_1$  между отражателем и детектором. Затем с помощью напряжения смещения лазерного диода  $U_{см}$ , смещали выраженную гармонику в правую сторону, до тех пор, пока она не станет равной по частоте выраженной гармонике для расстояния  $L_2$ . Т.е. При расстоянии  $L_2$  номер гармоники должен был быть равен  $N_2$ . Фиксировалось напряжение. На рис. 10 представлены спектры. Отображаемые линии красным цветом, является

начальным (сплошная линия) и конечным положением (линией точек) выраженной гармонике. Синим цветом отмечены гармоники промежуточных замеров при изменении напряжения смещения лазерного диода  $U_{см}$ . Начальное положение  $U_{см1} = 2.112$  В, конечное  $U_{см2} = 2.343$  В

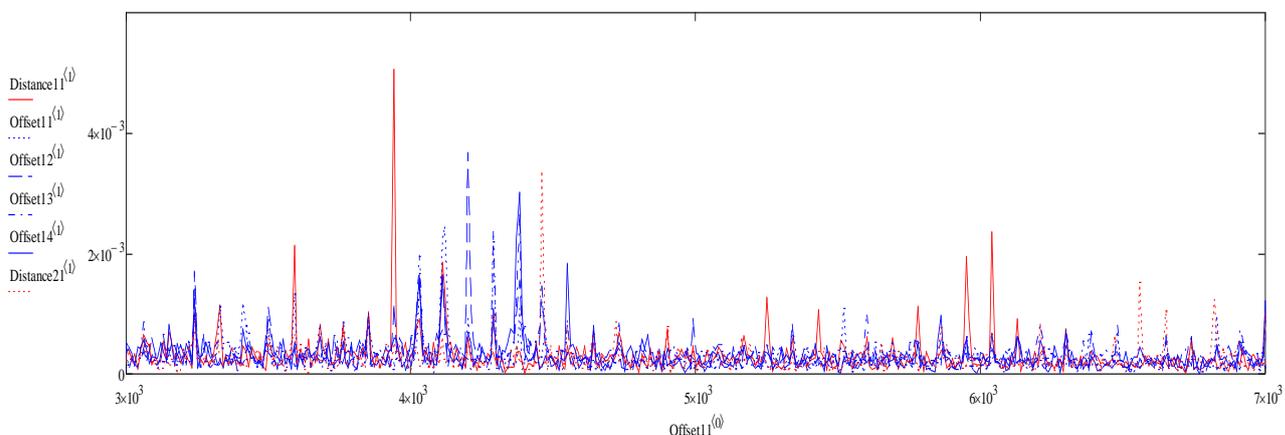


Рисунок 10 – Спектры частотно-модулированного автодинного сигнала для расстояния  $L_1$  и различных значений напряжения смещения лазерного диода  $U_{см}$ .

Для этого и нужен был первый этап, чтобы определить выраженные гармоники для разных расстояний.

Далее повторялся этап 2, но для расстояния  $L_2$ . На экспериментальной установке выставлялось первоначальное расстояние  $L_2$  между отражателем и детектором, также выставлялось первоначальное значение  $U_{см}$ . Затем с помощью напряжения смещения лазерного диода  $U_{см}$ , смещали выраженную гармонику в левую сторону, до тех пор, пока она не станет равной по частоте выраженной гармонике для расстояния  $L_1$ . Т.е. При расстоянии  $L_2$  номер гармоники должен был быть равен  $N_1$ . Фиксировалось напряжение. На рис.11 представлены спектры. Отображаемые линии красным цветом, является начальным (сплошная линия) и конечным положением (линией точек) выраженной гармонике. Синим цветом отмечены гармоники промежуточных замеров при изменении напряжения смещения лазерного диода  $U_{см}$ . Начальное положение  $U_{см1} = 2.112$  В, конечное  $U_{см3} = 1.842$  В.

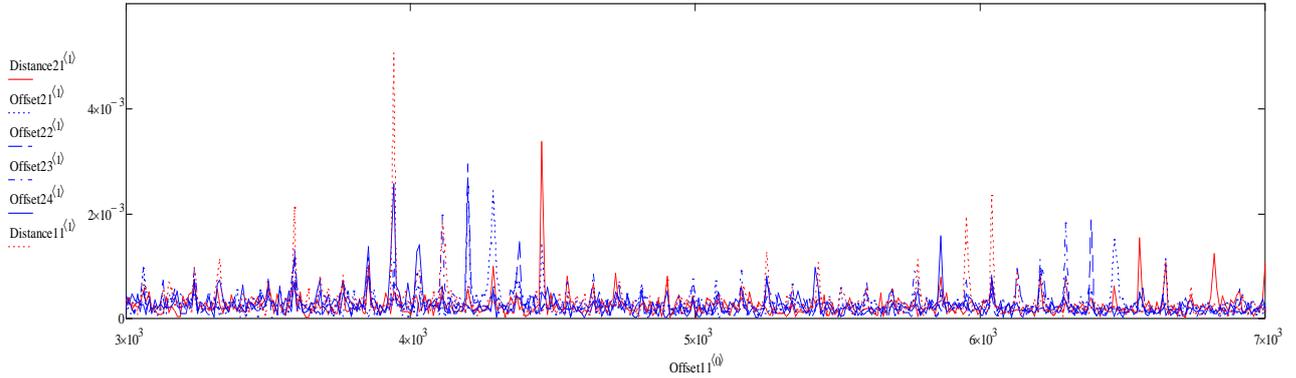


Рисунок 11 – Спектры частотно-модулированного автодинного сигнала для расстояния  $L_2$  и различных значений напряжения смещения лазерного диода  $U_{см}$ .

**Этап 3.** Последний этап заключался в расчетах расстояния  $L_1$  и длины волны девиации  $\Delta\lambda$  по полученным экспериментальным данным. Для начало было найдено расстояние  $L_1$ . Нам была известна формула для нахождения расстояния по автодинному сигналу  $L = \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda} N$ . Но нам не известно  $\Delta\lambda$ , известно только напряжение  $U_{см}$ , от которого прямо пропорционально зависит длина волны девиации  $\Delta\lambda$ .

Теория метода заключалась в следующем, описание формул расстояния для четырёх выше представленных вариантов. По данным формулам определить взаимосвязи параметров  $\Delta\lambda$ ,  $N$ . Свести полученные данные к общему новому уравнению для нахождения расстояния по известным из эксперимента данным.

Из полученной формулы в моделировании можно выразить  $L_1$  используя

$$L_1 = \frac{\Delta L}{\frac{U_{см1}}{U_{см3}} - 1}$$

Теперь в полученное выражение осталось подставить экспериментально полученные данные  $\Delta L = 0,01\text{м}$ ,  $U_{см1} = 2.112\text{ В}$ ,  $U_{см3} = 1.842\text{ В}$

$$L_1 = \frac{0,01}{1.146-1} = 0,068493\text{м}$$

После нахождения  $L_1$  было найдено  $\Delta\lambda$  из выражения  $L_1 = \frac{\lambda^2}{4\Delta\lambda_1} N_1$ . Нам известны следующие параметры  $\lambda = 650\text{нм}$ ,  $L_1 = 0,069\text{м}$ ,  $N_1 = 23$ .

$$\Delta\lambda_1 = \frac{4,225 \cdot 10^{-13}}{4 \cdot 0,068493} * 23 = 0,03547\text{нм}$$

Ниже подсчитана абсолютная и относительная погрешность результатов полученных экспериментально и с помощью моделирования.

Абсолютная погрешность составляет:

$$L_{\text{абс}} = 0,068493\text{м} - 0,06849097\text{м} = 0,00000203\text{м} = 2,7\text{мкм}$$

Относительная погрешность составляет:

$$L_{\text{отн}} = \frac{0,00000203}{0,06849097} = 0,00296\%$$

В целом, полученные данные говорят о возможности нахождения расстояния до отражателя автодинной лазерной интерферометрией при треугольной токовой модуляции за счёт спектра и девиации напряжения смещения. По сравнению с аналоговыми методами нахождения расстояния данный метод не уступает им по точности измерения. Но данную погрешность можно ещё уменьшить за счет устранения некоторых факторов, вот некоторые из них:

- Вибрация рабочего ПК, которая могла влиять на спектр лазерного автодина.
- Ограничения точности микромеханической подачи при сдвиге на 1см. А также погрешность самой установки.
- Влияние физические характеристик конструкции в целом. (Точность АЦП)
- Сложности в сравнении спектров при разных расстояниях на используемой установке.

Возможно, устранив некоторые из этих факторов можно достигнуть точности выше, чем у аналоговых методов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения научно-исследовательской работы проведен анализ современного состояния исследований в применении лазеров для измерения микро- и наносмещений.

Проведено моделирование автодинного лазерного излучения. Построены спектры автодинного сигнала при различных расстояниях до отражателя. Решена обратная задача по нахождению расстояния используя отношение значений длин волн девиаций лазерного излучения.

Проведено практическое исследование на экспериментальной установке. Исследована возможность определения абсолютного расстояния по низкочастотному спектру полупроводникового лазерного автодина при треугольной модуляции длины волны лазерного излучения без измерения величины девиации длины волны лазерного автодина.

Продемонстрированы абсолютные и относительные погрешности, как для метода, так и для эксперимента. На основе которых был сделан вывод, что данный метод является точным до  $10^{-5}$  м, в точности он не уступает своим аналогом. Также данный метод позволяет определить расстояние до отражателя без знания длины волны девиации.