

**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики твёрдого тела

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

**ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИЙ ЛАЗЕРНЫМ АВТОДИНОМ  
ПРИ РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНИ ФОКУСИРОВКИ ИЗЛУЧЕНИЯ**

студента 4 курса 4051 группы

направления 11.03.04 «ЭЛЕКТРОНИКА И НАНОЭЛЕКТРОНИКА», профиль  
«МИКРО- И НАНОЭЛЕКТРОНИКА, ДИАГНОСТИКА НАНО- И  
БИОМЕДИЦИНСКИХ СИСТЕМ»

код и наименование направления

института физики  
наименование факультета, института

Тарасюка Данилы Александровича

фамилия, имя, отчество

Научный            руководитель  
Доцент, к.ф.-м.н.  
должность, уч. степень, уч. звание

  
\_\_\_\_\_  
подпись, дата

С.Ю. Добдин  
инициалы, фамилия

Зав. кафедрой: Профессор,  
д.ф.-м.н.,\_должность, уч. степень, уч.  
звание

  
\_\_\_\_\_  
подпись, дата

А.В. Скрипаль  
инициалы, фамилия

Саратов 2023 г.

## *Введение*

Автодинный лазер – это относительно новый вид лазера, представляющий собой уникальное сочетание активной среды и оптических резонаторов. Он был разработан в 21 веке и применяется в основном в медицине, научных исследованиях, а также для промышленных целей.

Принцип работы автодинного лазера основан на использовании твердотельного активатора и специального оптического резонатора. При прохождении через активатор поток света вызывает эффект оптического возбуждения, который в свою очередь приводит к выделению энергии в виде лазерного излучения.

Преимущества автодинного лазера заключаются в его высокой стабильности и мощности, что делает его идеальным инструментом для различных медицинских процедур, таких как хирургические операции и лечение заболеваний кожи.

Изучение автодинного лазера может быть полезным, как для будущих медицинских работников, так и для тех, кто занимается научными исследованиями в области физики и оптики.

*Целью* данной работы является измерение параметров вибраций лазерным автодином при различной степени фокусировки излучения.

*Задачами данной работы является:*

- 1) провести критический анализ литературы по данной теме;
- 2) разработать метод измерения диаметра лазерного пучка;
- 3) провести экспериментальное исследование по определению амплитуды вибраций внешнего отражателя при разной степени фокусировки излучения.

Бакалаврская работа содержит 4 главы:

1. Устройство лазеров
  - 1.1 Принцип действия лазеров
  - 1.2 Конструкция лазеров
  - 1.3 Активные среды лазеров
  - 1.4 Источник накачки
  - 1.5 Оптический резонатор
  - 1.6 Типы лазеров
- 2. Лазерная интерферометрия**
  - 2.1 Принцип лазерной интерферометрии
  - 2.2 Автодинная интерферометрия
- 3. Методы определения параметров движения**
  - 3.1 Методы лазерной интерферометрии
  - 3.2 Гомодинный метод
  - 3.3 Гетеродинный метод
  - 3.4 Полупроводниковый лазерный автодин
  - 3.5 Лазерные доплеровские методы
  - 3.6 Голографический метод
  - 3.7 Спекл-интерферометрический метод
4. Компьютерное моделирование
- 5. Экспериментальное определение измерения параметров вибраций лазерным автодином при различной степени фокусировки излучения**
  - 5.1 Экспериментальная установка
  - 5.2 Экспериментальное измерение параметров вибраций лазерным автодином при различной степени фокусировки излучения

### *Основное содержание*

*Первый раздел:* описываются принцип действия лазера, конструкция лазеров и их типы.

*Второй раздел* посвящен рассмотрению лазерной и автодинной интерферометрии.

*Третий раздел* подробно рассматриваются методы определения микро- и наносмещений, как: гомодинный и гетеродинный методы.

*В Четвёртом разделе* описывается компьютерное моделирование, которое позволяет по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазера определить скорость движения внешнего отражателя.

Нормированная переменная составляющая автодинного сигнала представляется в виде:

$$P(t) = \cos \left[ \theta + \frac{4\pi}{\lambda_0} (f(t)) \right]$$

где,

$f(t) = A \cos(\omega t)$  – функция движения внешнего отражателя при периодическом движении,

где  $A$  – амплитуда движения,  $\omega = 2\pi\nu$ ,

$\nu$  – частота гармонической функции,

$\theta$  – набег фазы автодинного сигнала,

$\lambda_0$  – длина волны лазерного излучения,

$V$  – скорость внешнего отражателя,

$t$  – интервал времени, наблюдаемого автодинного сигнала,

$P(t)$  – функция, описывающая продольные перемещения объекта

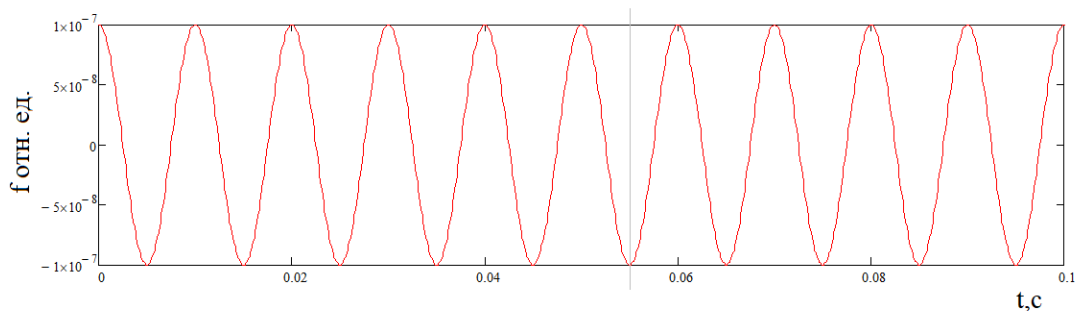


Рисунок 1 – Вид автодинного сигнал при равномерном движении внешнего отражателя

При компьютерном моделировании сигнала полупроводникового лазерного автодина были использованный следующие параметры: длина волны излучения полупроводникового лазера составила  $\lambda = 650\text{нм}$ , с шагом  $0,5 \cdot 10^{-5}$  м/с, набег фазы автодинного сигнала  $\theta = \frac{\pi}{4}$ . Моделирование проводилось при продолжительности выборки времени  $t = 1$  с.

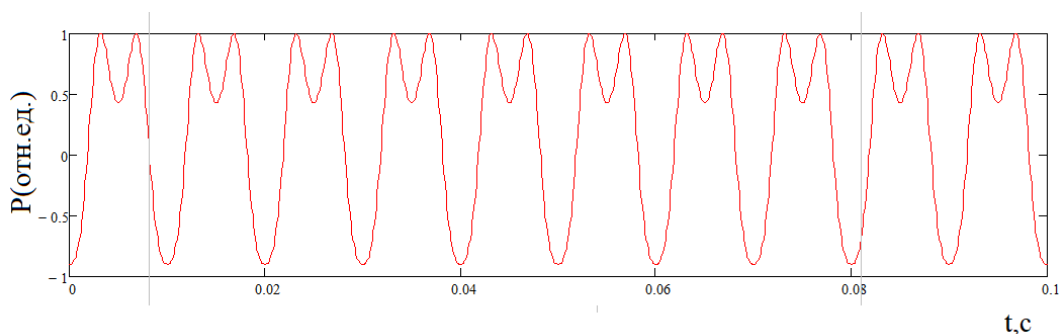


Рисунок 2 - Моделированный сигнал P(t)

В ходе работы было проведено моделирование спектра автодинного сигнала при равномерном движении отражателя.

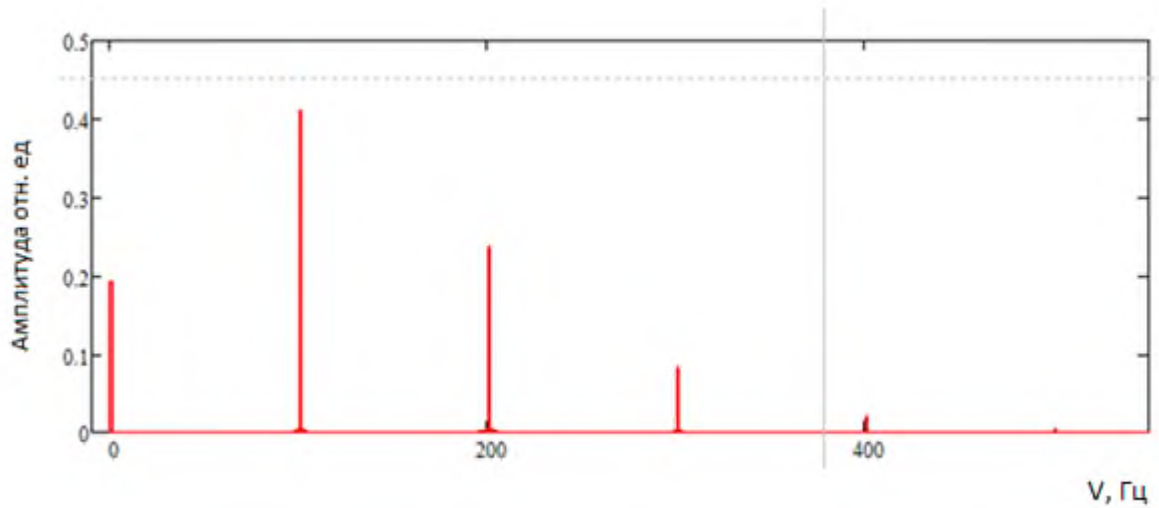


Рисунок 3 - Спектр автодинного сигнала

Дальше создаем сигнал более близкий к реальным измерениям

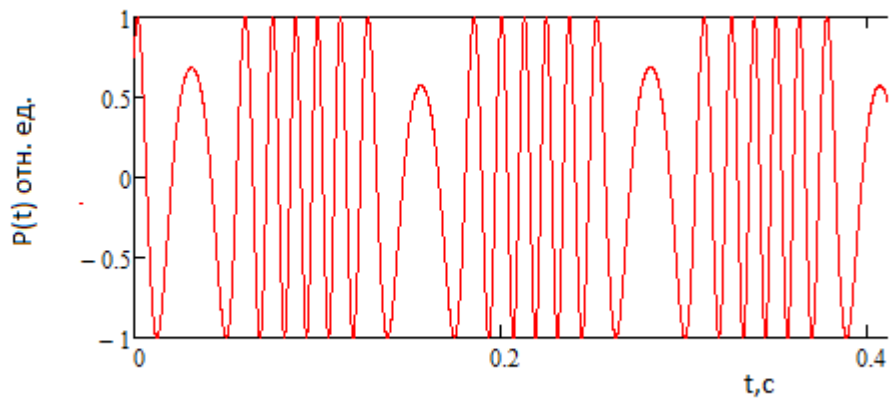


Рисунок 4 - Автодинный сигнал приближенный к реальному

Строим Фурье преобразование от этого сигнала

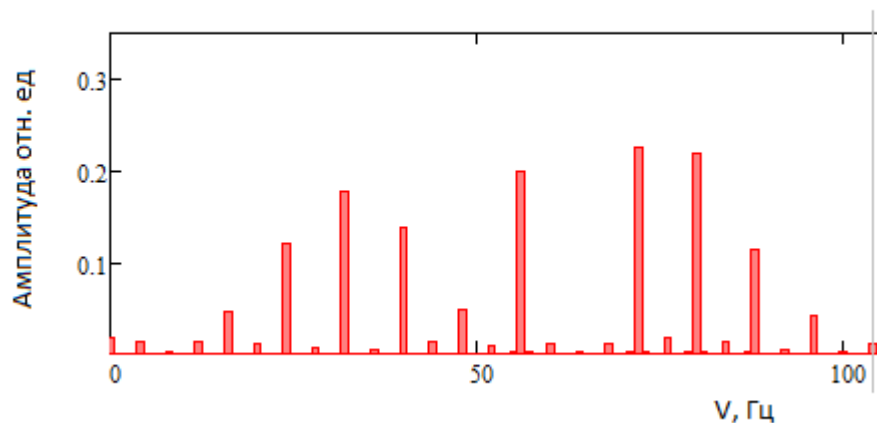


Рисунок 5 - Фурье преобразование автодинного сигнала близкого к реальному

Следующим шагом в работе было разложение в ряд по функциям Бесселя в MathCad, для расчета значения амплитуд движения отражателя (амплитуды вибрации). Чтобы рассчитать амплитуды движения использовал отношение амплитуды чётных (или нечётных) гармоник ближе к концу спектра, которые совпадают с отношением функций Бесселя первого рода порядка  $n$ :

$$p(\sigma) = \frac{C_n}{C_{n+2}} - \frac{J_n(k, \sigma)}{J_n(k + 2, \sigma)}$$

$$p(\sigma) := \frac{L_{72}}{L_{80}} - \frac{J_n(18, \sigma)}{J_n(20, \sigma)}$$

$$x := \text{root}(p(\sigma), \sigma)$$

$$\xi_1 := \frac{x \cdot \lambda}{4 \cdot \pi}$$

$$\xi_1 = 1.131 \times 10^{-6}$$

Полученные результаты компьютерного моделирования показывают возможность применения алгоритма решения для измерения параметров вибраций лазерным автодином при различной степени фокусировки излучения.

*В пятом разделе* описывается экспериментальная установка и экспериментальное исследование равноускоренного движения внешнего отражателя и эксперимент.

*Экспериментальная установка.*

Установка состоит из полупроводникового лазерного автодина, источника питания, генератора сигналов, полосового фильтра, АЦП и ПК.

На пьезокерамику подавалось напряжение, форма которого моделировалась с помощью NIELVIS. Моделирование формы сигнала выполнялось в программе ArbitraryWaveformGenerator.

Основной целью эксперимента было определение параметров вибраций лазерным автодином при различной степени фокусировки излучения.

#### *Результаты исследования*

В практической работе был проведен эксперимент, в котором рассчитывалось измерение автодинного сигнала с разной фокусировкой лазерного луча определения нановибраций подложки.

В результате было сделано 4 измерения автодинного сигнала с разной фокусировкой. Данные полученные в эксперименте были занесены и обработаны в Mathcad.



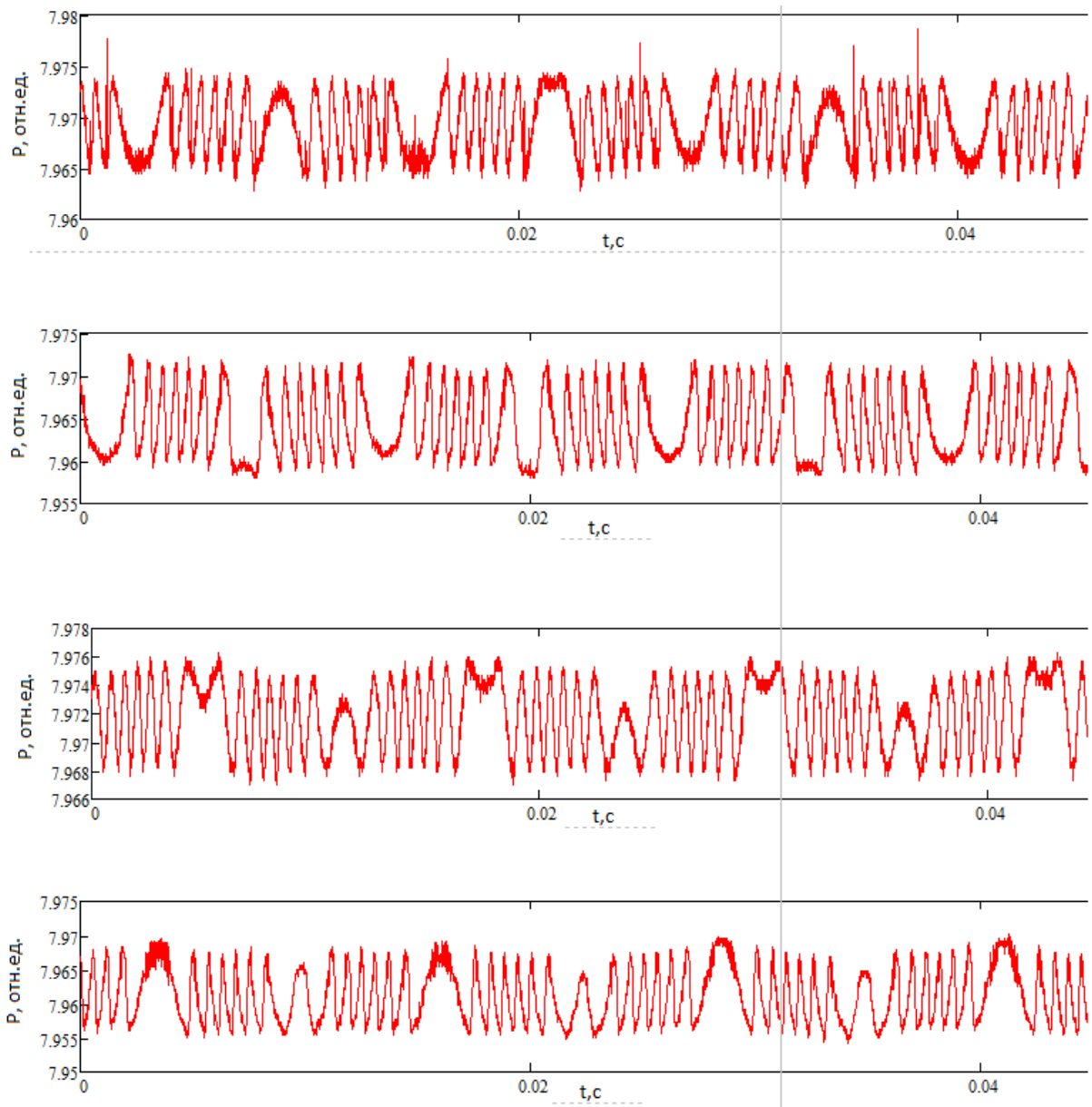


Рисунок 6 – Экспериментально полученные сигналы автодинного лазера

На рисунке 6 показаны сигналы автодинного лазера, где  $P$ –переменная составляющая автодинного сигнала, которая зависит от функции движения

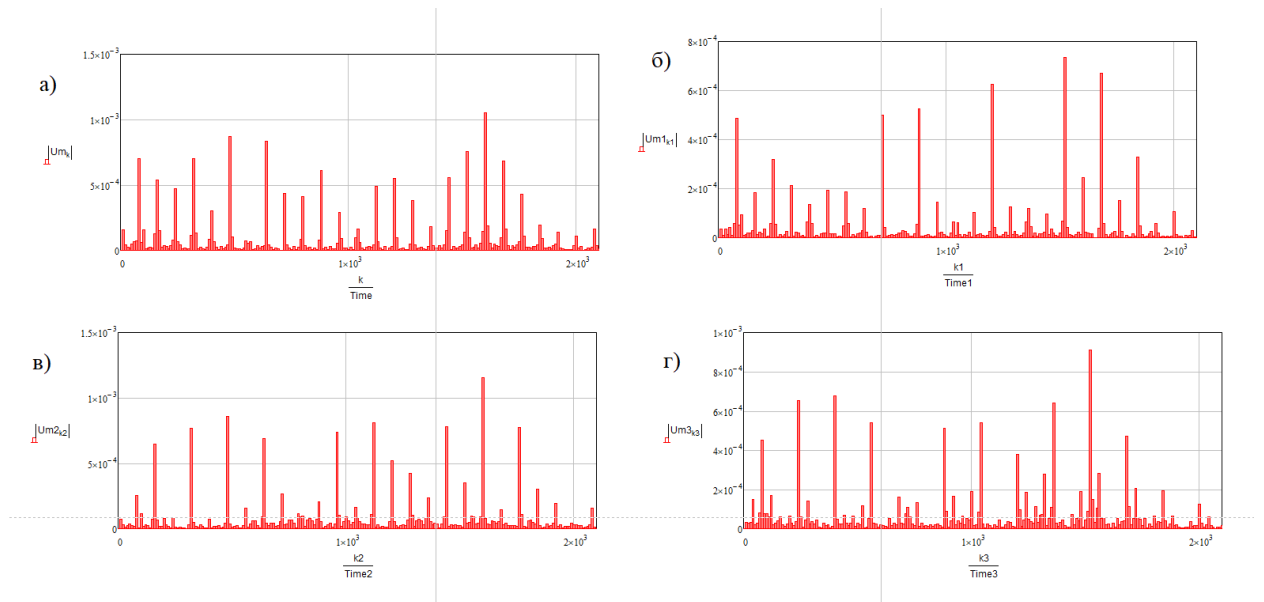


Рисунок 7 – Фурье преобразование данных сигналов

На рисунке 7 показано преобразование Фурье преобразование экспериментальных сигналов.

Затем были проведены расчеты амплитуд вибраций подложки. С помощью математических преобразований (рис. 8) рассчитаем амплитуду вибраций.

$C_{2k} :=  Um_k $	$C_{3k1} :=  Um_{1k1} $	$C_{4k2} :=  Um_{2k2} $	$C_{5k3} :=  Um_{3k3} $
$\sigma := 1$	$\sigma_1 := 1$	$\sigma_2 := 1$	$\sigma_3 := 1$
$p(\sigma) := \frac{C_{21520}}{C_{21680}} - \frac{J_n(19, \sigma)}{J_n(21, \sigma)}$	$p_1(\sigma_1) := \frac{C_{31600}}{C_{31760}} - \frac{J_n(20, \sigma_1)}{J_n(22, \sigma_1)}$	$p_2(\sigma_2) := \frac{C_{41520}}{C_{41680}} - \frac{J_n(19, \sigma_2)}{J_n(21, \sigma_2)}$	$p_3(\sigma_3) := \frac{C_{51600}}{C_{51760}} - \frac{J_n(20, \sigma_3)}{J_n(22, \sigma_3)}$
$x := \text{root}(p(\sigma), \sigma)$	$x_1 := \text{root}(p_1(\sigma), \sigma)$	$x_2 := \text{root}(p_2(\sigma), \sigma)$	$x_3 := \text{root}(p_3(\sigma), \sigma)$
$\xi := \frac{x \cdot \lambda}{4 \cdot \pi}$	$\xi_1 := \frac{x_1 \cdot \lambda}{4 \cdot \pi}$	$\xi_2 := \frac{x_2 \cdot \lambda}{4 \cdot \pi}$	$\xi_3 := \frac{x_3 \cdot \lambda}{4 \cdot \pi}$
$\xi = 1.216 \times 10^{-6}$	$\xi_1 = 1.125 \times 10^{-6}$	$\xi_2 = 9.964 \times 10^{-7}$	$\xi_3 = 1.098 \times 10^{-6}$

Рисунок 8 – результаты измерений амплитуд вибраций

Следующим шагом стало расчёт диаметров лазерного пучка. Для этого использовал программный код и библиотеки на Python.



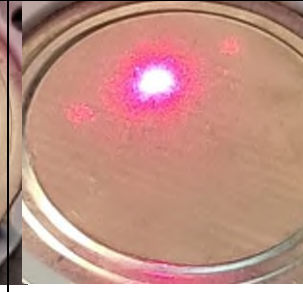
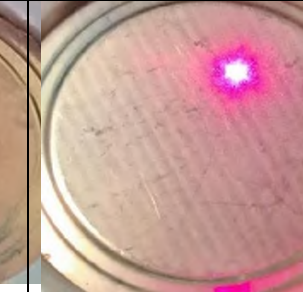
```

1
2 import numpy as np
3 import cv2 as cv
4 fn = "C:\Program Files\JetBrains\lazer1.bmp" # путь к файлу с картинкой
5 img = cv.imread(fn)
6 img = cv.cvtColor(img, cv.COLOR_BGR2GRAY)
7 ret, img = cv.threshold(img, 230, 255, 0)
8 |
9 n_white_pix = np.sum(img == 255)
10 coordinat=np.argwhere(img == 255)
11 dist = ((41 - 31)**2 + (112 - 77)**2)**0.5
12
13 print('белые пиксели', n_white_pix)
14 print('координаты', np.argwhere(img == 255))
15 print(dist)
16 cv.imshow('lazer1', img) # выводим итоговое изображение в окно
17 cv.waitKey()
18 cv.destroyAllWindows()

```

Рисунок 9 – программный код Python для определения диаметра автодиного пучка

Таблица 1 Диаметры лазерного пучка

1,9 мм	4,3 мм	3 мм	1,7 мм
			

Также проводим расчеты средних значений амплитуд вибраций в зависимости от диаметра пучка.

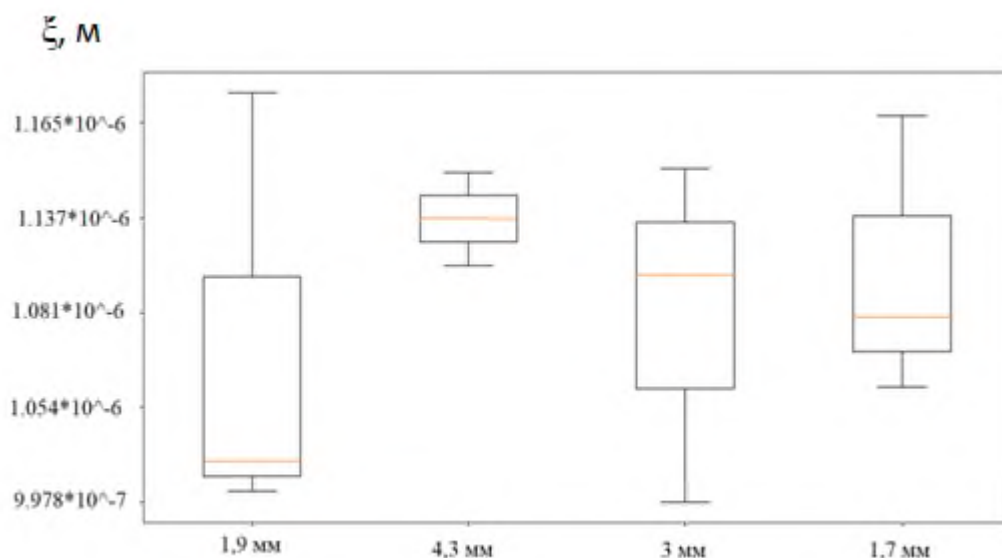


Рисунок 10 – График зависимости амплитуды вибрации от диаметра пучка  
Из графика и расчётов, полученных в ходе всего эксперимента лучшее значение, получилось у лазерного пучка диаметром 4,3 мм.

Таблица 2 результаты измерений

№	Средняя амплитуда вибраций	Диаметр лазерного пучка	Разброс значений по амплитуде вибраций
1	$1,081 \cdot 10^{-6}$	1,9 мм	210нм
2	$1,15 \cdot 10^{-6}$	4,3 мм	24нм
3	$1,098 \cdot 10^{-6}$	3 мм	212нм
4	$1,121 \cdot 10^{-6}$	1,7 мм	143нм

Разброс значений у 4,3 мм самый минимальный из всех четырёх выборок.

### *Заключение*

По итогам измерения параметров вибраций лазерным автодином при различной степени фокусировки излучения, были получены разные значения амплитуд вибраций, при разных диаметрах пучка. Самое лучшее измерение было достигнуто лазерным пучком размером 4,3 мм, с минимальным разбросом

значений.

В квалификационной работе был проведен критический анализ по данной теме. Так же был разработан метод измерения диаметра лазерного излучения. И было проведено экспериментальное исследование по определению амплитуды вибраций внешнего отражателя при разной степени фокусировки.

### **Список используемой литературы**

[1] Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Физика работы полупроводниковых приборов в схемах СВЧ. Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 1999. 376 с.

[2] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С. Изменение спектра сигнала лазерного полупроводникового автодина при фокусировке излучения // Известия высших учебных заведений. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Том 17. № 2.

[3] Сурис Р. А., Тагер А. А. Когерентность и спектральные свойства излучения полупроводникового лазера с внешним отражателем// Квантовая электроника. 1984. Т.11, №4. С. 35–43.

[4] Bosch Th., Servagent N., Donati S. Optical feedback interferometry for sensing application // Opt. Eng. 2001. 40, N 1. P. 20.

[5] Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2003.

[6] 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.

[7] Астахов Е.И., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С.Ю. Автодинная интерферометрия расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера//Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика № 3 / том 15 / 2015 С.12–15.

[8] 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.

[9] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кащавцев Е.О., Калинин М.Ю. Измерение амплитуды нановибраций с помощью полупроводникового лазерного автодина с учетом влияния обратной связи // Письма в ЖТФ. 2012. Том 38, № 12. С. 81-86.

[10] Вагарин В.А., Скрипаль А.В., Усанов Д.А. Об ограничениях в применении спектрального метода определения амплитуды вибраций // Автометрия. 1994. № 1. С.89-90.

[11] Shimizu E. T. Directional discrimination in the self-mixing type laser Doppler velocimeter // Ibid. 1987. Vol. 26. P. 4541–4544. 129 Список литературы

[12] Jentik H. W., de Mul F. F., Suichies H. E., Aarnoudse J. G., Greve J. Small laser Doppler velocimeter based on the self-mixing effect in a diode laser // Appl. Opt. 1988. Vol. 27. P. 379–385.

[13] Mocker H. W., Bjork P. E. High accuracy laser Doppler velocimeter using stable long wavelength semiconductor lasers // Ibid. 1989. Vol. 28. P. 4914–4919.

[14] Маргин А. В. Допплеровский измеритель скорости на основе инжекционного лазера // ЖТФ. 1994. Т. 64, вып. 1. С. 184–189.

[15] Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. Laser diode self-mixing technique for sensing application // J. Opt. A : Pure Appl. Opt. 2002. Vol. 4. S283–S294.

[16] Unlocking dynamical diversity : Optical feedback effects on semiconductor lasers / ed. M. K. Deborah, K. A. Shore. Atrium : J. Wiley & Sons Ltd., 2005. 333 p.

[17] Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов // Квантовая электроника. 2011. Т. 41 (1). С. 86–94.

[18] 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.

[19] Скрипаль А. В., Усанов Д. А., Вагарин В. А., Калинин М. Ю. Автодинное детектирование в полупроводниковом лазере при движении внешнего отражателя // ЖТФ. 1999. Т. 69, вып. 1. С. 72–75.

[20] Усанов Д. А., Скрипаль Ал. В., Скрипаль Ан. В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2003. 312 с.

