

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

Кафедра физики твёрдого тела

**Применение методов компьютерного зрения для повышения точности
измерений параметров движений отражателя с помощью
лазерного автодина**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2252 группы
направления 11.04.04 «Электроника и микроэлектроника»

Института физики

Тарасюка Данилы Александровича

Научные руководители:

доцент, к.ф.-м.н., доцент

должность, ученая степень, ученое звание

Зав. кафедрой физики твердого
тела:

профессор, д.ф.-м.н., профессор

должность, ученая степень, ученое звание



подпись, дата


подпись, дата

С.Ю. Добдин

инициалы, фамилия

А.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1 Анализ методов измерения параметров движения	4
2. Автодинная интерферометрия и формирование сигнала.....	4
3. Экспериментальное исследование.....	5
3.1 Измерения параметров вибраций лазерным автодином с интеграцией измерения площади пучка компьютерным зрением.....	6
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	10

ВВЕДЕНИЕ

Автодинные лазеры позволяют проводить высокоточные бесконтактные измерения микро- и наноперемещений. Точность критически зависит от уровня обратной оптической связи, определяемого площадью пятна лазерного пучка на объекте. Не учёт этого фактора приводит к погрешностям.

Целью данной работы является: разработка метода измерений параметров движений объекта лазерным автодином, основанный на применении компьютерного зрения, позволяющего контролировать уровень обратной оптической связи.

Задачи:

- 1) Провести критический анализ существующих методов измерения.
- 2) Разработать метод измерений на основе автодинного детектирования и компьютерного зрения.
- 3) Экспериментально определить параметры движения объекта при различных уровнях обратной связи.

1 Анализ методов измерения параметров движения

Вывод по разделу: Полупроводниковые лазерные автодины превосходят аналоги по:

- 1) Чувствительности (до 0.1 нм);
- 2) Широкой полосе частот (0.1 Гц – 100 МГц);
- 3) Компактности и энергоэффективности.

Ключевая проблема: Зависимость точности от уровня ООС, регулируемого фокусировкой пучка.

2. Автодинная интерферометрия и формирование сигнала

Принцип работы:

Отражённый от объекта луч возвращается в резонатор лазера, вызывая модуляцию выходной мощности:

Переменная составляющая автодинного сигнала в используемой модели записывается в виде(1):

$$P(t) = \cos \left[\theta + \frac{4}{\lambda_0} (f(t)) \right] \quad (1)$$

где:

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

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

ν – частота гармонической функции,

θ – набег фазы автодинного сигнала,

λ_0 – длина волны лазерного излучения,

V – скорость внешнего отражателя,

t – интервал времени, наблюдаемого автодинного сигнала,

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

Влияние обратной связи:

Уровень обратной связи $СС$ критичен для формы сигнала:

$С < 0.1$: сигнал близок к интерференционному.

$С > 1$: хаотическая генерация.

Следующим шагом в работе было разложение в ряд по функциям Бесселя в MathCad, для расчета значения амплитуд движения отражателя (амплитуды вибрации).

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

3. Экспериментальное исследование

После того как мы проверили возможность реализации предлагаемого нами подхода необходимо было экспериментально подтвердить наши теоретические предпосылки. Для этого мы реализовали ряд экспериментальных работ. Для выполнения эксперимента была создана установка, приведена ее блок-схема.

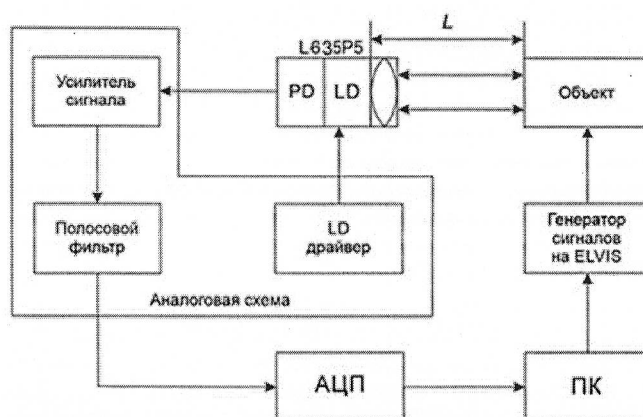


Рисунок 1 - Блок-схема экспериментальной установки

Основным измерительным устройством у меня является полупроводниковый автодин. Измерения происходили следующим образом: из генератора сигналов на объект подавалось напряжение, переменное, керамика совершала периодические колебания. Далее излучения от лазерного диода падало на поверхность объекта, отраженное излучение отражалось обратно в лазер, где усиливалось и подвергалось фильтрации. После предварительной обработки, которое происходило в блоке аналоговая схема, сигнал у нас поступал на АЦП для оцифровки и последующего сохранения в

памяти компьютера. Для снимков площади автодинного лазерного пучка использовался фотоаппарат Canon.

Были проведены экспериментальные исследования по регистрации автодинного сигнала для измерения параметров вибраций лазерным автодином при различной степени фокусировки излучения.

3.1 Измерения параметров вибраций лазерным автодином с интеграцией измерения площади пучка компьютерным зрением

В работе был проведен эксперимент, в котором рассчитывалась амплитуда вибраций отражателя автодинного сигнала с разной фокусировкой лазерного луча для определения нановибраций подложки.

В результате было сделано 3 измерения автодинного сигнала с разной фокусировкой и частотой сигнала. Данные полученные в эксперименте были занесены и обработаны в Mathcad.

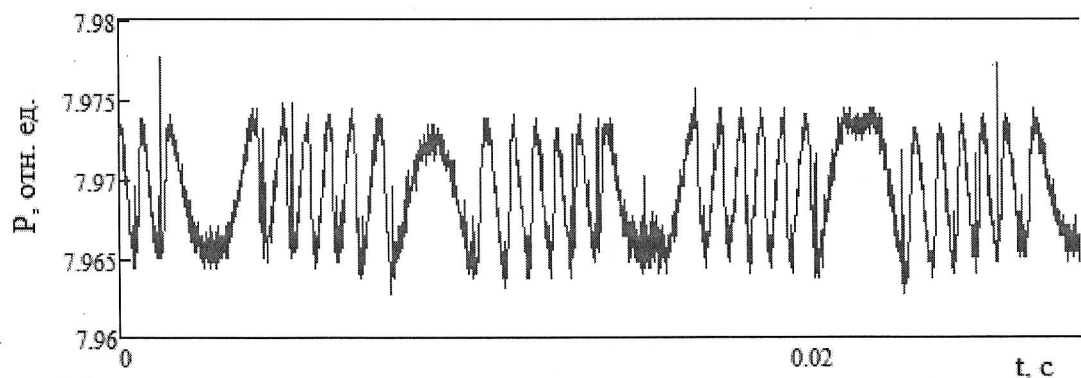


Рисунок 2 – Пример экспериментально полученного сигнала автодинного лазера

На рисунке 3 показаны сигналы автодинного лазера, где P –переменная составляющая автодинного сигнала, которая зависит от функции движения.

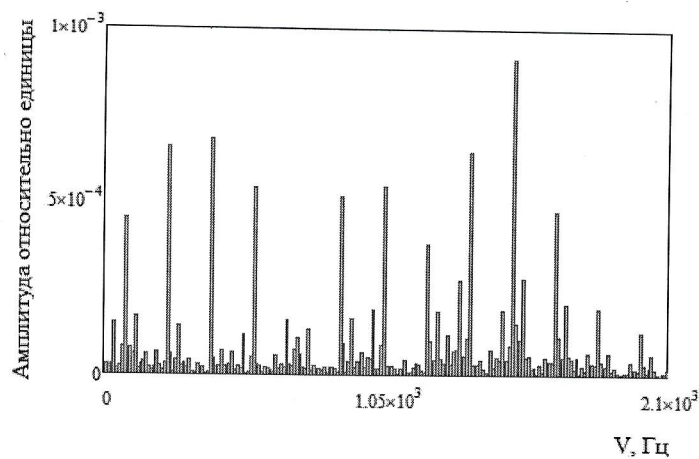


Рисунок 3 – Пример Фурье преобразования данных сигнала

На Рисунке 3 показано преобразование Фурье преобразование экспериментальных сигналов.

Затем были проведены расчеты амплитуд вибраций подложки. С помощью математических преобразований рассчитали амплитуду вибраций.

Результаты измерений амплитуд вибраций:

$\xi=1.299 \cdot 10^{-6}$, $\xi_1=1.185 \cdot 10^{-6}$, $\xi_2=1.214 \cdot 10^{-6}$, $\xi_3=1.17 \cdot 10^{-6}$, $\xi_4=1.243 \cdot 10^{-6}$, $\xi_5=1.208 \cdot 10^{-6}$, $\xi_6=1.289 \cdot 10^{-6}$, $\xi_7=1.216 \cdot 10^{-6}$, $\xi_8=1.276 \cdot 10^{-6}$.

Следующим шагом стали калибровка и расчёт диаметров лазерного пучка. Для этого использовал программные коды и библиотеки на Python.

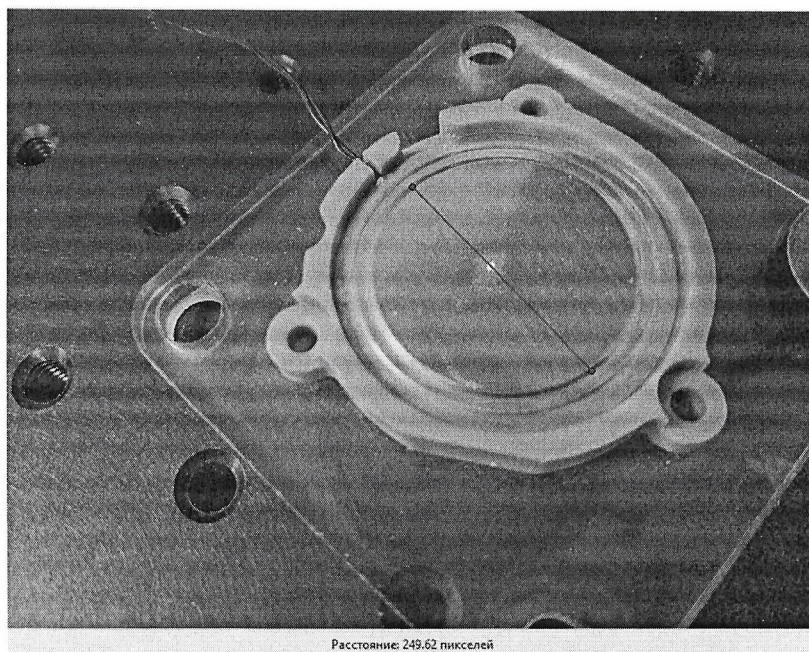


Рисунок 4 – Калибровка диаметра подложки в пикселях

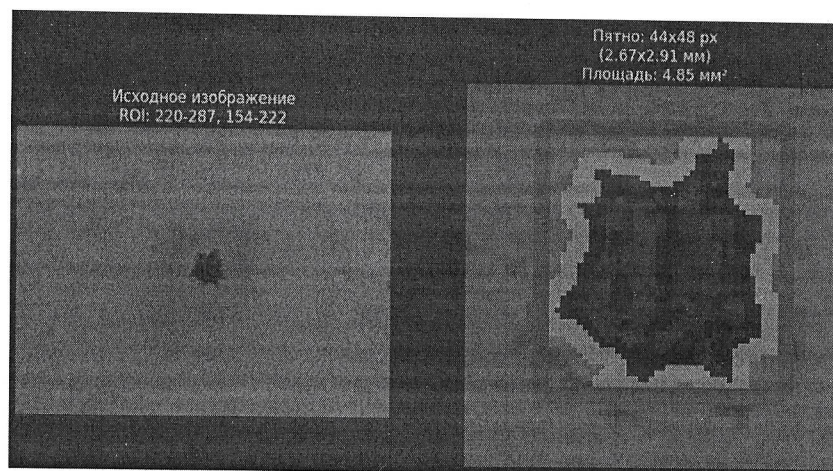


Рисунок 5 – Пятно автодинного луча 4,85 мм²

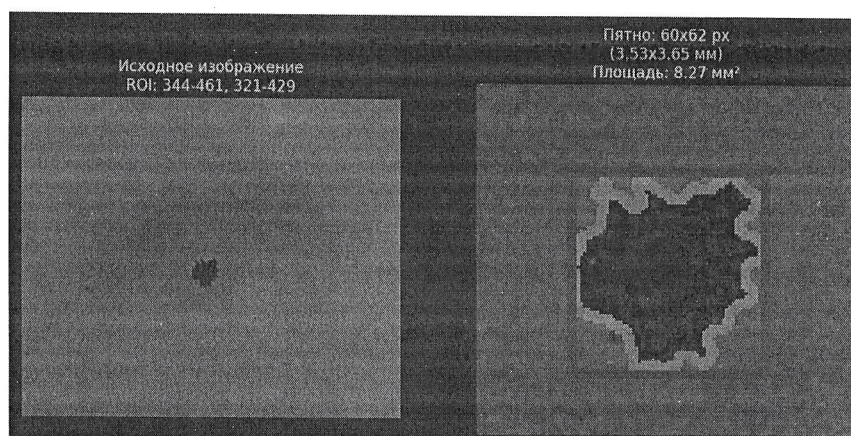


Рисунок 6 – Пятно автодинного луча 8,27 мм²

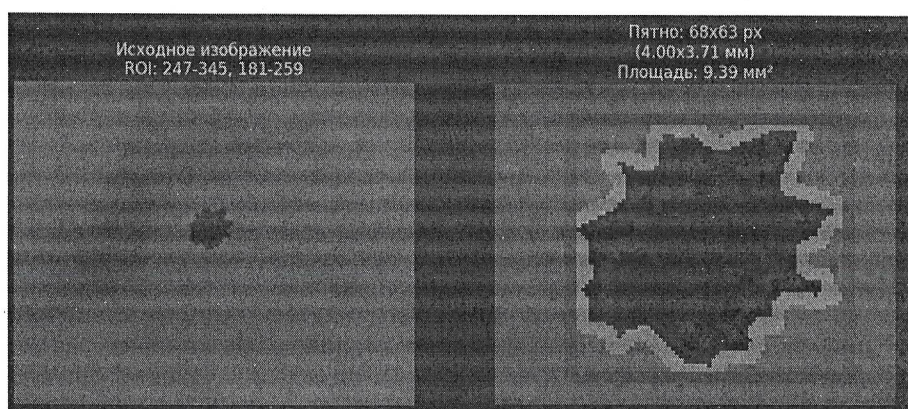


Рисунок 9 – Пятно автодинного луча 9,39 мм²

Таблица 1 – Диаметры лазерного пучка

4,85 мм ²	8,27 мм ²	9,39 мм ²

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

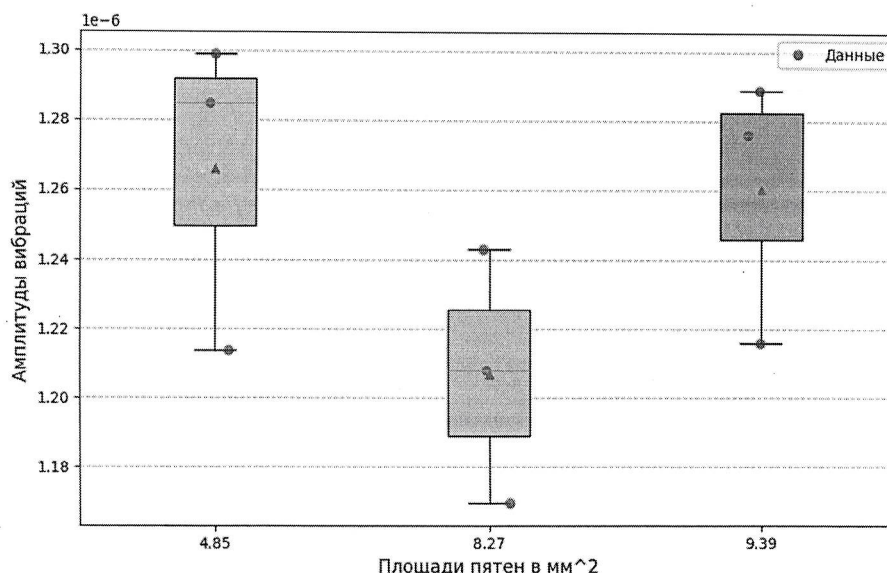


Рисунок 7 – График зависимости амплитуды вибрации от диаметра пучка

Из графика и расчётов, полученных в ходе всего эксперимента лучшее значение, получилось у лазерного пучка диаметром 8.27 мм².

Таблица 2 – Результаты измерений

$S_{\text{пл}} = 4.85 \text{ мм}^2$	$S_{\text{пл}} = 8.27 \text{ мм}^2$	$S_{\text{пл}} = 9.39 \text{ мм}^2$
Медиана: 1.285e-06	Медиана: 1.208e-06	Медиана: 1.276e-06
Среднее: 1.266e-06	Среднее: 1.207e-06	Среднее: 1.260e-06
Размах: 8.500e-08	Размах: 7.300e-08	Размах: 7.300e-08
Дисперсия: 2.077e-15	Дисперсия: 1.333e-15	Дисперсия: 1.516e-15
Стандартное отклонение: 4.557e-08	Стандартное отклонение: 3.651e-08	Стандартное отклонение: 3.894e-08
IQR (межквартильный размах): 4.250e-08	IQR (межквартильный размах): 3.650e-08	IQR (межквартильный размах): 3.650e-08

Оптимальная точность измерений достигнута при фокусировке пучка 8.27 мм². Наименьшее стандартное отклонение (3.651e-08 м), что на 19.8% ниже, чем для 4.85 мм², и на 6.2% ниже, чем для 9.39 мм². Минимальная дисперсия (1.333e-15) и узкий межквартильный размах (IQR = 3.650e-08 м) подтверждают высокую воспроизводимость результатов. Медиана и среднее значение практически совпадают (разница 0.08%), что свидетельствует о симметричности распределения данных

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод измерений параметров вибраций с использованием лазерного автодина и компьютерного зрения, контролирующего уровень обратной связи через площадь пятна.

Экспериментально доказано:

Оптимальная фокусировка ($S_{\text{лп}}=8.27\text{мм}^2$) снижает погрешность на 19.8% по сравнению с $S_{\text{лп}}=4.85\text{мм}^2$.

Стандартное отклонение $\sigma_{\xi}=3.651\cdot 10^{-8}\text{м}$.

Практическая значимость: Метод применим для контроля вибраций в микроэлектронике и биомедицинской диагностике.

