# МИНОБРНАУКИ РОССИИ ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. **ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики твердого тела наименование кафедры

#### Методы измерения микро- и наносмещений с помощью

полупроводникового лазерного автодина

# АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

4051 группы 4 курса

Направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника» код и наименование направления

институт физики

наименование факультета, института, колледжа

Матросова Павла Павловича

фамилия, имя, отчество (именительный падеж)

Научные руководители: д.ф.-м.н., профессор

студента

должность, уч. степень, уч. звание

1. W 15.06.22 подпись, дата

Ан.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой: д.ф.-м.н., профессор должность, уч. степень, уч. звание

Ал.В. Скрипаль инициалы, фамилия

Саратов, 2022

Оптические интерференционные измерения, имея давнюю и плодотворную историю, внесли значительный вклад в развитие физической и инструментальной оптики, а также в совершенствование измерительной техники и метрологии.

Лазерная интерферометрия – это хорошо зарекомендовавший себя метод, который широко используется в промышленных и лабораторных условиях для измерения смещений, скорости, вибраций и других параметров движения (как твёрдых объектов, так и жидкостей). Обычные методы основаны на внешнем интерферометре, то есть оптическом преобразователе, состоящем из линзы, призм и зеркал, который считывается с помощью лазерного излучения или белого света. Это относится к хорошо известным интерферометрам Майкельсона и Маха-Цендера

Использование полупроводниковых лазеров в качестве перестраиваемых источников когерентного излучения дает 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.

Значительный интерес к эффекту автодинного детектирования широко изучался в течении последних двух десятилетий и оказался очень хорошим решением для измерения перемещений, вибраций, расстояний, ускорения и скорости. Многие исследования показали, что эти методы способны обеспечить высокую чувствительность при чрезвычайно простой и недорогой экспериментальной установке и, таким образом, могут быть непосредственно предложены для промышленного применения.

В настоящее время достигнутые успехи спектрального анализа формы автодинного сигнала позволяют определять, амплитуду наносмещений при модуляции тока питания лазерного диода. На современном этапе развития науки и техники актуальность данного метода набирает всё больше оборотов с каждым годом. В частности, удается определить параметры вибраций биологических объектов, непосредственное измерение параметров движений которых достаточно сложно вследствие их труднодоступности. Примером биообъектов, для которых удалось реализовать указанные методики, являются движение сердца пресноводного рачка дафнии, тремор глазного яблока, колебания барабанной перепонки. В некоторых случаях, полупроводниковый лазерный автодин применялся для диагностики патологических состояний барабанной перепонки

Целью данной дипломной работы является: рассмотрение математических методов анализа автодинного сигнала полупроводникового лазера, экспериментальное определение микро- и наносмещений методом автодинной интерферометрии и определение погрешности измерения амплитуд вибраций в зависимости от амплитуды колебаний пьезокерамики.

Задачами дипломной работы в связи с указанной целью являются:

- 1. Исследовать методы определения микро- и наносмещений
- 2. Исследовать экспериментальные данные
- 3. Определить погрешность измерений

Выпускная квалификационная работа содержит 4 главы:

- 1. Методы интерферометрии.
- 2. Методы измерения микро- и наносмещений.
- 3. Неопределённость функций Бесселя.
- 4. Экспериментальная часть.

Измерения для экспериментальной части были проведены на установке, изображение которой изображено на рисунке 4.1.



Рисунок 4.1. Изображение экспериментальной установки

Схема установки для проведения измерений микро- и наносмещений приведена на рисунке 4.2 ниже.



Рисунок 4.2. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – лазерной автодин, 2 – источник питания, 3 – фотодетектор, 4 – усилитель сигнала, 5 – полосовой фильтр, 6 – АЦП, 7 – ПК, 8 – генератор сигналов, 9 – пьезокерамика.

В состав данной установки для измерения микро- и наносмещений входили: полупроводниковый лазерный автодин на диоде RLD-650 на квантово размерных структурах с длиной волны 654 нм – 1. Микро- и наносмещения отражателя были осуществлены с помощью генератора сигналов – 8. Излучение лазерного автодина было сфокусировано на поверхность пьезокерамики – 9, при этом диаметр пятна лазерного излучения на поверхности объекта составлял 1 миллиметр. Рабочий режим тока питания лазерного диода задавался с помощью блока управления током питания – 2. Отраженное от внешнего отражателя излучение было направлено в резонатор лазера, измерение мощности которого фиксировалось фотодетектером – 3. Продетектированный сигнал с фотоприемника проходил через усилитель сигнала – 4, а так же фильтр перемеренного сигнала – 5 и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя – 6, соединенного с компьютером – 7.

Данные измерения проводились без токовой модуляции, так как колебания совершала пьезокерамическая подложка. Так же, с помощью фокусировки пятна лазерного излучения, сигнал был подобран таким образом, что удалось добиться очень маленького уровня обратной связи. На

5

пьезокерамическую подложку поддавалось переменное напряжение с генератора сигналов с частотой 100 Гц. Измерения автодинного сигнала проводились при разных значениях напряжений 15В, 7.5В и 3В за время равное 0.1сек. Для увеличения точности измерений, детектирование проводилось по пять раз для каждого значения напряжений.

Используя стандартное разложение в ряд по функциям Бесселя в MathCad 14, были рассчитаны значения амплитуд движения отражателя (амплитуды микро- и наносмещений). Для расчёта было использовано отношение амплитуд чётных (или нечётных) гармоник ближе к концу спектра, из-за неопределённости, которые совпадают с отношением функций Бесселя первого рода порядка п:

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

Расчёт значения амплитуда в данном случае сводится к решению уравнения  $x = root(p(\sigma), \sigma)$ , относительно неизвестного параметра  $\sigma$ . Неизвестное значение амплитуды рассчитывается как  $\xi = c\sigma/\Delta\omega$ .

Измерение номер 1

В данном измерении на пьезокерамическую подложку подавалось напряжении 15В. Для данного напряжения был зарегистрирован автодинный сигнал, длительностью 0.1 секунды, который представлен на рисунке 4.3. На рисунке 4.4 представлен спектр этого автодинного сигнала. На рисунках представлены наиболее лучшие результаты измерений из всех пяти штук.



Рисунок 4.3. Автодинный сигнала длительностью 0.1 секунды при напряжении 15В подаваемом на пьезокерамику.



Рисунок 4.4. Спектр автодинного сигнала, представленного на рисунке 4.3.

Номер измерения	Значение напряжения,	Амплитуда, м
	В	
1	15B	$\xi_1 = 9,72967 * 10^{-7}$ M
2	15B	$\xi_2 = 9,80405 * 10^{-7}$ м
3	15B	$\xi_3 = 9,43404 * 10^{-7}$ M
4	15B	$\xi_4 = 9,93195 * 10^{-7}$ m
5	15B	$\xi_5 = 9,71292 * 10^{-7}$ M

Таблица 4.1. Значения амплитуд при напряжении 15В

Используя полученные данные, была рассчитана средняя величина амплитуды, которая составила  $\Delta \xi_1 = 9,72253 * 10^{-7}$ м

На рисунке 4.5 представлена компьютерная модель автодинного сигнала, построенного в программе MathCad 14, а на рисунке 4.6 представлен спектр модели автодинного сигнала, представленного на рисунке 4.5.



Рисунок 4.5. Модель автодинного сигнала при напряжении 15В подаваемого на пьезокерамику.



Рисунок 4.6 Модель спектра автодинного сигнала, представленного на рисунке 4.5

Используя тот же метод расчёта, были получены данные амплитуды колебаний, которая составила  $\xi'_1 = 9 * 10^{-7}$ м. Как видно из полученных данных, компьютерная модель совпадает с экспериментальной, а погрешность измерения составляет 8%.

Измерение номер 2

В данном измерении на пьезокерамическую подложку подавалось напряжении 7.5В. Для данного напряжения был зарегистрирован автодинный сигнал, длительностью 0.1 секунды, который представлен на рисунке 5.7. На рисунке 5.8 представлен спектр этого автодинного сигнала. На рисунках представлены наиболее лучшие результаты измерений из всех пяти штук.



Рисунок 4.7. Автодинный сигнала длительностью 0.1 секунды при напряжении 7.5В подаваемом на пьезокерамику.



Рисунок 4.8. Спектр автодинного сигнала, представленного на рисунке 4.7.

Номер измерения	Значение напряжения,	Амплитуда, м
	В	
1	7,5B	$\xi_1 = 4,60981 * 10^{-7}$ M
2	7,5B	$\xi_2 = 4,25064 * 10^{-7}$ M
3	7,5B	$\xi_3 = 4,33358 * 10^{-7}$ M
4	7,5B	$\xi_4 = 4,13716 * 10^{-7}$ M
5	7,5B	$\xi_5 = 3,58443 * 10^{-7}$ M

Таблица 4.2. Значения амплитуд при напряжении 7.5В

Используя полученные данные, была рассчитана средняя величина амплитуды, которая составила  $\Delta \xi_2 = 4,18312 * 10^{-7}$ м

На рисунке 4.9 представлена компьютерная модель автодинного сигнала, построенного в программе MathCad 14, а на рисунке 4.10 представлен спектр модели автодинного сигнала, представленного на рисунке 4.9.



Рисунок 4.10 Модель спектра автодинного сигнала, представленного на рисунке 4.9.

Используя тот же метод расчёта, были получены данные амплитуды колебаний, которая составила  $\xi'_2 = 5 * 10^{-7}$ м. Как видно из полученных данных, компьютерная модель совпадает с экспериментальной, а погрешность измерения составляет 16%.

Измерение номер 3

В данном измерении на пьезокерамическую подложку подавалось напряжении 3В. Для данного напряжения был зарегистрирован автодинный сигнал, длительностью 0.1 секунды, который представлен на рисунке 4.11. На рисунке 4.12 представлен спектр этого автодинного сигнала. На рисунках представлены наиболее лучшие результаты измерений из всех пяти штук.



Рисунок 4.11. Автодинный сигнала длительностью 0.1 секунды при напряжении 3В подаваемом на пьезокерамику.



Рисунок 4.12. Спектр автодинного сигнала, представленного на рисунке 4.11.

Номер измерения	Значение напряжения,	Амплитуда, м
	В	
1	3B	$\xi_1 = 2,00181 * 10^{-7}$ M
2	3B	$\xi_2 = 2,38268 * 10^{-7}$ M
3	3B	$\xi_3 = 2,41987 * 10^{-7}$ м
4	3B	$\xi_4 = 2,75105 * 10^{-7}$ M
5	3B	$\xi_5 = 2,98165 * 10^{-7}$ м

Таблица 4.3. Значения амплитуд при напряжении ЗВ

Используя полученные данные, была рассчитана средняя величина амплитуды, которая составила  $\Delta \xi_3 = 2,50621 * 10^{-7}$ м

На рисунке 4.13 представлена компьютерная модель автодинного сигнала, построенного в программе MathCad 14, а на рисунке 4.14 представлен спектр модели автодинного сигнала, представленного на рисунке 4.13.



Рисунок 4.13. Модель автодинного сигнала при напряжении 3В подаваемого на пьезокерамику.



Рисунок 4.14 Модель спектра автодинного сигнала, представленного на рисунке 4.9.

Используя тот же метод расчёта, были получены данные амплитуды колебаний, которая составила  $\xi'_3 = 2.5 * 10^{-7}$ м. Как видно из полученных данных, компьютерная модель совпадает с экспериментальной, а погрешность измерения составляет 0.2%.

Используя полученные данные, рассчитав средние значения амплитуд и вычислив среднее квадратичное для каждого из значения напряжений, было рассчитано среднеквадратичное отклонение для определения точности.

Номер измерения	Значение напряжения,	Погрешность
	В	амплитуды, нм
1	15B	$\xi_1 = 970 \pm 16$ нм
2	7,5B	$\xi_2 = 418 \pm 33$ нм
3	3B	$\xi_3 = 250 \pm 33$ нм

Таблица 4.4. Погрешность измерений

Используя средние значения амплитуд вибраций, полученных при экспериментальных измерениях, был построен график зависимости амплитуды вибраций и напряжения, подаваемого на пьезокерамику.

Номер измерения	Значение напряжения,	Среднее значение
	В	амплитуды, м
1	15B	$\Delta \xi_1 = 9,72253 * 10^{-7} \mathrm{m}$
2	7,5B	$\Delta \xi_2 = 4,18312 * 10^{-7} \mathrm{m}$
3	3B	$\Delta \xi_3 = 2,56021 * 10^{-7} \mathrm{m}$

Таблица 4.5. Средние значения измерений



Рисунок 4.15. Экспериментально полученная зависимость амплитуды вибраций и напряжения подаваемого на пьезокерамику.

Так же используя средние значения амплитуд вибраций, полученных при компьютерном моделировании, был построен график зависимости амплитуды вибраций и напряжения, подаваемого на пьезокерамическую подложку.

Номер измерения	Значение напряжения,	Амплитуда, м
	В	
1	15B	$\xi_1' = 9 * 10^{-7}$ м
2	7,5B	$\xi_2' = 5 * 10^{-7}$ м
3	3B	$\xi_3' = 2.5 * 10^{-7}$ M

Таблица 4.6. Смоделированные значения измерений



Рисунок 4.16. Теоретическая зависимость амплитуды вибраций и напряжения подаваемого на пьезокерамику.

Как видно из графика, амплитуда меняется нелинейно, что не состыковывается с теоретической моделью, это объясняется тем, что в расчетах не учитывается такой эффект как резонанс. Он появляется в этой системе из-за того, что пьезокерамический отражатель не закреплен жёстко, а находиться на тонкой подложке, за счет которой в системе возникает резонанс.

### Заключение

В ходе выполнения квалификационной работы проведен анализ современного состояния исследований в применения лазеров для измерения микро- и наносмещений. Были получены навыки работы на установке для измерения автодинной интерферометрии

Проведено измерение микро- и наносмещений при различном напряжении 15В, 7,5В, 3В, подаваемом на пьезокерамику. Используя разложение в ряд по функциям Бесселя, была рассчитана амплитуда сигнала, а также его погрешность при пяти измерениях для каждого значения напряжений. Показано, что относительная погрешность определения амплитуд вибраций лежит в диапазоне 16-33 нм в зависимости от напряжения подаваемого на пьезокерамику и амплитуды колебаний пьезокерамики.

В результате анализа данных, была установлена зависимость амплитуды вибраций и напряжения подаваемого на пьезокерамику, было выявлено, что зависимость меняется нелинейно, что связано с эффектом резонанса.

#### Список использованной литературы

[1] Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов — Саратов: Изд-во Сарат. ун-та, 2003. 312 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. С. 54–65.

[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 applica-tion // Opt. Eng. 2001. 40, N 1. P. 20.

[5] Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch Th. Laser diode self-mixing technique for sensing applications // Journ. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2002. 4. P. 283.

[6] Plantier G., Servagent N., Sourice A., Bosch Th. Real-time parametric estimation of velo¬city using optical feedback interferometry // IEEE Trans. Instrum. and Meas. 2001. 50, N 4. P. 915.

[7] Соболев В. С., Уткин Е. Н., Щербаченко А. М. и др. Активная лазерная интерферометрия: состояние и перспективы // Автометрия. 2004. 40, № 6. С. 4.

[8] Osterwalder J. M., Rickett B. J. Frequency modulation in GaAlAs injection lasers at micro-wave frequency rates // IEEE Journ. Quant. Electron.1980. QE-16, N 3. P. 250.

[9] Chebbour A., Gorecki C., Tribillon G. Range finding and velocimetry with directional discrimination using a modulated laser diode Michelson interferometer // Opt. Commun. 1994. 111, Is. 1-2. P 1.

16