

Министерство образования и науки Российской Федерации

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

Кафедра физики твердого тела

**ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДОВ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ
МИКРОСКОПИИ ДЛЯ НАНОИЗМЕРЕНИЙ ПРОФИЛЯ
ПОВЕРХНОСТИ**

**АВТОРЕФЕРАТ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ
БАКАЛАВРА**

студента 4 курса

факультета нано- и биомедицинских технологий

Клобучара Дмитрия Сергеевича

прошедшего обучение по направлению 11.03.04 «Электроника и
наноэлектроника», профиль подготовки «Микро- и наноэлектроника,
диагностика нано- и биомедицинских систем»

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

В настоящее время есть несколько разновидностей определения расстояния до объекта с помощью оптического зондирования, такие, как ближнеполевая микроскопия, растровая электронная микроскопия, атомно-силовая микроскопия и наиболее перспективные методы оптической интерферометрии с изменением длины волны, основанные на регистрации фазы отраженного лазерного излучения, что представляет наибольший интерес в данной работе[1]. Применение полупроводниковых лазеров в качестве перестраиваемых источников когерентного излучения открывает 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].

В работах [4-6] продемонстрирована возможность успешного применения полупроводникового лазера с токовой модуляцией для измерения расстояний, параметров движения, вибраций объектов. В этих работах используется эффект изменения длины волны излучения лазерного диода при изменении инжекционного тока лазера по линейному закону. Излучение полупроводникового лазера фокусируется на исследуемый объект, а отраженное им излучение поступает на лазерный диод, где оно за счет высокого коэффициента усиления активной среды диода существенно увеличивает свою мощность и интерферирует с исходным излучением, направленным на катод встроенного в лазер контрольного фотодиода. При работе такого интерферометра отраженный объектом свет приходит в лазер с некоторой задержкой по времени, обусловленной конечным значением скорости света. В результате даже при неподвижном объекте интерференция исходного и отраженного излучений приводит к тому, что выходной ток фотодиода периодически изменяется с частотой, определяемой модуляционной характеристикой лазерного диода и расстоянием до объекта[7]. Однако точность измерения расстояния в таких методах не превышает 100 мкм.

Цель выпускной квалификационной работы - показать возможность измерений наносмещений с помощью полупроводникового лазерного автодина с гармонической модуляцией длины волны лазерного излучения.

В процессе работы для достижения цели будут решены следующие задачи:

1. Провести анализ принципа работы лазерного автодина.
2. Теоретически обосновать метод измерений наносмещений.
3. Провести модулирование автодинного сигнала.
4. Провести измерения наносмещений на лазерном автодине.

Выпускная квалификационная работа бакалавра состоит из введения, 4 глав, заключения и списка используемой литературы (21 наименование). Объем выпускной квалификационной работы изложен на 37 страницах, содержит 1 таблицу и 30 рисунков.

В первой главе рассматривается краткое описание и принцип работы интерферометра Майкельсона, на основе которого построен автодинный интерферометр. Пример подобного интерферометра уже действующего в производстве: лазерные модуляционные интерференционные микроскопы семейства МИМ-300 предназначенные для измерений геометрических параметров трехмерного микрорельефа поверхности объектов. Данным оборудованием было достигнуто разрешение по поверхности до 15 нм, а по вертикали - 0,1 нм. Данный микроскоп сравнивался с растровой электронной микроскопией и атомно-силовой микроскопией, в чем он оказался преимущественнее, так же с ближнеполевой микроскопией, но наиболее перспективной оказалась автодинная лазерная интерферометрия. Ее преимущества в точности измерения и расстоянии которое может замерять лазерный автодин (в разы больше чем у предыдущих видов микроскопии).

Во второй главе рассматривалась теория метода измерения наносмещений при токовой модуляции. Описываемая излучаемая лазером мощность может быть определена в результате использования малосигнального анализа дифференциальных уравнений для комплексного электрического поля с запаздывающим аргументом и концентрации носителей заряд. Для описания низкочастотного спектра автодинного сигнала при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода мощность автодинного сигнала может быть представлена в виде разложения в ряд по функциям Бесселя первого рода J_n . Проведя расчеты указанные в работе, мы определяем расстояние до объекта.

В третьей главе для проверки предположения о возможности измерения расстояния до объекта, с изменением его в пределах длины волны, с помощью лазерной автодинной интерферометрии, описано проведенное математическое моделирование в программном пакете Mathcad 15.

Моделирование автодинного сигнала проводилось при следующих параметрах: длина волны излучения лазерного диода $\lambda=650\text{нм}$, значение девиации длины волны излучения лазерного диода 0.002нм , при заданных моделью расстояниях $L_0=0.1+x\cdot 10^{-10}\text{м}$, где $x=25,50,75..600\text{нм}$.

Для описания низкочастотного спектра автодинного сигнала при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода мощность автодинного сигнала была представлена в виде разложения в ряд по функциям Бесселя первого рода J_n и в ряд Фурье. Изменения спектров полученных автодинных сигналов со смещением 25 нм представлены на рисунках 1-5. Величина смещения лазера была взята выше пороговой для наглядности изменения спектра.

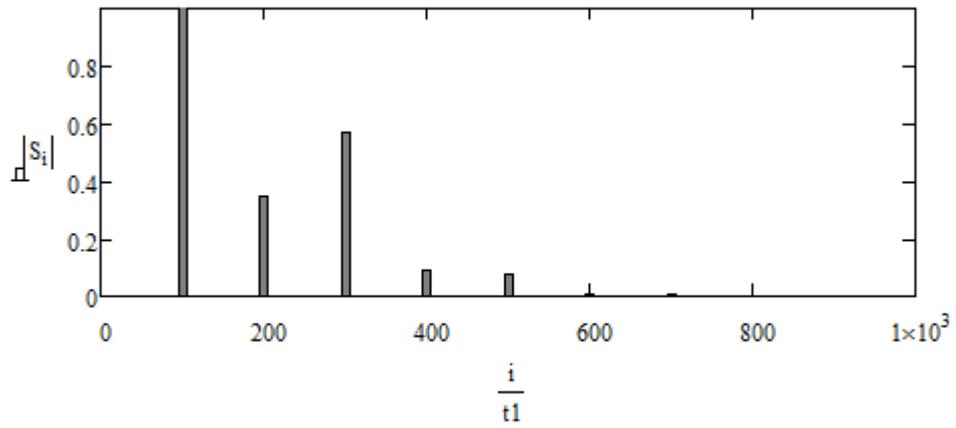


Рисунок 1 - Спектр смоделированного частотномодулированного автодинного сигнала, при расстоянии $L_0=0,1+100 \cdot 10^{-9}$ м

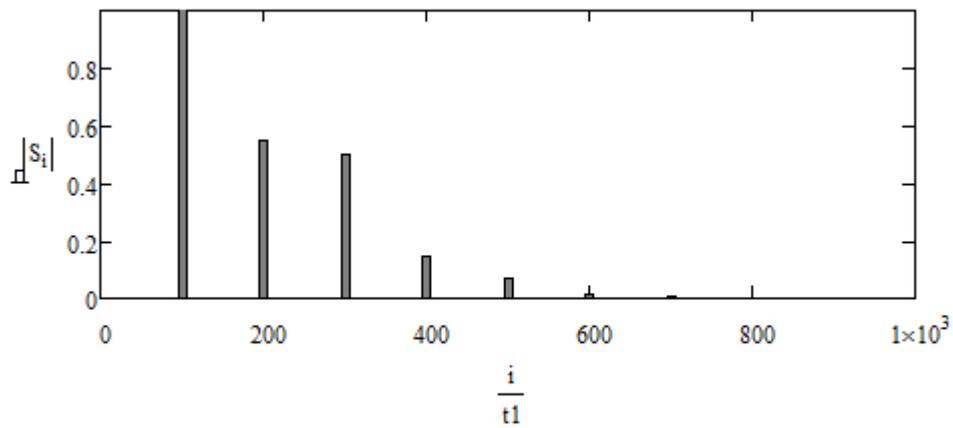


Рисунок 2 - Спектр смоделированного частотномодулированного автодинного сигнала, при расстоянии $L_0=0,1+125 \cdot 10^{-9}$ м

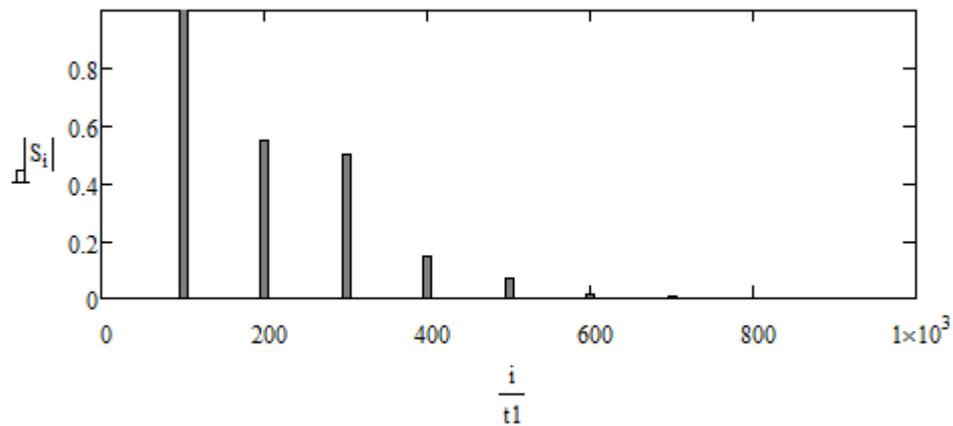


Рисунок 3 - Спектр смоделированного частотномодулированного автодинного сигнала, при расстоянии $L_0=0,1+150 \cdot 10^{-9}$ м

Изменение спектров на графиках подтверждает изменение расстояния между лазером и объектом.

В четвертой главе описывается экспериментальная часть работы.

Измерения проводились на установке, изображение которой представлено на рисунке 4.

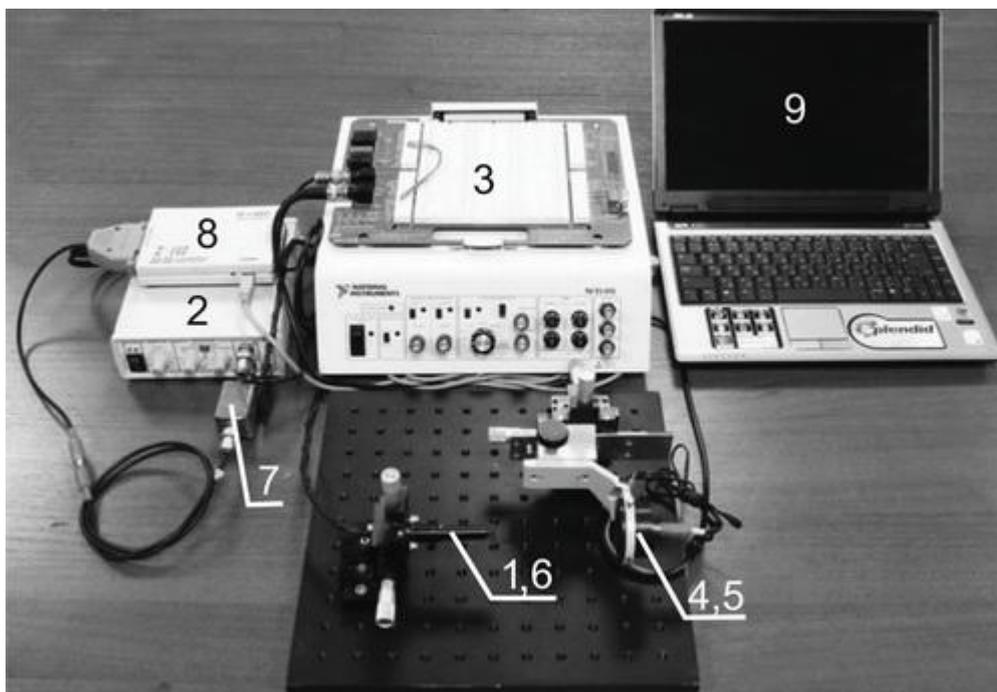


Рисунок 4 - Вид экспериментальной установки: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – блок управления током питания, 3 – генератор сигналов на базе платформы NI ELVIS, 4 – объект, 5 – микромеханическая подача, 6 – фотоприемник, 7 – фильтр переменного сигнала, 8 – АЦП, 9 – компьютер

В состав установки входили: частотномодулированный полупроводниковый лазерный автодин на лазерном диоде RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с длиной волны 654 нм – 1, его излучение направлялось на поверхность объекта 4, который был закреплен на микромеханической подаче – 5, также при этом значение измеренного диаметра пятна лазерного излучения на поверхности объекта 4 составило 1 мм. Модуляция длины волны излучения лазерного диода осуществлялась на частоте $\nu = 300$ Гц с помощью модуляции тока питания лазера посредством встроенного в учебную лабораторную станцию виртуальных приборов NI ELVIS генератора сигналов – 3. Изменение тока питания, лазерного диода осуществлялось путем изменения напряжения питания, подаваемого на полупроводниковую структуру от блока управления током питания – 2.

Питание лазерного диода осуществлялось с помощью источника тока.

В итоге был достигнут результат изображенный на таблице 1.

Таблица 1 - Результаты измерений и расчета наноперемещений зонда

Номер шага	Смещение шагового транслятора, нм	Амплитуда спектральной составляющей C_2	Амплитуда спектральной составляющей C_3	Стационарная фаза автодинного сигнала θ , рад	Величина смещений зонда, мкм
1	0	0,00844	0,00829	0,78	0
2	21	0,00939	0,00728	1,42	19
3	42	0,00046	0,00917	1,23	44
4	63	0,00991	0,00624	1,13	60
5	84	0,01284	0,00028	0,95	83
6	105	0,0056	0,00764	1,34	102
7	126	0,01076	0,00546	1,06	122
8	147	0,01487	0,01398	1,15	137
9	168	0,01071	0,0059	1,71	156
10	189	0,00279	0,00818	0,69	176
11	210	0,0104	0,00598	1,56	192
12	231	0,01155	0,00534	1,17	216
13	252	0,01457	0,00071	0,91	237
14	273	0,01211	0,00402	0,72	256
15	294	0,01139	0,00512	1,26	278
16	315	0,00443	0,00877	1,50	298

Так же были приведены изменения автодинного сигнала и спектральных характеристик в виде графически. По графикам включенным в работу видно, что при смещении зонда на величину колеблющуюся около 21 нм происходит резкое изменение гармоник, что демонстрирует возможность измерения наносистем с помощью лазерного полупроводникового автодина.

В работе была показана возможность измерения наносистем с помощью полупроводникового лазерного автодина гармонической модуляцией длины волны лазерного излучения. В ходе компьютерного моделирования лазерной автодинной системы при наносмещениях объекта был определен порог чувствительности автодинной системы с токовой модуляцией лазерного излучения к наносмещениям объекта. Величина порогового смещения составила 21 нм. За пороговый уровень взята величина соответствующая изменению спектральной гармоники более чем на 20%. В

последствии, эти данные были подтверждены практически. Величина смещения зонда менялась, но была примерно равной 21 нм.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 *Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., Rioux M.* Laser ranging : a critical review of usual technique for distance measurement // *Opt. Eng.* 2001. Vol. 40, № 1. P. 10–19.
- 2 *Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T.* Laser diode self-mixing technique for sensing applications // *J. Opt. A : Pure Appl. Opt.* 2002. Vol., № 6. P. 283–S294.
- 3 Усанов, Д. А. Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль // *Квант. электроника.* 2011. Т. 41, № 1. С. 86–94.
- 4 Соболев, В. С. Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией / В.С. Соболев, Г.. Кашеева // *Автометрия.* 2008. Т. 44, № 6. С. 49–65.
- 5 *Norgia M., Giuliani G., Donati S.* Absolute Distance Measurement With Improved Accuracy Using Laser Diode Self-Mixing Interferometry in a Closed Loop // *IEEE transaction on instrumentation and measurement.* 2007. Vol. 56, №. 5. P. 1894–1900.
- 6 *Guo D., Wang M.* Self-mixing interferometry based on a double modulation technique for absolute distance measurement // *Appl. Opt.* 2007. Vol. 46, № 9. P. 1486–1491.
- 7 Астахов, Е.И. Автодинная интерферометрия расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера / Е.И. Астахов, Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, С.Ю. Добдин // *Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика № 3 / том 15 / 2015* С.12–15.
- 8 Соболев, В. С. Применение активной лазерной интерферометрии с частотной модуляцией для оценки наноперемещений и нановибросмещений диффузно отражающих объектов / В.С. Соболев, А.М. Щербаченко, А.М. Харин // *ГЕО-Сибирь.* 2010. Т. 5. Специализированное приборостроение, метрология, теплофизика, микротехника, нанотехнологии. Ч. 1 С. 119-124

- 9 Резник А. Н., Ближнепольная сверхвысокочастотная микроскопия // Институт физики микроструктур РАН, ГСП-105, Н.Новгород.
- 10 Кадочкин, А. С., Метод резонансной апертурной оптической ближнеполевой микроскопии / С.А. Кадочкин // Ульяновский государственный университет. Журнал прикладной спектроскопии, Т. 74 №4. 2007. С. 499 – 506.
- 11 Гадомский, О.Н., Кадочкин А.С. Метаструктурные системы из активированных наночастиц и оптические ближнепольные резонансы / О.Н. Гдомский, А.С. Кадочкин // Оптика и спектроскопия. 2005. Т.98. N 2. С.300-308.
- 12 Крайнов, В.П. Эволюция больших кластеров под действием ультракороткого сверхмощного лазерного импульса / В.П. Крайнов, М.Б. Смиронов // УФН. 2000. Т.170. №9. С.969-990.
- 13 Гадомский, О.Н. Электронные состояния в металлических кластерах / О.Н.Гадомский, А.С.Шалин // ЖЭТФ. 2007. Т.131 . №5. С. 5—13
- 14 Рябухо, В.П. Интерферометр Майкельсона с лазерным источником света / В.П. Рябухо, В.В. Лычагов, А.Л. Кальянов. Саратов : Изд-во Саратов. ун-та, 2009. 16 с.
- 15 Атаходжаев, И. Лазерная интерференционная микроскопия для нанотехнологий / И. Атаходжаев, П. Игнатъев, К. Индукаев, П. Осипов // Фотоника. 2012. Т.32. № 2. С. 52-55.
- 16 Вагарин, В. А. Об ограничениях в применении спектрального метода определения амплитуды вибраций / В.А. Вагарин, А.В. Скрипаль, Д.А. Усанов //Автометрия. 1994. № 1. С. 89–90.
- 17 Lang R., Kobayashi K. External optical feedback effects on semiconductor injection laser properties // IEEE J. Quantum Electron. 1980. Vol. QE-16, № 3. P. 347–355.
- 18 Olesen H., Osmundsen J. H., Tromborg B. Nonlinear dynamics and spectral behavior for an external cavity laser // IEEE J. Quantum Electron. 1986. Vol. QE-22, № 6. P. 762–773.

- 19 Schunk N., Petermann K. Numerical analysis of the feedback regimes for a single-mode semiconductor lasers with external feedback // IEEE J. Quantum Electron. 1988. Vol. 24, № 7. P. 1242–1247.
- 20 Усанов, Д.А. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов / Д.А. Усанов, Ал.В. Скрипаль. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003. 312 с.
- 21 Усанов, Д.А. Измерение амплитуды нановибраций с помощью полупроводникового лазерного автодина с учетом влияния обратной связи / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.О. Кащавцев, М.Ю. Калинин // Письма в ЖТФ. 2012. Том 38, № 12. С. 81-86.