

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ  
Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра физики твёрдого тела

**Метод измерения расстояния по спектру автодинного сигнала  
полупроводникового лазера**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

студента 4 курса 411 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

код и наименование направления

факультета нано- и биомедицинских технологий

наименование факультета

Соколенко Игоря Сергеевича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Ан.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

И.о. зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2019 г.

Уникальные характеристики полупроводниковых лазеров открыли широкие перспективы дальнейшего развития высокоразрешающей спектроскопии, оптоэлектроники и метрологии. Высокая чувствительность этих лазеров к рассеянному излучению, считавшаяся ранее большим недостатком, в последнее время широко используется. Это привело к созданию нового направления в оптико-физических измерениях - интерферометрии с оптической обратной связью (Self-mixing interferometry), а возможность существенного (до десятков гигагерц) изменения частоты излучения простым изменением инжекционного тока создала предпосылки для разработки методов интерферометрии с частотной модуляцией.

Конкуренцию таким интерферометрам, да и то только в области дальнометрии, могут составить лишь ультразвуковые приборы и лазерные дальнометры триангуляционного типа. Но даже в этой области, как показано, имеется зона дальности, где интерферометры с частотной модуляцией могут найти свою нишу.

Одним из путей расширения возможностей лазерной интерферометрии, упрощения конструкции и снижения стоимости соответствующих приборов является объединение явлений оптической обратной связи и частотной модуляции в одном устройстве.

При определении расстояния до объекта с помощью оптического зондирования, в настоящий момент, представляются перспективными методы оптической интерферометрии с изменением длины волны, основанные на регистрации фазы отраженного лазерного излучения. Применение полупроводниковых лазерных диодов в качестве перестраиваемых источников когерентного излучения открывает 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.

В настоящее время известно применение полупроводниковых лазеров, работающих в автодинном режиме, для контроля динамических характеристик вибраций и перемещений. Такого рода методы контроля обладают высокой чувствительностью [1].

Таким образом, актуальность темы выпускной квалификационной работы обусловлена разрешением определенных теоретических представлений о физике лазерных автодинных систем и их использования для решения практических задач измерений расстояния.

Цель данной работы заключается в рассмотрении возможности использования полупроводникового лазера, работающего в автодинном режиме, для определения расстояния до покоящегося объекта с помощью программного обеспечения Mathcad. В частности, определяются достоинства автодинного интерференционного метода измерения расстояния при пилообразной модуляции длины волны лазерного излучения, в случае которого расстояние, полученное из спектра, смоделированного автодинного сигнала, совпадает с заданным при компьютерном моделировании

Выпускная квалификационная работа содержит 3 главы:

- 1) Анализ современного состояния исследований эффекта автодинного детектирования в лазерных системах
- 2) Автодинная интерферометрия расстояния
- 3) Компьютерное моделирование при пилообразной модуляции длины волны лазерного излучения

Автодинная интерферометрия как метод определения расстояния до отражателя представляется перспективной, поскольку открывает возможности создания малогабаритных и простых в эксплуатации измерительных систем. Система, состоящая из полупроводникового лазера и внешнего отражателя, сочетает функции генератора и приемника электромагнитной волны в одном устройстве. Возвращенная внешним отражателем в резонатор лазера волна приводит к изменению мощности излучения лазерного диода. Такой режим работы генерирующей системы называют автодинным.

В настоящее время для определения расстояния до объекта с помощью оптического зондирования используются методы лазерной интерферометрии с изменением длины волны излучения лазерного диода, основанные на регистрации фазы отраженного лазерного излучения [19].

В основу рассматриваемой методики измерений дальности до исследуемых объектов и параметров их движения положено свойство полупроводниковых лазеров изменять частоту излучения под воздействием изменений инжекционного тока. При небольших (до 5 %) изменениях тока частота излучения меняется линейно, и если этот ток периодически модулируется, то соответственно меняются мощность и частота излучения.

Модулированный таким образом пучок света направляется на исследуемый объект, как показано на рисунок 1. Рассеянное им излучение попадает обратно в активную среду лазера, где усиливается и интерферирует с исходным излучением. Из-за конечного значения скорости света рассеянное излучение приходит в лазер с некоторой задержкой, вследствие чего частота этого излучения не совпадает с частотой, генерируемой лазером в данный момент. В результате на выходе встроенного в лазер фотодиода возникает электрический сигнал, параметры которого несут полезную

информацию об отражающей способности исследуемого объекта, его удаленности и характеристиках движения.

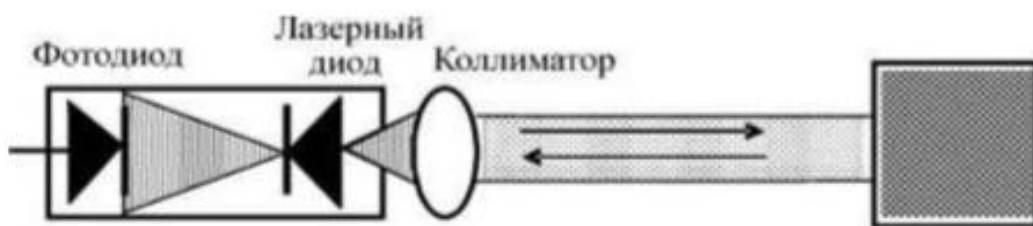


Рисунок 1. Схема установки автодинного интерферометра

### **Метод, основанный на использовании пилообразной модуляции излучения лазерного автодина**

Излучение лазерного автодина направляется на измеряемый объект, а часть отраженного излучения попадает в резонатор полупроводникового лазера, где оно интерферирует с исходным излучением. В силу конечности скорости света, отраженное излучение приходит в резонатор лазера с задержкой по времени. Изменение мощности излучения лазерного диода фиксируется с обратной стороны резонатора лазера с помощью встроенного лавинного фотодиода. При изменении тока накачки полупроводникового лазера по пилообразному закону изменяется фаза отраженного от объекта излучения, что приводит к изменению его мощности. Благодаря этому при неподвижном объекте интерференция излучений приводит к тому, что выходной ток фотодиода периодически изменяется с частотой, определяемой модуляционной характеристикой лазерного диода и расстоянием до объекта. Сигнал с фотодетектора приобретает вид высокоамплитудной треугольной составляющей за счет пилообразной токовой модуляции лазерного диода с наложенной на нее низкоамплитудной фазовой модуляцией, формируемой за счет изменения фазы отраженного от объекта лазерного излучения.

На рисунке 2 приведен смоделированный автодинный сигнал при изменении длины волны излучения лазера  $\Delta\lambda=0,003$  нм, расстоянии до объекта равном 40 см и уровне обратной связи  $C \ll 1$  [28].

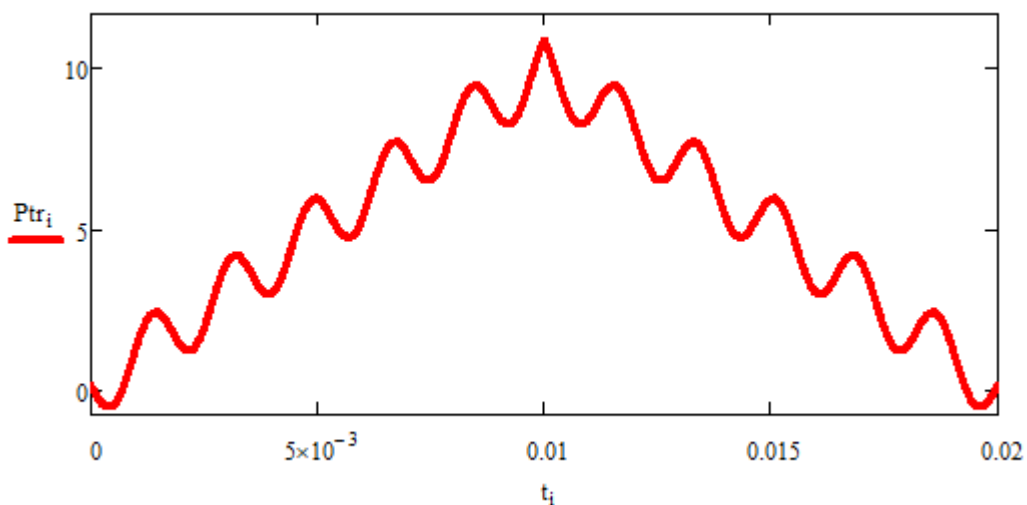


Рисунок 2. Смоделированный автодинный сигнал при изменении длины волны излучения лазера  $\Delta\lambda=0,003$  нм и заданном расстоянии 40 см.

### **Компьютерное моделирование при пилообразной модуляции длины волны лазерного излучения**

В отличие от интерференции волн по схеме Майкельсона в автодине происходит интерференция падающей и отраженной волн. В результате для лазерного излучения мы имеем новый резонатор, в котором возникает стоячая волна, а в зависимости от длины этого резонатора наблюдается усиление или ослабление собственного излучения лазерного диода. При модуляции длины волны лазерного излучения на внешнем фотоприемнике будет наблюдаться модуляция интенсивности излучения лазерного диода.

Поскольку при модуляции тока питания лазерного диода происходит изменение его мощности излучения, моделирование будем проводить при учете вклада в автодинный сигнал амплитудных составляющих мощности  $P_1$  и  $P_2$ :

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2 \cos(\omega(j(t)) \tau_0(t)), \quad (1)$$

где  $P_1(j(t))$  составляющая мощности, зависящая от тока питания лазерного диода,  $P_2$  – составляющая мощности, зависящая от величины отраженной волны через коэффициент отражения рассеивающей поверхности и зависящая от фокусирующих свойств оптической системы лазерного автодина.

### Моделирование методов измерения расстояния с заданным случайным образом расстоянием до объекта

Одна из формул, используемых для нахождения расстояния, выглядит следующим образом:

$$L = \frac{c \cdot N \cdot \lambda}{2 \cdot \Delta \lambda} \quad (2)$$

где  $L$  – расстояние от излучателя до объекта;  $N$  – количество пиков автодинного сигнала на участке подъема или спада;  $\lambda$  – длина волны излучения лазера;  $\Delta \lambda$  – изменение длины волны на одном периоде.

Были произведены измерения при помощи формулы (2) для сравнения заданного с рассчитанным расстоянием, а также получение погрешности между значениями.

Таблица 1

Заданное расстояние до объекта, м	Рассчитанное расстояние до объекта, м	Погрешность, %
0.2	0.213	6.5
0.3	0.32	6.6
0.4	0.427	6.75
0.5	0.507	1.4
0.6	0.613	2.16
0.7	0.72	2.8
0.8	0.827	3.375
0.9	0.933	3.6

Результаты, полученные с помощью формулы (2), имеют приемлемый характер и средний процент погрешности среди полученных вычислений

равен 4.14%. Однако, главный минус данного метода это ручной подсчёт количества пиков (переменная N в формуле (2)) на подъеме (или спуске) графика смоделированного автодинного сигнала.

Также для определения расстояния до объекта используется “частота биения” автодинного сигнала, используя соотношение:

$$\frac{f_{\text{подъема}}}{f_{\text{спада}}} = \dots, \quad (3)$$

Где  $f_{\text{подъема}}$  – частота подъема, а  $f_{\text{спада}}$  – частота спада полученного сигнала.

При использовании симметричной пилообразной токовой модуляции, как видно на рисунке 2, при которой время нарастания и убывания амплитуды тока выбирают одинаковыми, автодинный сигнал приобретает симметричный вид на участках подъема и спада в соотношении (3) при

$\frac{f_{\text{подъема}}}{f_{\text{спада}}} = 1$  принимает вид:

$$\frac{f_{\text{подъема}}}{f_{\text{спада}}} = 1. \quad (4)$$

При проведении измерений при меньших значениях девиации было принято решение задать значение равным  $\Delta\lambda=1$  нм и перейти в диапазон значений от 0.01 м. до 0.02 м. с шагом в 0.001 м. (т.е. таким образом задать чувствительность метода в 1 мм.)



Таблица 2

Заданное расстояние до объекта, м	Рассчитанное расстояние до объекта, м	Погрешность, %
0.01	0.01003	0.3
0.011	0.0109	0.1
0.012	0.01204	0.3
0.013	0.01299	0.06
0.014	0.0139	0.4
0.015	0.01489	0.7
0.016	0.01605	0.3
0.017	0.017006	0.03
0.018	0.01806	0.3
0.019	0.01901	0.06
0.02	0.0199	0.1

Результаты, приведенные в таблице 2., показывают среднюю погрешность измерений равной 0.24%, что говорит о достаточно точном измерении.

Произведенные измерения показывают, что при увеличении амплитуды девиации происходит уменьшение погрешностей между заданными и полученными значениями.

Увеличение амплитуды девиации также влияет и на то, какие расстояния могут быть измерены как можно точнее, так при  $\Delta\lambda \leq 0.03$  нм измерения лучше производить при расстояниях  $L \geq 0.1$  м., а при  $\Delta\lambda \geq 1$  нм более точными измерениям соответствуют расстояния при  $L \leq 0.1$ .

### **Моделирование метода измерения расстояния при заданном количестве интерференционных максимумов расстоянии**

В методах предыдущего раздела, исходное расстояние задавалось вручную, однако в данном разделе будет показан улучшенный метод автодинного детектирования. Расстояние будет вычисляться из формулы, посредством изменения величины девиации, а также в эту формулу будет

входить количество интерференционных максимумов, которые мы зададим самостоятельно.

Специфика метода такова, что мы добились нулевой ошибки метода (т.е. заданное расстояние полностью совпадает с вычисленным значением), также не зависимо от значения заданной амплитуды девиации, амплитуда основной гармоники в спектре остается постоянной.

$$L = \frac{\lambda^2}{4 \Delta\lambda} \cdot n. \quad (5)$$

Для достижения нулевой ошибки метода, расстояние будем вычислять по формуле 5.

Приведём моделирование автодинного сигнала при параметрах  $\lambda = 650$  нм, девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода  $\Delta\lambda = 0.1 \cdot 10^{-9}$  нм. При  $n=20$  соотношение (5) дает величину  $L_{20} = 0.021125$  м. Для параметров  $P_1 = 10$ ,  $P_2 = 1$ , частоте модуляции тока питания лазера 100 Гц на рисунке 3. приведен смоделированный автодинный сигнал, а на рисунке 4. его спектр.

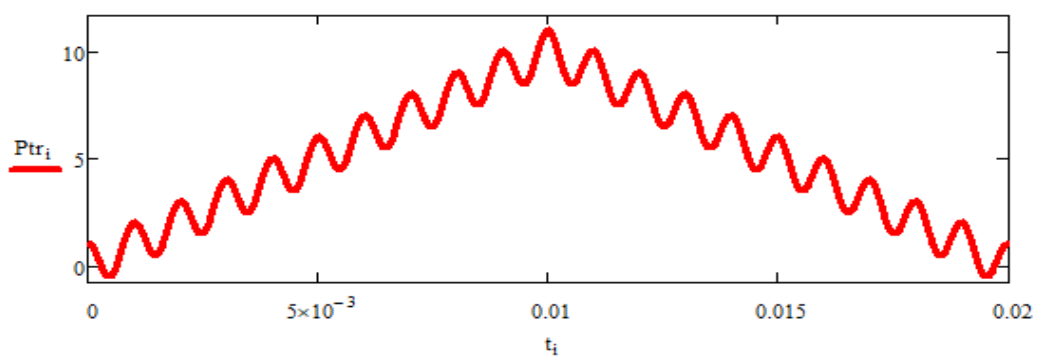


Рисунок 3. Смоделированный автодинный сигнал при параметрах  $\lambda=650$  нм, нм,  $n=20$ ,  $L = 0.21125$  м.

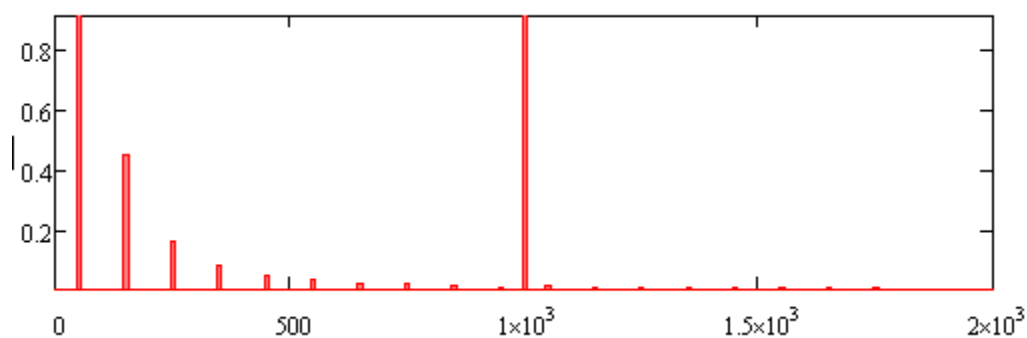


Рисунок 4. Спектр автодинного сигнала, изображенного на рисунке 3.

Расстояние до объекта в случае пилообразной модуляции определялось по частоте  $f_{ol}$  на периоде  $\Delta t=0.01$  изменения длины волны  $\Delta\lambda$  соотношением:

$$\text{---} \cdot \text{---} \quad (6)$$

Вычисленное из соотношения (6) по измеренному значению  $f_{ol}=1000$  Гц расстояние до объекта в точности совпадает с заданным при компьютерном моделировании.

Аналогичный вид спектра автодинного сигнала наблюдается, если увеличить расстояние до объекта, путем изменения величины  $n$  на  $n = n + 1$ . В этом случае  $f_{ol}=1050$  Гц, а  $L_{21}=0.02218125$  м. Разница со случаем  $n$  составляет 1056 мкм.

Поскольку равнофазные расстояния отличаются в нашем случае на величину 1056 мкм, то максимальная погрешность измерений составит 528 мкм. Это связано с тем, что до середины равнофазного расстояния в спектре автодинного сигнала максимальной будет гармоника с частотой  $f_{ol}=1000$  Гц, а после середины равнофазного расстояния в спектре автодинного сигнала максимальной будет гармоника с частотой  $f_{ol}=1050$  Гц.

Расчеты точности измерений, изложенные выше, приведены для расстояний  $\geq 2$  см от края резонатора лазерного диода до отражателя. С

ростом расстояния до отражателя будет увеличиваться количество максимумов интенсивности интерферирующих волн.

Для определения чувствительности метода произведём увеличение расстояния на 1 мкм для сигнала с параметрами  $\lambda = 650$  нм,  $\Delta\lambda =$  нм,  $n = 20$ ,  $L = 0.021125$  м. показанного на рисунке 3.

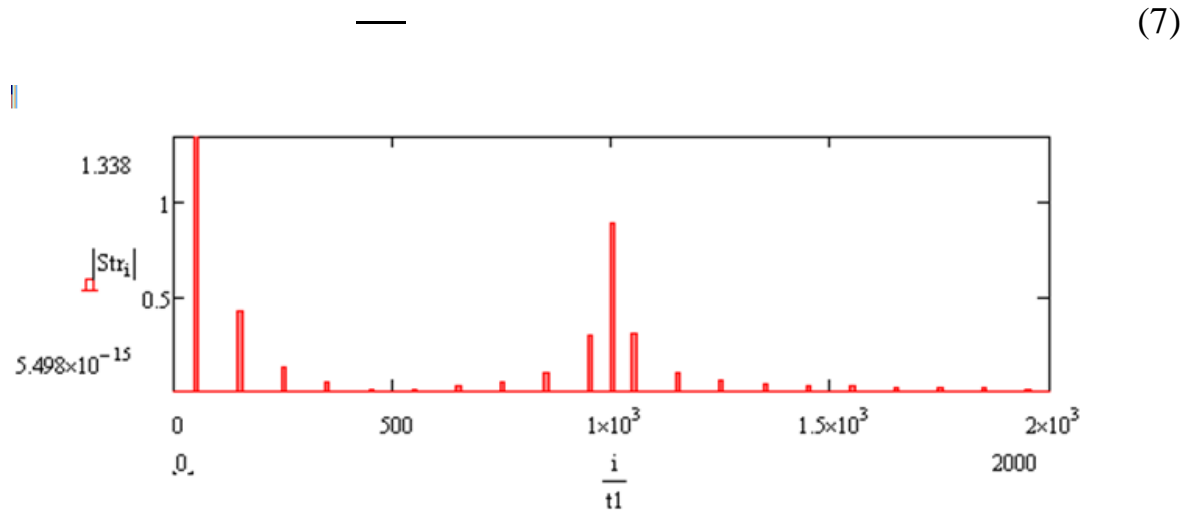


Рисунок 5. Спектр автодинного сигнала при расстоянии  $L = 0.021126$  м

Дальнейшее уменьшение прибавочного расстояния не приводит к изменению спектра, то есть система не фиксирует изменения расстояния на данную величину. Таким образом, была выявлена чувствительность метода пилообразной модуляции, которая равная 1 мкм.

Следует отметить, что рассмотренный метод может показывать и более высокую чувствительность к изменяющемуся расстоянию, однако было принято решение остановиться на чувствительности в 1 мкм, во избежание получения ошибки при дальнейшем расчёте.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе было проведено математическое моделирование работы лазерного автодина при различных задаваемых начальных условиях. Таких как: расстояние до объекта, девиация длины волны и количества интерференционных максимумов.

Расчёты производились несколькими способами. Были сделаны сравнения расстояний при изменении амплитуды девиации, а также подсчёт погрешностей между заданными и полученными расстояниями в результате расчётов.

При рассмотрении первых двух методов, можно сделать вывод, что при увеличении амплитуды девиации происходит уменьшение погрешностей между заданными и полученными значениями. Увеличение амплитуды девиации также влияет и на то, какие расстояния могут быть измерены как можно точнее, так при  $\Delta\lambda \leq 0.03$  нм измерения лучше производить при расстояниях  $L \geq 0.1$  м., а при  $\Delta\lambda \geq 1$  нм более точными измерениям соответствуют расстояния при  $L \leq 0.1$  м.

В последующем методе, в котором была достигнута нулевая ошибка измерения путём получения точного расстояния до объекта через формулу. Была выявленная максимальная погрешность измерения в размере 528 мкм исходя из разницы равнофазных расстояний, а также вычислена минимальная чувствительность метода в 1 мкм.