

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

**ИЗМЕРЕНИЕ РАССТОЯНИЯ С ПОМОЩЬЮ  
ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ЛАЗЕРА ПРИ ПИЛООБРАЗНОЙ  
ТОКОВОЙ МОДУЛЯЦИИ ДЛИНЫ ВОЛНЫ ИЗЛУЧЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ  
студентки 4 курса

направления 210601 «Электроника и нано-электроника»  
факультета нано- и биомедицинских технологий

Федоровой Александры Анатольевны

Научный руководитель

профессор,

доктор физ.- мат. наук

А.В. Скрипаль

\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч.  
звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

профессор,

доктор физ.- мат. наук.

Д.А. Усанов

\_\_\_\_\_

должность, уч. степень, уч.  
звание

\_\_\_\_\_

подпись, дата

\_\_\_\_\_

инициалы, фамилия

Саратов, 2017

## **Введение**

Последние три десятилетия развития физики твердого тела характеризуются тем, что основными объектами исследования все в большей степени становятся не массивные кристаллы, а тонкие пленки, многослойные тонкопленочные системы, проводящие нити и кристаллиты малого размера. То обстоятельство, что квантово-размерные структуры находятся в центре внимания именно сейчас, вызвано интенсивным развитием в последние годы технологии изготовления полупроводниковых структур – молекулярно-лучевой эпитаксии (представляет собой усовершенствованную разновидность методики термического напыления в условиях сверхвысокого вакуума), нанолитографии (метод получения одно- и нульмерных структур, позволяющий вырезать области, ограниченные по одному или двум направлениям, используя в качестве исходного объекта структуру с двумерным электронным газом), открытием явления самоорганизации наноструктур (методы получения с использованием эффектов спонтанного образования наноструктур). Это дает возможность создания такого рода структур любого профиля с точностью до одного атомного слоя. Весь комплекс явлений, обычно понимаемый под словами «электронные свойства низкоразмерных электронных систем», и многочисленные новые типы электронных приборов, использующих эти свойства, - все это имеет в основе один фундаментальный физический факт: изменение энергетического спектра электронов и дырок в структурах с очень малыми размерами. В таких системах существенно меняется большинство электронных свойств - возникает большое число новых, так называемых размерных эффектов. Наиболее кардинальной перестройкой свойств отличаются квантовые размерные структуры, в которых свободные носители заряда локализованы в одном, двух или во всех трех координатных направлениях в области с размерами порядка дебройлевской длины волны носителей. При этом вступают в силу законы квантовой механики, и происходит изменение 4

наиболее фундаментальной характеристики электронной системы - ее энергетического спектра. Спектр становится дискретным вдоль координаты, по которой ограничено движение. Если движение ограничено вдоль одного или двух направлений, то под влиянием внешних полей и взаимодействий с центрами рассеяния (фононы, примеси) могут меняться уже не три, а лишь две или только одна из компонент импульса электронов и дырок, в результате чего носители ведут себя как двумерный или одномерный газ. Квантовые структуры, в которых движение носителей ограничено во всех трех направлениях, напоминают искусственные атомы. Здесь энергетический спектр является чисто дискретным. Квантово-размерные структуры обладают целой совокупностью уникальных свойств, весьма далеких от тех, какие можно наблюдать в системе обычных, трехмерных электронов и дырок. Такие структуры могут служить основой для создания новых типов полупроводниковых приборов, в первую очередь для опто- и наноэлектроники.

Целью данной работы является обоснование метода измерения расстояния с помощью полупроводникового лазера при пилообразной токовой модуляции длины волны излучения.

Выпускная квалификационная работа содержит 4 главы:

- 1) Методы лазерной интерферометрии для измерения расстояния.
- 2) Полупроводниковые лазерные автодины.
- 3) Формирование автодинного сигнала при модуляции длины волны излучения лазерного диода.
- 4) Экспериментальная часть.

## **Формирование автодинного сигнала при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода.**

В лазерной системе зависимость интенсивности интерференционного сигнала от времени имеет вид негармонической функции даже в случае гармонически колеблющегося объекта при условии, что амплитуда колеблющегося объекта соизмерима с длиной волны лазерного излучения ( ).

Мощность излучения протектированного сигнала в интерференционной системе, одно из плеч которого совершает гармонические колебания, может быть представлена в виде разложения в ряд по функциям Бесселя:

(1)

, где  $n$  – номер гармоники спектральной составляющей выходного сигнала детектора.

Как видно из выражения (15) протектированный сигнал состоит из постоянной компоненты ( ) гармоники на основной частоте и составляющих на более высоких гармониках основной частоты.

Для гармонически колеблющегося объекта амплитуды спектральных составляющих выходного сигнала детектора автодинной системы прямо пропорциональны функциям Бесселя и и связаны с ними соотношениями:

(2)

С ростом амплитуды токовой модуляции  $\xi$  наблюдается обогащение спектра протектированного сигнала, причем амплитуда гармоники с максимальной амплитудой  $S_{\max}$  сдвигается в сторону больших значений  $n$ .

Зависимость амплитуды гармоники  $S_{\max}$ , имеющей максимальное значение в спектре протектированного сигнала, от амплитуды колебаний объекта  $\xi$ , нормированной на длину волны лазерного излучения, приведена на рис. 4.

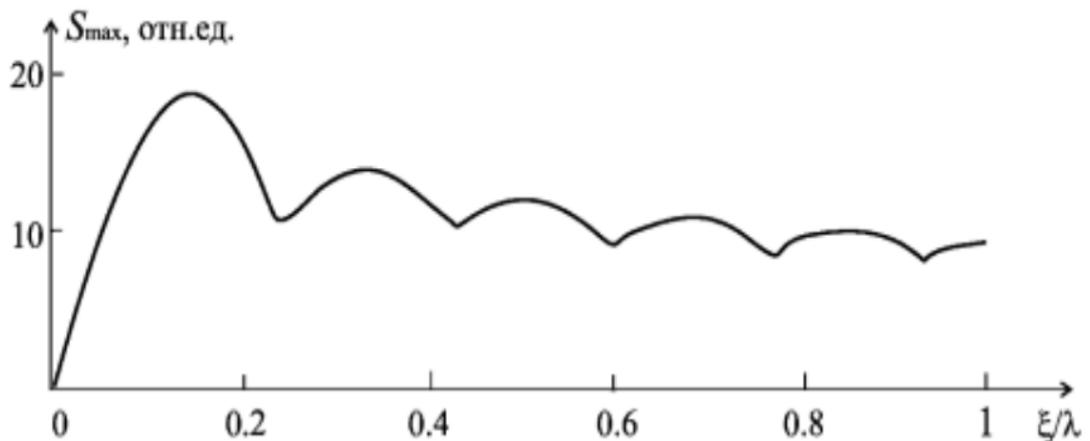


Рис. 1. Зависимость амплитуды гармоники  $S_{\max}$ , от нормированной амплитуды колебаний объекта  $\xi / \lambda$ .

Как видно из этой зависимости наблюдается четко выраженные максимумы на кривой: от 0 до  $\sim 0.23$  максимальное значение в спектре протектированного сигнала имеет гармоника, совпадающая с частотой токовой модуляции ( $n=1$ ); от  $\sim 0.23$  до  $\sim 0.44$  максимальное значение в спектре протектированного сигнала имеет вторая гармоника ( $n=2$ ) и т. д. Знание этой зависимости, в частности положения экстремумов, позволяет использовать ее в качестве нормировочной.

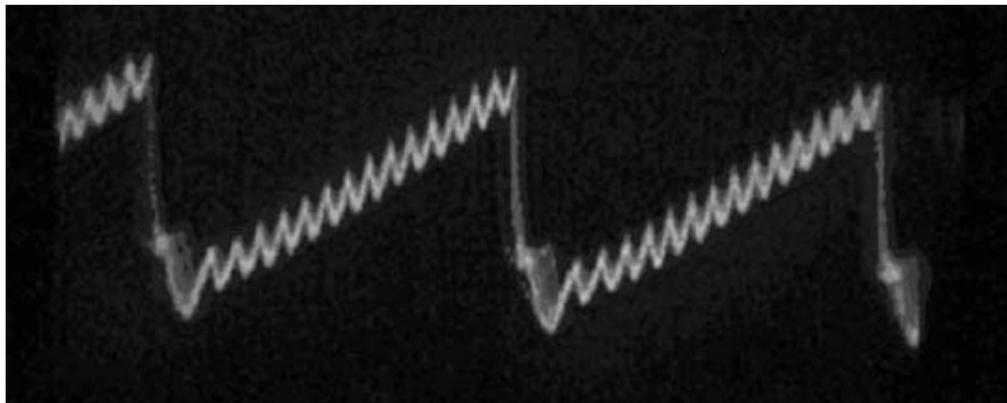
## Формирование автодинного сигнала при пилообразной модуляции длины волны излучения лазерного диода.

При линейном изменении инжекционного тока лазера частота излучения может быть представлена в виде

$$f = f_0 + \alpha t \quad (3)$$

,где  $f_0$  - исходная частота излучения лазера;  $\alpha = df/dt$  - крутизна изменения его частоты во времени под влиянием модулирующего тока;  $t$  - текущее время;  $T$ - период пилообразной модуляции.

Если исследуемый объект удален от лазера на расстояние  $S$ , то рассеянное поле придет в лазер с задержкой  $\tau = 2S/c$ , где  $c$  - скорость света.



а



б

Рис. 2. Осциллограммы интерференционной части сигнала непосредственно с выхода фотоприемника – а, и после компенсации амплитудной модуляции – б.

Тогда фототок встроенного в лазер фотодиода определяется

(4)

где  $E_3(t)$  - напряженность зондирующего поля,  $E_p(t)$  - напряженность усиленного лазером рассеянного поля, а  $E_{30}$ ,  $E_{p0}$  - их амплитудные значения,  $\omega$  - круговая частота излучения лазера,  $K$  - чувствительность фотоприемника.

Хорошо видна пилообразная помеха и интерференционная часть сигнала, частота которой составляет 300 кГц. Небольшие пики на каждом периоде модуляции объясняются неполной компенсацией пилообразной части сигнала.

Рассмотрим поведение интерференционного сигнала, когда с некоторого расстояния  $S_0$  в момент  $t = 0$  объект начинает движение со скоростью  $V(t)$ . Его полная фаза:

$$\varphi(t) = \frac{4\pi S_0}{\lambda} + \frac{4\pi \int_0^t V(t) dt}{\lambda} + \frac{4\pi \alpha S_0 t}{c} + \frac{4\pi \alpha t \int_0^t V(t) dt}{c} - \frac{4\pi \alpha S_0^2}{c^2} - \frac{8\pi \alpha S_0 \int_0^t V(t) dt}{c^2} - \frac{4\pi \alpha \left( \int_0^t V(t) dt \right)^2}{c^2}.$$

$$\omega_0 \tau = \omega_0 \frac{2 \left( S_0 + \int_0^t V(t) dt \right)}{c} = \frac{4\pi S_0}{\lambda} + \frac{4\pi \int_0^t V(t) dt}{\lambda}, \quad (5)$$

где  $\lambda$  - длина волны излучения лазера.

Теперь рассмотрим влияние движения объекта на частоту сигнала, которая определяется как производная его фазы по времени:

$$f_c(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{2V(t)}{\lambda} + \frac{2\alpha S_0}{c} + \frac{2\alpha \int_0^t V(t) dt}{c} + \frac{2\alpha t V(t)}{c} - \frac{4\alpha S_0 V(t)}{c^2} - \frac{4\alpha V(t) \int_0^t V(t) dt}{c^2}. \quad (6)$$

Фаза и частота интерференционного сигнала зависят от расстояния (дальности) до рассеивающего объекта, его перемещений и скорости.

Таким образом открывается возможность измерения этих характеристик движения объекта. Важно также отметить присутствие постоянной составляющей частоты, играющей роль несущей, что, как уже упоминалось, позволяет легко определять направление движения объекта.

### **Формирование автодинного сигнала при треугольной модуляции длины волны излучения лазерного диода.**

Рассмотрим метод треугольной модуляции на лазерном автодине. Известно что, расстояние до объекта в случае треугольной модуляции определяется соотношением:

$$\text{—} \quad (7)$$

,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.

Расстояние можно также определить с помощью, так называемой "частоты биения" автодинного сигнала, используя соотношение:

$$\text{---} \quad (8)$$

,где  $f_{up}$  – частота подъема, а  $f_{down}$  – частота спада полученного сигнала.

В силу симметричности автодинного сигнала,  $f_{up}=f_{down}$ , следовательно, соотношение (8) принимает вид:

$$\text{---} \quad (9)$$

На рис.5. приведен смоделированный автодинный сигнал при инжекционном токе 40мкА и расстоянии до объекта равном 8 см и уровне обратной связи  $C \ll 1$ .

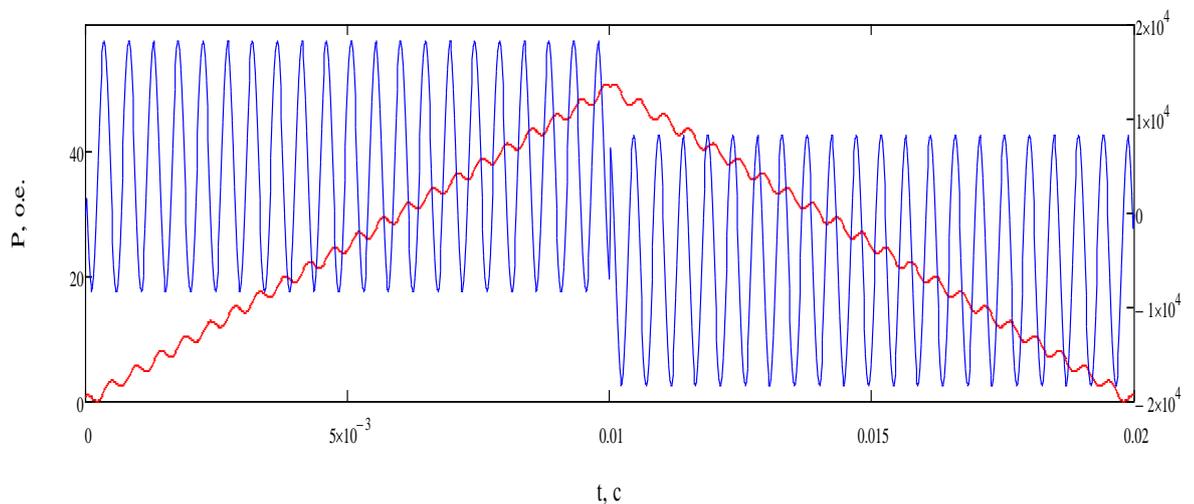


Рис. 3. Смоделированный автодинный сигнал при инжекционном токе 40мкА и заданном расстоянии 40 см. Так же на рисунке показана производная мощности по времени для удобства анализа количества пиков автодинного сигнала на треугольной модуляции.

На рис.4. приведен спектр автодинного сигнала, изображенного на рис.3. В спектре отчетливо выделяется частота автодинного сигнала с наибольшей амплитудой, соответствующая частоте  $f_{up}$  соотношения (7).

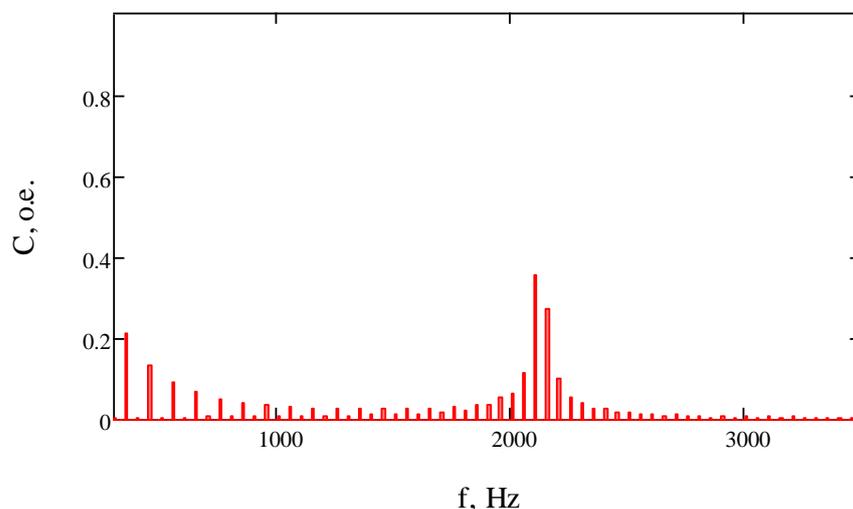


Рис. 4 Спектр автодинного сигнала, изображенного на рис.3.

Для определения точности данного метода решалась обратная задача по определению расстояния по спектру автодинного сигнала. Результаты компьютерного моделирования для различных заданных расстояний, а так же погрешность определения расстояния по модельному спектру автодинного сигнала в процентах показана в таблице 1.

Таблица 1.

Заданное расстояние до объекта, м	Рассчитанное расстояние до объекта, м	Погрешность, %
0,08	0,0796	6,8
0,074	0,0753	7
0,068	0,0667	7,3

Как видно из результатов, приведенных в таблице 1, погрешность измерений снижается с ростом расстояния до объекта.

На рисунке 5 приведен вид автодинного сигнала и его спектр, полученный в методе пилообразной токовой модуляции длины волны лазерного излучения на расстоянии 8 см при величине девиации частоты излучения, равной  $\omega_A = 132 \cdot 10^8$  рад./с, что соответствует величине 0.00046% длины волны излучения лазерного диода.

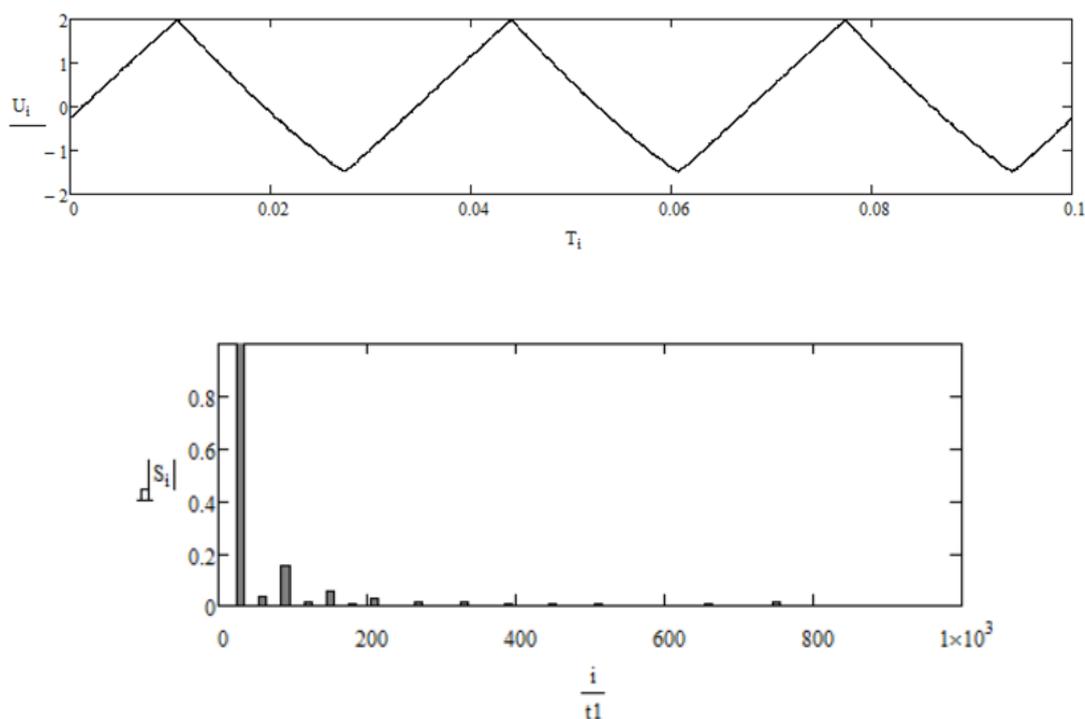


Рисунок 5. Частотномодулированный автодинный сигнал и его спектр полученный на экспериментальной установке на расстоянии 8 см соответственно при девиации частоты излучения лазерного диода  $\omega_A = 132 \cdot 10^8$  рад./с

Далее измерения проводились еще в двух точках 7,4 см и 6,8 см. Ниже на рисунках 6 и 7 представлены автодинные сигналы и их спектры.

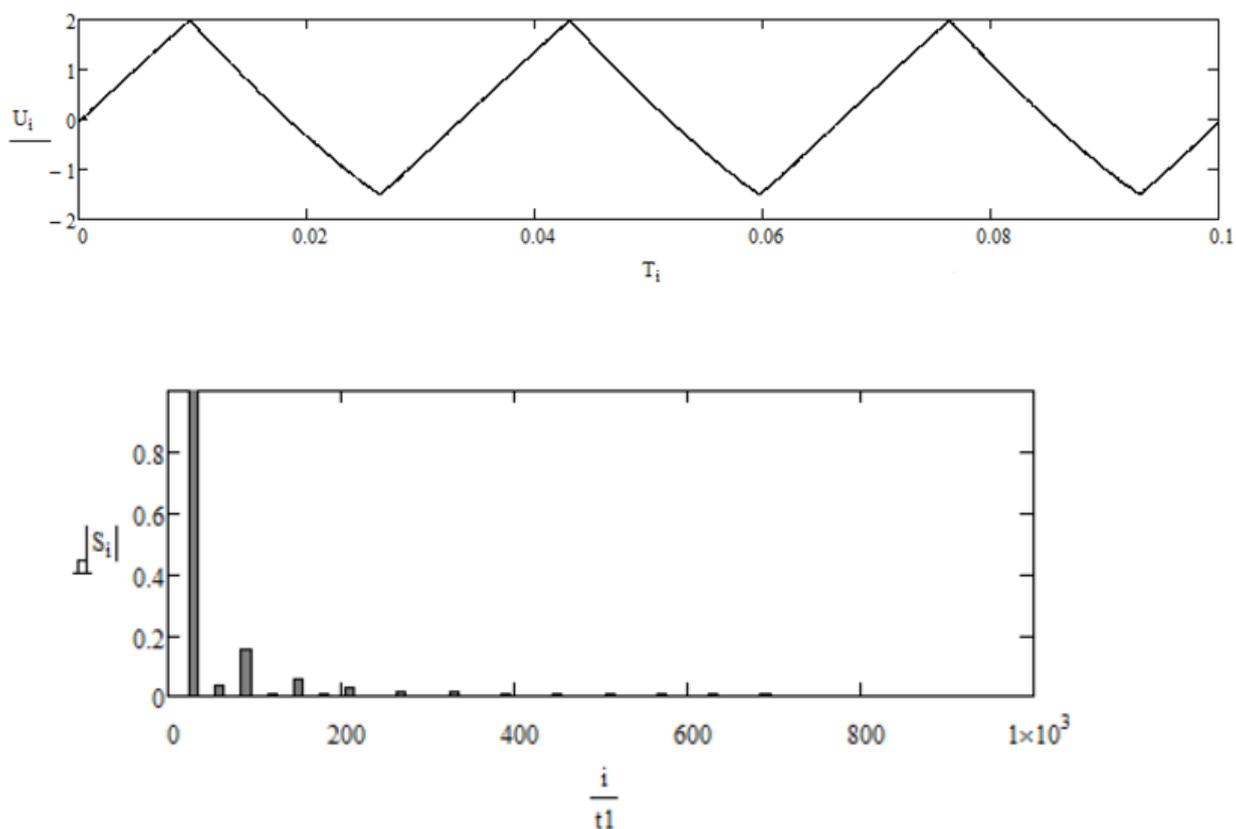


Рис. 6 Автодинный сигнал и его спектр при расстоянии до объекта в 7,4 см.

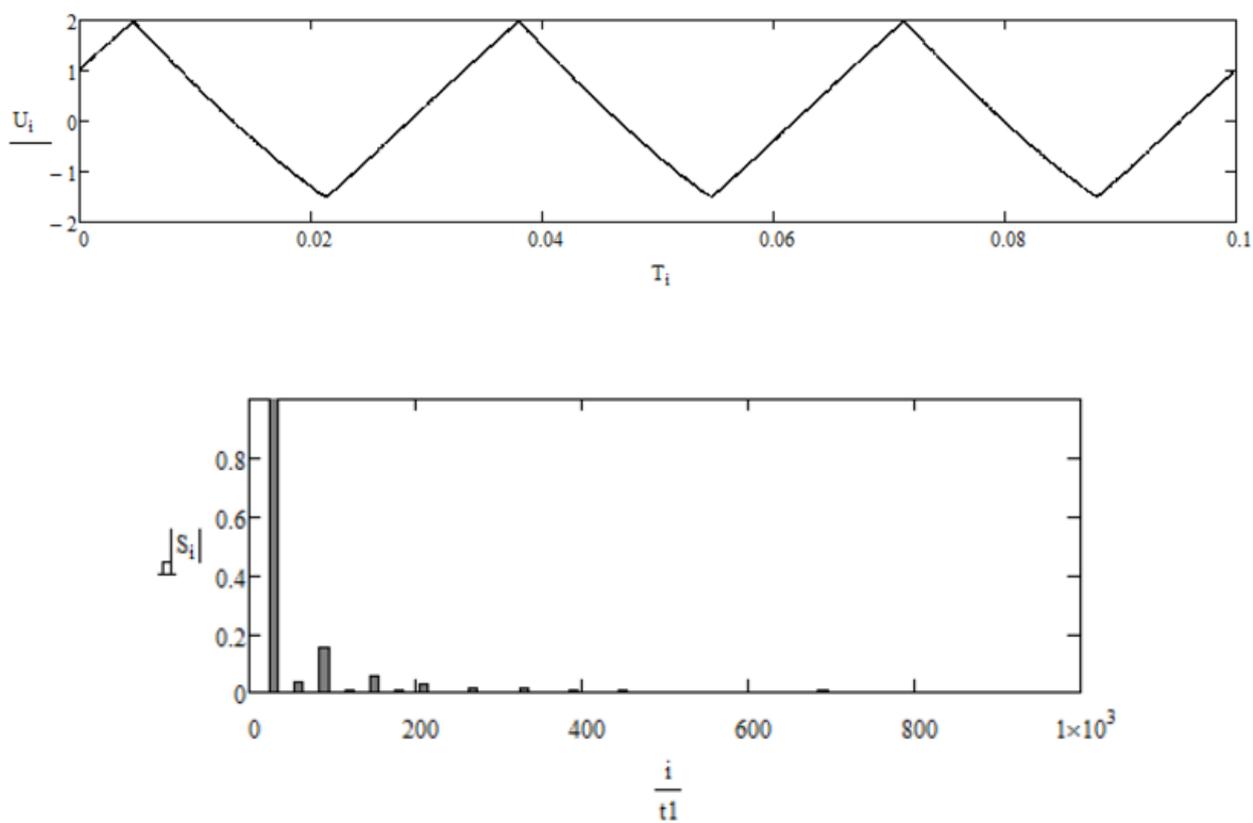


Рис. 7 Автодинный сигнал и его спектр при расстоянии до объекта в 6,8 см.

## **Заключение**

В ходе работы:

- 1) Были изучены возможности метода треугольной токовой модуляции длины волны лазерного излучения для определения расстояния до объекта по спектру автодинного сигнала полупроводникового лазерного излучателя. Оказалось что, в методе треугольной модуляции расчет расстояния до объекта проводится по значению частоты спектральной составляющей с максимальной амплитудой.
  
- 2) Проведено математическое описание при пилообразной токовой модуляции длины волны излучения полупроводникового лазерного автодина при расстоянии 8см.
  
- 3) Определено расстояние и в двух других точках расстояния до объекта: 7,4 см и 6,8 см. Из этого можно сделать вывод, что полупроводниковый лазерный автодин является отличным способом для измерения расстояния бесконтактным методом.