

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

**Тема: измерение абсолютного расстояния при токовой модуляции
длины волны полупроводникового лазера**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

студента 4 курса 4051 группы

направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»

код и наименование направления

института физики

наименование факультета, института

Тришкина Никиты Александровича

фамилия, имя, отчество

Научный руководитель

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. 15.06.22

подпись, дата

Ан.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Зав. кафедрой:

д.ф.-м.н., профессор

должность, уч. степень, уч. звание

А.В. 15.06.2022

подпись, дата

Ал.В. Скрипаль

инициалы, фамилия

Саратов 2022 г.

Введение

Последние 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. Потому возникла необходимость в определении максимально точного расстояния до объекта.

Одними из наиболее перспективных направлений являются методы оптической интерферометрии с изменением длины волны, основанных на регистрации фазы отраженного лазерного излучения. Значительным параметром для проведения измерений расстояния, а также характеристик движения внешнего отражателя с использованием лазерной автодинной системы служит уровень внешней оптической обратной связи.

В автодинной системе режим автодинного сигнала, при котором он будет аналогичен интерференционному, возможен только при низких уровнях обратной связи; в противном случае будет происходить искажение формы автодинного сигнала. Уровень внешней оптической обратной связи существенно влияет на форму автодинного сигнала полупроводникового лазерного диода и, как следствие, на точность определения расстояния и параметров движения внешнего отражателя в автодинных системах.

Все вышеуказанные данные подтверждают *актуальность исследований методов определения расстояния по полученному автодинному сигналу полупроводникового лазера.*

В связи с актуальностью поисков наиболее подходящего метода определение особо малых расстояний *целью работы является апробация метода определения расстояния по автодинному сигналу полупроводникового лазера при гармонической модуляции длины волны излучения.*

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие *задачи:*

1. Проанализировать состояние современной литературы, посвящённой исследованиям в области использования автодинной интерферометрии расстояния при модуляции длины волны полупроводникового лазера;

2. Разработать математическую модель для описания поведения автодинного сигнала полупроводникового лазера;

3. Провести апробацию данного метода, обработать полученные экспериментальным путём данные.

Новизна работы: проведена апробация нового метода определения расстояния по автодинному сигналу полупроводникового лазера при гармонической модуляции длины волны излучения.

1. Математическая модель, описывающая поведение интерференционного сигнала

1.1. Автодинный сигнал в режиме стационарной генерации излучения полупроводникового лазера

Стационарные решения системы дифференциальных уравнений (1,11,12) для амплитуды электрического поля $E(t) = \tilde{E}$, фазы колебаний поля $\Phi(t) = (\omega - \omega_0) \cdot t$ и концентрации носителей $N(t) = \tilde{N}$, где переменные $\tilde{E}$, ω , $\tilde{N}$ — не зависят от времени, находятся из алгебраической системы:

$$0 = \frac{1}{2} \cdot G_N \cdot \Delta \tilde{N} \cdot \tilde{E} + z \cdot \tilde{E} \cdot \cos(\omega \tau), \quad (1)$$

$$\omega - \omega_0 = \frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot G_N \cdot \Delta \tilde{N} - z \cdot \sin(\omega \tau), \quad (2)$$

$$0 = J - \frac{\tilde{N}}{\tau_s} - G(\tilde{N}) \cdot (\tilde{E})^2. \quad (3)$$

Преобразуя соотношение (2) к виду:

$$\frac{1}{2} \cdot G_N \cdot \Delta \tilde{N} = -z \cdot \cos(\omega \tau) \quad (4)$$

и подставляя его в (1), имеем:

$$\omega - \omega_0 = -\alpha \cdot z \cdot \cos(\omega \tau) - z \cdot \sin(\omega \tau). \quad (5)$$

Применяя к соотношению (1) формулу сложения гармонических функций

$$a \cdot \sin A + b \cdot \cos A = \sqrt{a^2 + b^2} \cdot \sin\left(A + \arctg \frac{b}{a}\right), \quad (6)$$

получаем:

$$\omega_0 = \omega + z \cdot \sqrt{1 + \alpha^2} \cdot \sin(\omega \tau + \arctg \alpha). \quad (7)$$

Фазовое уравнение (7) может иметь множество решений, соответствующих множеству мод внешнего резонатора. Однако генерация полупроводникового лазера происходит на одной моде с наименьшим порогом усиления или с наименьшей шириной линии генерации.

Малосигнальный анализ скоростных уравнений показал, что при малых уровнях обратной связи наблюдается сокращение ширины линии излучения лазера по сравнению с уединенным лазером. В этом случае генерируемую моду полупроводникового лазера можно определять из набора частот, полученного при решении фазового уравнения, исходя из условия минимальной ширины линии генерации.

Записав уравнения (1) и (2) в явном виде для концентрации $\tilde{N}$ и поля $\tilde{E}$

$$\Delta\tilde{N} = -2 \frac{z}{G_N} \cdot \cos(\omega\tau); \quad (8)$$

$$(\tilde{E})^2 = \frac{1}{G(\tilde{N})} \cdot (J - \tilde{N}/\tau_s). \quad (9)$$

Функция (9) связывает мощность излучения $(\tilde{E})^2$ с концентрацией $\tilde{N}$, которая, в свою очередь, связана соотношением (8) с фазовым набегом $\omega\tau$, являющимся решением фазового уравнения (7).

Изменение концентрации $\Delta\tilde{N}(\omega)$ происходит на интервале значений $N_{th} - \Delta\tilde{N}_{\max} < \tilde{N} < N_{th} + \Delta\tilde{N}_{\max}$ и достигает своего максимального по модулю значения

$$\Delta\tilde{N}_{\max} = 2 \frac{z}{G_N} \quad (10)$$

при $\cos(\omega\tau) = \pm 1$.

Такое относительно небольшое изменение концентрации $\tilde{N}$ при любых изменениях фазового набеге $\omega\tau$ позволяет функцию мощности автодинного сигнала $\tilde{P}(\tilde{N}) = (\tilde{E})^2$ приближенно считать линейной по концентрации:

$$\tilde{P}(\tilde{N}) \approx \tilde{P}(N_{th}) + \left. \frac{d\tilde{P}}{d\tilde{N}} \right|_{N_{th}} \cdot \Delta\tilde{N}. \quad (11)$$

Производя вычисления функций мощности и ее производной на пороге генерации и используя выражение для концентрации (10), соотношение для линеаризованной мощности можно записать в виде

$$\tilde{P} = P_1 + P_2 \cdot \cos(\omega\tau), \quad (12)$$

где

$$P_1 = (J - N_{th}/\tau_s)/(G_N(N_{th} - N_0)), \quad (13)$$

$$P_2 = 2z \cdot (J\tau_s - N_0)/(G_N^2 \tau_s (N_{th} - N_0)^2). \quad (14)$$

Таким образом, на основе системы дифференциальных уравнений для модели полупроводникового лазера с внешним отражателем в стационарном приближении получена связь мощности автодинного сигнала $\tilde{P}$ с фазовым набегом $\omega\tau$.

1.2. Формирование автодинного сигнала при движении внешнего отражателя

Переменная нормированная составляющая автодинного сигнала при движении внешнего отражателя записывается в виде:

$$P = \cos(\omega(t) \cdot \tau(t)), \quad (15)$$

где $\tau(t)$ — время обхода лазерным излучением расстояния L до внешнего отражателя, изменяющееся при изменении расстояния до отражателя, $\omega(t)$ — частота излучения полупроводникового лазера.

Представим частотное уравнение в виде фазового

$$\omega_0\tau = \omega\tau + C \cdot \sin(\omega\tau + \psi). \quad (16)$$

В случае движения объекта по гармоническому закону время обхода лазерным излучением внешнего резонатора изменяется по закону:

$$\tau(t) = \tau_0 + \tau_a \cdot \sin(\Omega t + \varepsilon). \quad (17)$$

Представляя соотношение (17) в виде фазового, можно записать

$$\omega(t) \cdot \tau(t) = \omega_0 \cdot \tau(t) = \omega_0 \cdot \tau_0 + \omega_0 \tau_a \cdot \sin(\Omega t + \varepsilon). \quad (18)$$

Соотношение (18) для нормированной переменной составляющей автодинного сигнала запишется в виде

$$P(t) = \cos(\theta + f(t)), \quad (19)$$

где $\theta = \omega_0 \cdot \tau_0$ – стационарный набег фазы, $f(t) = \sigma \sin(\omega t + \varepsilon)$ – функция, характеризующая продольные движения объекта.

Нетрудно заметить, что при малом уровне обратной связи $C \ll 1$ нормированная составляющая автодинного сигнала совпадает с нормированной составляющей интерференционного сигнала с развязкой от источника излучения.

1.3. Автодинное детектирование при изменении длины волны излучения полупроводникового лазера

В автодинной системе в режиме стационарной генерации, когда изменения в системе происходят за времена, значительно превышающие период колебаний электромагнитного излучения, мощность излучения полупроводникового лазера может быть определена в результате использования малосигнального анализа скоростных уравнений (для комплексного электрического поля с запаздывающим аргументом и концентрации носителей заряда) в виде зависимости от тока накачки (амплитудная составляющая) и фазового набег (фазовая составляющая):

$$P(j(t)) = P_1(j(t)) + P_2(j(t)) \cos(\omega(j(t)) \tau), \quad (20)$$

где $\omega \tau$ – фазовый набег в системе с внешним отражателем, τ – время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя, $\omega(j(t))$ – частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от тока накачки j и уровня обратной связи.

В предположении слабой обратной связи зависимость частоты излучения полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью от частоты уединенного лазера носит линейный характер. При использовании токовой модуляции частоты излучения полупроводникового лазера с частотой модуляции Ω тока питания лазерного диода частота излучения полупроводникового лазера в автодинном режиме определится соотношением:

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \omega_A \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad (21)$$

где ω_0 – частота излучения полупроводникового уединенного лазерного диода; ω_A – амплитуда (глубина) модуляции частоты излучения полупроводникового лазерного диода; Ω – частота модуляции тока питания лазерного диода.

При использовании токовой модуляции частоты излучения полупроводникового лазера будут также изменяться амплитудные составляющие излучения полупроводникового лазера:

$$P_1(j(t)) = I_1 \sin(\Omega t + \varepsilon), P_2(j(t)) = I_2 \sin(\Omega t + \varepsilon). \quad (22)$$

С учетом соотношений для амплитудной и фазовой компонент при изменении тока питания лазера соотношение для мощности излучения полупроводникового лазера переписется в виде

$$P_1(j(t)) = I_1 \sin(\Omega t + \varepsilon) + I_2 \sin(\Omega t + \varepsilon) \cos(\omega_0 \tau + \omega_A \tau \sin(\Omega t + \varepsilon)). \quad (23)$$

2. Результаты апробации определения измерения расстояний по полученному автодинному сигналу

Составляющая автодинного сигнала в используемой модели записывается в виде:

$$P(j(t)) = P1(j(t)) + P2 \cos(\omega(j(t))\tau_0(t))$$

$P1(j(t))$ — составляющая мощности, не зависящая от расстояния до внешнего отражателя; $P2$ — амплитудная составляющая мощности, зависящей от фазового набег волны $\omega(j(t))\tau_0(t)$ в системе с внешним отражателем; τ_0 — время обхода лазерным излучением расстояния до внешнего отражателя; $\omega(j(t))$ — частота излучения полупроводникового лазера, зависящая от плотности тока накачки $j(t)$ и уровня обратной связи.

Компьютерное моделирование проводилось в программном пакете *Mathcad* при следующих параметрах: длина волны излучения лазерного диода $\lambda=650\text{нм}$, заданное моделью расстояние 8.2см , частота модуляции 100Гц , при значении девиации длины волны излучения лазерного диода 0.04нм (рис. 1, рис. 2).

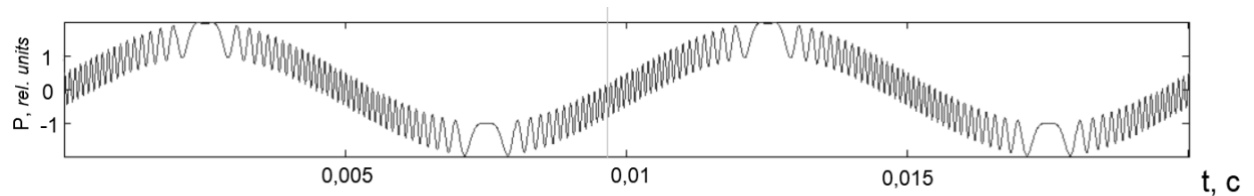


Рисунок 1. Вид смоделированной компьютерными средствами функции $P(j(t))$

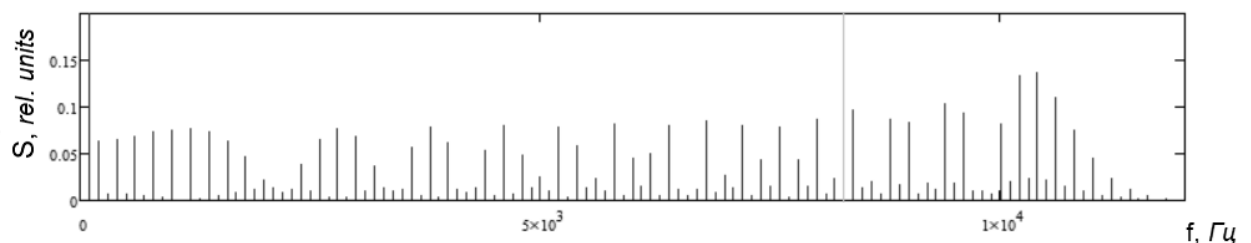


Рисунок 2. Спектр смоделированного теоретического автодинного сигнала

На рис. 3 представлена блок-схема экспериментальной установки.

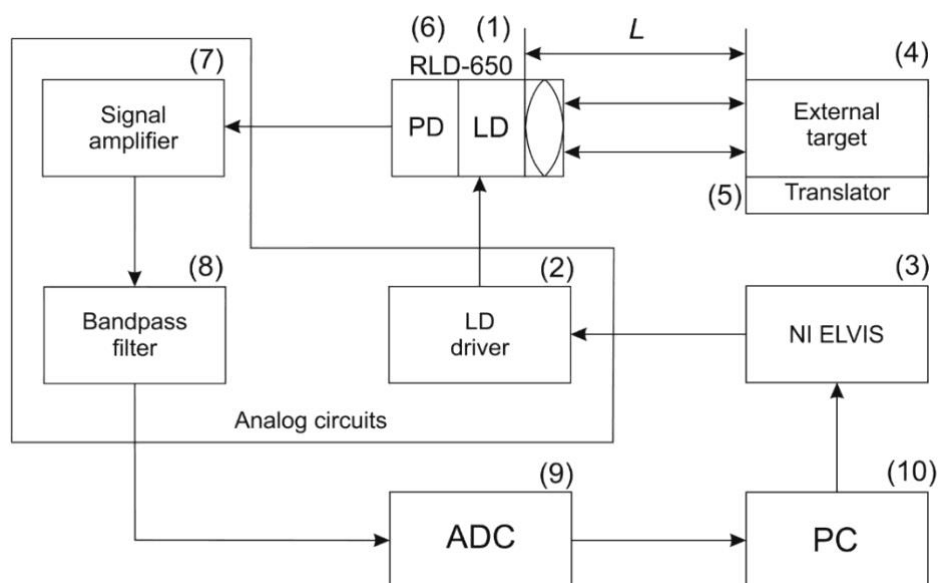


Рисунок 3. Блок-схема экспериментально-измерительной установки: 1 – полупроводниковый лазер, 2 – блок управления током питания, 3 – генератор сигналов на базе платформы NI ELVIS, 4 – объект, 5 – стенд для закрепления объекта, 6 – фотоприемник, 7 – фильтр переменного сигнала, 8 – пропускающий фильтр, 9 – АЦП, 10 – компьютер

В ходе эксперимента был получен следующий автодинный сигнал (рис.4) и его спектр (рис.5):

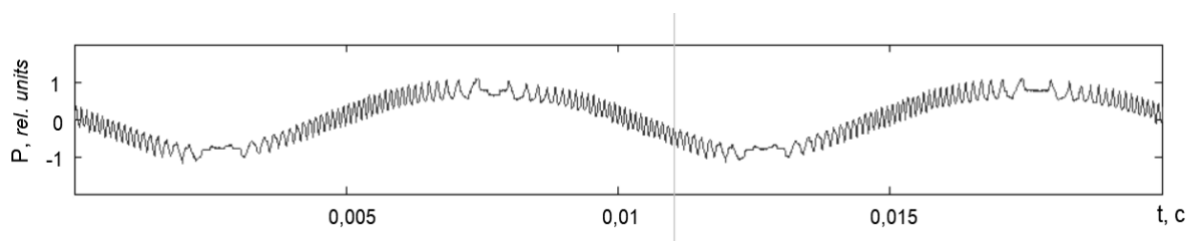


Рисунок 4. Экспериментально полученный автодинный сигнал

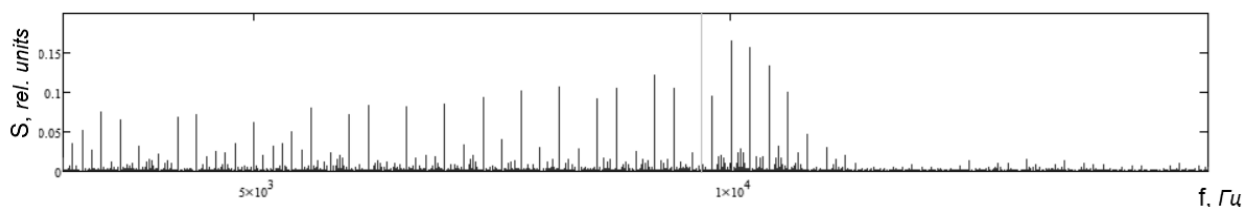


Рисунок 5. Спектр экспериментально полученного автодинного сигнала

Получив экспериментальные данные, из теоретической модели определяем девиацию длины волны $\Delta\lambda$ по формуле и подставляем ее в данное выражение:

$$L = \frac{\lambda_0 * (\Delta\lambda + \lambda_0)}{4\pi\Delta\lambda} \cdot n \quad (24)$$

где n – отношение последней гармоники к первой, λ_0 – изначальная длина волны автодина (равная 650 нм), $\Delta\lambda$ – величина девиации частоты излучения.

Путем построения похожего спектра находим локальный максимум с помощью инструментов трассировки ПО MathCad (рис.6). Теория показывает, что максимальная гармоника, с которой производится расчет, находится в области между локальным максимумом и концом спектра.

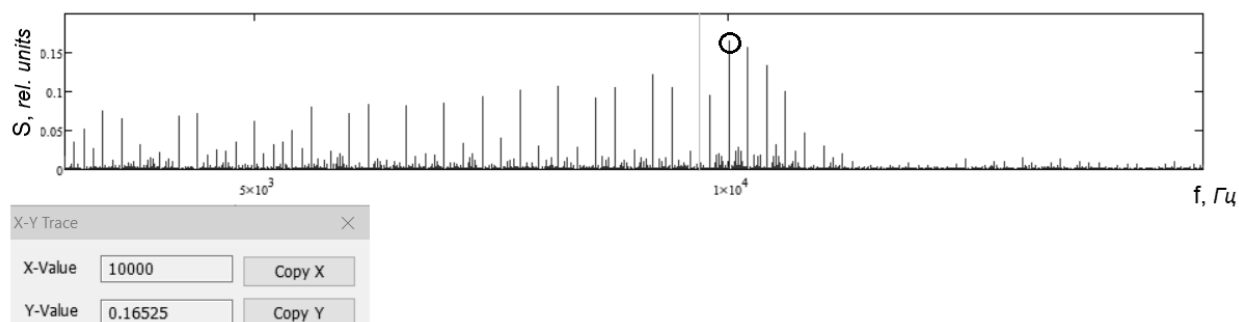


Рисунок 6. Нахождение локального максимума спектра экспериментально полученного автодинного сигнала

Подставляем частоту локального максимума в формулу (24), и находим расстояние L до объекта (табл.1).

Таблица 1.

номер измерения	измеренное расстояние, мм
1	82.9722
2	82.9845
3	82.9581
4	82.9999

5	82.9866
6	82.9812

Среднее квадратичное отклонение составило $\sigma = 0,014146861$ мм.

Как видно из таблицы, средний разброс по шести измерениям составил ~50мкм, а среднее значение абсолютного расстояния ~82,98мм.

Заключение

Подводя итоги данной дипломной работы, можно сказать, что поставленная цель, а именно – *апробация метода определения расстояния по автодинному сигналу полупроводникового лазера при гармонической модуляции длины волны излучения* – была достигнута, в результате решения следующих задач:

1. Было проанализировано состояние современной литературы, посвящённой исследованиям в области использования автодинной интерферометрии расстояния при модуляции длины волны полупроводникового лазера;
2. Была разработана математическая модель для описания поведения автодинного сигнала полупроводникового лазера;
3. Была проведена апробация данного метода, и обработаны полученные экспериментальным путём данные.

В ходе выполнения бакалаврской работы установлено, что разработанный метод расчета абсолютного расстояния позволяет добиться достаточно высокой точности измерений. Полученные результаты хорошо согласуются с теоретическими расчетами и позволяют довольно точно определять абсолютное расстояние.

Список использованной литературы

1. Принципы лазеров. О.Звелто. Пер. с англ.— 3-е перераб. и доп. изд. — М.: Мир, 1990. — 560 с.
2. Cingolani R., Stolz W., Ploog K. Electronic states and optical transitions in modulation-doped n-type GaInAs/AlInAs multiple quantum wells / R.Cingolani, W.Stolz, K.Ploog // Phys.Rev. – 1989. – № 40. – P. 2950-2955.
3. М. Пилкун. Инжекционные лазеры. Успехи физических наук. Том 98. Выпуск 2. 1969 год.
4. Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов — Саратов: Изд-во Саратовского университета, 2003. 312 с.
5. 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.
6. Усанов, Д.А. Автодинная интерферометрия расстояния с помощью полупроводникового лазера при токовой модуляции длины волны излучения / Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.И. Астахов, И.С. Костюченко, С.Ю. Добдин // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, № 1. – С. 54-59
7. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С. Ю., Астахов Е. И., Костюченко И. Ю., Джафаров А. В.. Методы автодинной интерферометрии расстояния при токовой частотной модуляции полупроводникового лазера. Изв. Сарат. ун-та. Нов.сер. Сер. Физика. 2018. Т. 18, вып. 3. 2018 год.
8. 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.
9. Usanov DA, Skripal AV. Measurement of micro-and nanovibrations and displacements using semiconductor laser autodynes. QuantumElectronics 2011; 41(1): 86-94.

10. Usanov DA, Skripal AV, Astakhov EI, Dobdin SU. Selfmixing interferometry of distance at wavelength modulation of semiconductor [In Russian]. Izvestiya of Saratov University. New series. Series: Physics 2015; 15(3): 12- 18.
11. Bosch Th., Servagent N., Donati S. Optical feedback interferometry for sensing application // Opt. Eng. 2001. 40, N 1. P. 20.
12. 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.
13. Plantier G., Servagent N., Sourice A., Bosch Th. Real-time parametric estimation of velocity using optical feedback interferometry // IEEE Trans. Instrum. and Meas. 2001. 50, N 4. P. 915.
14. Соболев В. С., Уткин Е. Н., Щербаченко А. М. и др. Активная лазерная интерферометрия: состояние и перспективы // Автометрия. 2004. 40, № 6. С. 4.
15. 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.
16. 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.
17. Economou G., Youngquist R. G., Davies D. E. N. Limitations and noise in interferometric systems using frequency ramped single-mode diode lasers // Journ. Lightwave Technol. 1986. LT-4, N11. P. 1601.
18. Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Измерение микро- и нановибраций и перемещений с использованием полупроводниковых лазерных автодинов // Квант. Электроника. 2011. 41 (1). С. 86–94.
19. Берштейн И. Л. Об измерении весьма малых изменений разности двух световых колебаний // ДАН. 1954. Т.94, №4. С. 655–658.
20. Астахов Е.И., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С.Ю. Автодинная интерферометрия расстояния при модуляции длины волны

20. Астахов Е.И., Усанов Д. А., Скрипаль А. В., Добдин С.Ю. Автодинная интерферометрия расстояния при модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера//Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Физика № 3 / том 15 / 2015 С.12–15.
21. Усанов Д. А., Скрипаль А. В. Измерение нанометровых вибраций полупроводниковым лазером на квантоворазмерных структурах, работающим в автодинном режиме// Письма в ЖТФ. 2003. № 9. С.51–57.
22. Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Кащавцев Е.О., Калинин М.Ю. Измерение амплитуды нановибраций с помощью полупроводникового лазерного автодина с учетом влияния обратной связи // Письма в ЖТФ. 2012. Том 38, № 12. С. 81-86.
23. Вагарин В.А., Скрипаль А.В., Усанов Д.А. Об ограничениях в применении спектрального метода определения амплитуды вибраций //Автометрия. 1994. № 1. С.89-90
24. Amann M. C., Bosch T., Lescure M., Myllyla R., and Rioux M. Laser ranging: a critical review of usual technique for distance measurement // Opt. Eng. 2001. Vol. 40, № 1. P. 10–19.
25. Kobayashi S., Yamamoto Yo., Ito M., Kimura T. Direct frequency modulation in AlGaAs semiconductor lasers // IEEE Journ. Quant. Electron.1982. QE-18, N 4. P. 582.

