

09

## **Автодинная интерферометрия для определения расстояния при модуляции длины волны лазерного излучения**

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.И. Астахов,  
С.Ю. Добдин

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского  
E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru, elisey.astakhov@gmail.com

Поступило в Редакцию 10 марта 2016 г.

Приводятся результаты решения обратной задачи по определению расстояния до отражателя при токовой модуляции длины волны лазерного излучения. Показано, что токовая модуляция амплитуды автодинного сигнала позволяет свести обратную задачу по определению расстояния до отражателя к случаю, характерному только для фазовой модуляции. Предлагаемый метод позволяет повысить точность определения расстояния до отражателя по сравнению с методом прямого анализа автодинного сигнала.

Автодинная интерферометрия как метод определения расстояния до отражателя представляется перспективной, поскольку открывает возможности создания малогабаритных и простых в эксплуатации измерительных систем [1]. 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 [2,3].

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 [4–6].

В работах [7–9] для определения расстояния до отражателя используется эффект изменения длины волны излучения лазерного диода при изменении инжекционного тока лазера по линейному закону. При

работе такого интерферометра отраженный объектом свет приходит в лазер с некоторой задержкой по времени, обусловленной конечным значением скорости света. Основным недостатком такой схемы измерений, как отмечают авторы работы [7], является пилообразная помеха, обусловленная периодическим скачкообразным изменением мощности лазера.

Дальнейшее совершенствование измерительной схемы [6] позволило использовать гармоническую модуляцию длины волны излучения посредством частотной модуляции тока накачки лазерного диода для определения расстояния до объекта по отношению спектральных составляющих автодинного сигнала полупроводникового лазера. При реализации этой методики авторы работы [6] столкнулись с необходимостью учитывать вклад модуляционной составляющей тока питания лазера как в амплитуду продектированного сигнала, так и в его фазу. Поскольку модуляция амплитуды и фазы автодинного сигнала имеют разные частоты [6], то это открывает возможность исключить из измеряемого отношения спектральных составляющих автодинного сигнала необходимость учета амплитудной модуляции, сохранив в них сигналы, обусловленные модуляцией фазы.

Задача данной работы заключалась в обосновании метода решения обратной задачи, а именно: определения расстояния до отражателя при токовой модуляции длины волны лазерного излучения по измеренным амплитудам спектральных составляющих автодинного сигнала. Кроме того, задача состояла в том, чтобы показать, что фильтрация на частоте токовой модуляции позволяет свести эту задачу к известной, характерной только для случая фазовой модуляции автодинного сигнала.

Полупроводниковый лазер с внешней оптической обратной связью можно описать в рамках модели составного резонатора Лэнга и Коба-яши [10]. Динамику одномодового лазерного излучения в такой модели можно описать уравнениями для комплексного электрического поля с запаздывающим аргументом и концентрации носителей заряда [11,12]. В [1] показана возможность представления автодинного сигнала в режиме стационарной генерации излучения полупроводникового лазера, позволившая перейти от системы дифференциальных уравнений на основе использования малосигнального анализа к нелинейному уравнению для мощности излучения полупроводникового лазерного автодина.

При воздействии отраженного излучения от объекта на лазерный диод излучаемая им мощность может быть определена в результате

использования малосигнального анализа дифференциальных уравнений для комплексного электрического поля с запаздывающим аргументом и концентрации носителей заряда и записана в виде [9]:

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

где  $P_1(j(t))$  — составляющая мощности, не зависящая от расстояния до внешнего отражателя;  $P_2$  — амплитудная составляющая мощности, зависящей от фазового набега волны  $\omega(j(t))\tau_0(t)$  в системе с внешним отражателем;  $\tau_0$  — 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.

При модуляции длины волны излучения полупроводникового лазера частота и амплитудная составляющая мощности излучения лазера определяются соотношениями

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \omega_A \sin(2\pi\nu_1 t + \varphi), \quad P_1(j(t)) = I_1 \sin(2\pi\nu_1 t + \varphi),$$

где  $\omega_0$  — собственная частота излучения полупроводникового лазерного диода,  $\omega_A$  — девиация частоты излучения полупроводникового лазерного диода,  $\nu_1$  — частота модуляции тока питания лазерного диода,  $\varphi$  — начальная фаза,  $I_1$  — амплитуда токовой модуляции составляющей  $P_1(j(t))$ .

Для описания низкочастотного спектра автодинного сигнала при гармонической модуляции длины волны излучения лазерного диода мощность автодинного сигнала может быть представлена в соответствии с [7] в виде разложения в ряд по функциям Бесселя первого рода  $J_n$ :

$$\begin{aligned} P(t) &= I_1 \sin(\Omega t + \varphi) + P_2 \cos(\theta) J_0(\sigma) \\ &+ 2P_2 \cos(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n}(\sigma) \cos(2n(\Omega t + \varphi)) \\ &- 2P_2 \sin(\theta) \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n-1}(\sigma) \sin((2n-1)(\Omega t + \varphi)), \end{aligned}$$

где  $\theta = \omega_0\tau_0$ ,  $\sigma = \omega_A\tau_0$ ,  $\Omega = 2\pi\nu_1$ . Представляя автодинный сигнал в виде ряда Фурье с коэффициентами разложения  $a_n$  и  $b_n$

$$P(t) = 1/2a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{2n} \cos(2n\Omega t) - b_{2n} \sin(2n\Omega t)) + \sum_{n=1}^{\infty} (a_{2n-1} \cos((2n-1)\Omega t) - b_{2n-1} \sin((2n-1)\Omega t)),$$

коэффициенты  $C_n$ , равные по модулю четным и нечетным спектральным составляющим разложения в ряд Фурье

$$C_{2n} = \sqrt{a_{2n}^2 + b_{2n}^2}, \quad C_{2n-1} = \sqrt{a_{2n-1}^2 + b_{2n-1}^2},$$

можно записать в виде

$$C_1 = I_1 - P_2 J_1(\sigma) \sin(\theta), \tag{2}$$

$$\text{для четных } n: C_{2n} = \cos(\theta) P_2 J_{2n}(\sigma), \tag{3}$$

$$\text{для нечетных } n: C_{2n+1} = \sin(\theta) P_2 J_{2n+1}(\sigma). \tag{4}$$

Соотношения (2)–(4) характеризуют связь спектральных составляющих частотно-модулированного автодинного сигнала с функциями Бесселя первого рода.

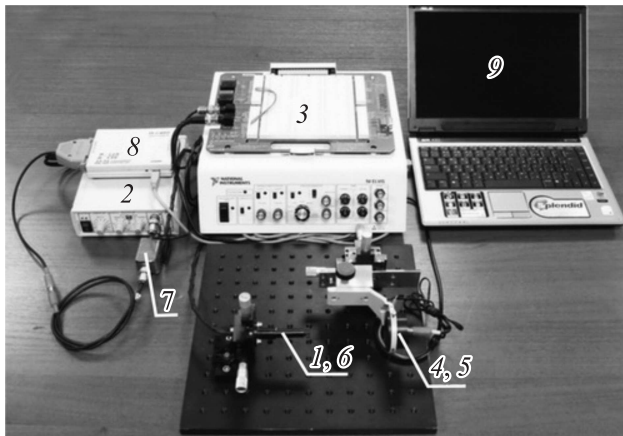
Для определения расстояния до объекта  $L$ , входящего в параметр  $\sigma$ , используем известные отношения  $2n$  и  $2n + 2$  спектральных гармоник и отношение  $2n + 1$  и  $2n + 3$  спектральных гармоник:

$$C_{2n}/C_{2n+2} = (J_{2n}(\sigma))/(J_{2n+2}(\sigma)), \tag{5}$$

$$C_{2n+1}/C_{2n+3} = (J_{2n+1}(\sigma))/(J_{2n+3}(\sigma)). \tag{6}$$

Решение полученных уравнений (5) и (6) относительно неизвестного параметра  $\sigma = \omega_A\tau_0$  требует знания параметров токовой модуляции лазерного автодина, в частности девиации частоты излучения лазерного диода  $\omega_A$ . Принимая во внимание, что  $\tau_0 = 2L/c$ , получаем соотношение для определения расстояния до объекта

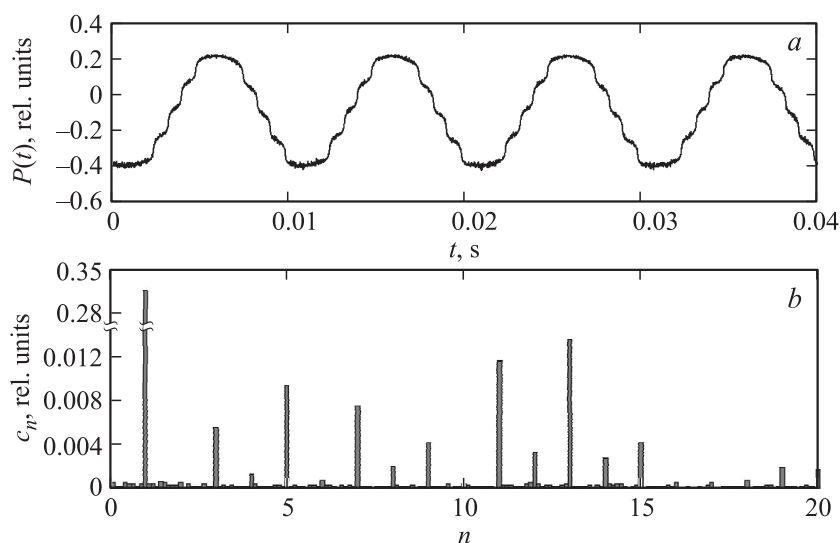
$$L = \frac{c}{2} \frac{\sigma}{\omega_A}. \tag{7}$$



**Рис. 1.** 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.

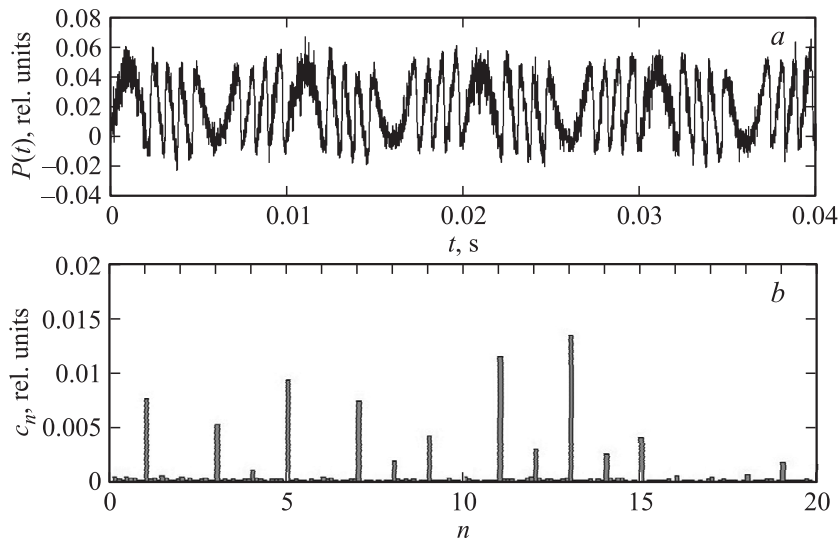
Задачу нахождения изменения мощности автодинного сигнала  $P(t)$  при известном расстоянии до отражателя  $L$  можно назвать прямой задачей, а нахождения  $L$  с использованием рассчитанного и измеренного  $P(t)$  называется обратной. Для решения обратной задачи по определению расстояния до отражателя при токовой модуляции длины волны лазерного излучения по амплитудам спектральных составляющих  $C_{2n}$ ,  $C_{2n+2}$ ,  $C_{2n+1}$  и  $C_{2n+3}$  автодинного сигнала, используя уравнения (5) и (6), рассчитывается значение параметра  $\sigma$ . При измеренной величине девиации частоты излучения лазерного диода  $\omega_A$  из соотношения (7) определяется расстояние до отражателя  $L$ .

В состав установки, представленной на рис. 1, входили частотно-модулированный полупроводниковый лазерный автодин на лазерном диоде RLD-650(5) на квантово-размерных структурах с дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с длиной волны 654 nm 1, излучение которого направлялось на объект 4, закрепленный на пьезокерамике 5, колебания которой возбуждались генератором звуковых колебаний, при этом диаметр пятна лазерного



**Рис. 2.** Частотно-модулированный автодинный сигнал (а), полученный на экспериментальной установке при девиации частоты излучения лазерного диода  $\omega_A = 100 \cdot 10^8$  rad/s, и его спектр (b), где  $n$  — номер гармоники.

излучения на поверхности объекта составлял 1 mm. Модуляция длины волны излучения проводилась на частоте  $\nu_1 = 200$  Hz посредством модуляции тока питания лазера с помощью 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. Отраженное излучение направлялось в резонатор лазера, изменение мощности которого фиксировалось фотоприемником 6. Продетектированный и усиленный сигнал с фотоприемника проходил через фильтр переменного сигнала 7 и поступал на вход аналого-цифрового преобразователя 8 (с частотой дискретизации 100 kHz), соединенного с компьютером 9. Параметр девиации частоты излучения лазерного диода  $\omega_A$  измерялся с помощью спектрометра высокого разрешения SHR (Solar Laser Systems).



**Рис. 3.** Автодинный сигнал после высокочастотной фильтрации (*a*) и его спектр (*b*), где  $n$  — номер гармоники.

На рис. 2 приведен вид частотно-модулированного автодинного сигнала и его спектр, полученные при глубине девиации частоты излучения полупроводникового лазера  $\omega_A = 100 \cdot 10^8$  rad/s, что соответствует 0.00035% от длины волны излучения лазерного диода.

Как видно из представленных на рис. 2, *b* результатов, в спектре автодинного сигнала преобладает спектральная составляющая на частоте модуляции тока питания лазерного диода. При этом фазовая модуляция автодинного сигнала проявляется в спектре на гармониках основной частоты.

Для исключения влияния амплитудной модуляции автодинного сигнала при изменении тока накачки лазерного диода нами проведена фильтрация автодинного сигнала на частоте, модулирующей ток питания лазера. Вид автодинного сигнала и его спектр после фильтрации приведены на рис. 3.

Как видно из представленных на рис. 3, *b* результатов, в спектре автодинного сигнала на основной частоте и ее гармониках осталась

информация только о фазовой модуляции автодинного сигнала. Полученный после исключения амплитудной токовой модуляции сигнал становится идентичным сигналу при вибрациях отражателя. В связи с этим обратная задача по определению расстояния до отражателя  $L$  сводится к определению фазы автодинного отклика по полученным ранее соотношениям [13], совпадающим с (5) и (6).

Оценка погрешности определения расстояния при фильтрации автодинного сигнала проводилась при добавлении в автодинный сигнал случайной составляющей при различных относительных амплитудах: 0.1, 1 и 2%. Обратная задача решалась для разных наборов спектральных составляющих при различных фазах автодинного сигнала  $\theta$  и начальных фазах  $\varepsilon$ .

Сравнительный анализ решения обратной задачи по определению расстояния до отражателя показал, что фильтрация автодинного сигнала приводит к уменьшению погрешности в среднем в  $\sim 5$  раз по сравнению с методом прямого анализа автодинного сигнала без фильтрации, описанного в [9].

Расстояние до объекта, вычисленное по нескольким наборам спектральных составляющих автодинного сигнала после его фильтрации, представленного на рис. 3, составило  $L = 0.215$  м, а значение погрешности — 1.2%.

Таким образом, при изменении тока накачки лазерного диода наряду с изменением фазы автодинного сигнала будет также изменяться мощность лазерного излучения, что приводит к дополнительной амплитудной модуляции автодинного сигнала. При исключении, за счет фильтрации, из измеряемого отношения спектральных составляющих автодинного сигнала амплитудной модуляции, но сохранении в этих отношениях модуляции фазы, формируемый сигнал будет иметь вид, аналогичный сигналу, полученному при гармонических вибрациях отражателя. Использование в этом случае известных выражений для отношения спектральных составляющих при модуляции фазы автодинного сигнала и фильтрации позволяет уменьшить погрешность при решении обратной задачи по определению расстояния до отражателя по сравнению со случаем, когда анализируется сигнал, включающий и амплитудную и фазовую модуляции.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (государственное задание № 1376 и 1575).



**Список литературы**

- [1] Усанов Д.А., Скрипаль А.В. Полупроводниковые лазерные автодины для измерения параметров движения при микро- и наносмещениях, / Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2014. 136 с.
- [2] Гершензон Е.М., Туманов Б.Н., Левит Б.И. // Изв. вузов. Радиофизика. 1980. Т. 23. № 5. С. 535–541.
- [3] Малыкин Г.Б., Носков В.Я., Смольский С.М. // Радиотехника. 2012. № 6. С. 20–24.
- [4] Atann M.C., Bosch T., Lescure M. et al. // Opt. Eng. 2001. V. 40. N 1. P. 10–19.
- [5] Giuliani G., Norgia M., Donati S., Bosch T. // J. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2002. V. 4. N 6. P. 283–294.
- [6] Астахов Е.И., Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Добдин С.Ю. // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Физика. 2015. Т. 15. № 3. С. 12–18.
- [7] Соболев В.С., Кащеева Г.А. // Автометрия. 2008. Т. 44. № 6. С. 49–65.
- [8] Unlocking dynamical diversity: Optical feedback effects on semiconductor lasers / Ed. by Deborah M. Kane and K. Alan Shore. John Wiley & Sons Ltd, The Atrium. 2005. 333 p.
- [9] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С. // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. В. 21. С. 72–77.
- [10] Lang R., Kobayashi K. // IEEE J. Quantum Electron. 1980. V. QE-16. N 3. P. 347–355.
- [11] Olesen H., Osmundsen J.H., Tromborg B. // IEEE J. Quantum Electron. 1986. V. QE-22. N 6. P. 762–773.
- [12] Schunk N., Petermann K. // IEEE J. Quantum Electron. 1988. V. 24. N 7. P. 1242–1247.
- [13] Усанов Д.А., Скрипаль А.В. // Квант. электроника. 2011. Т. 41. № 1. С. 86–94.