

01;07

Определение расстояния до объекта с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, К.С. Авдеев

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского
E-mail: UsanovDA@info.sgu.ru

Поступило в Редакцию 25 января 2007 г.

Приведены результаты теоретического обоснования метода определения расстояния до объекта с использованием полупроводникового лазерного диода, работающего в автодинном режиме, с дополнительной модуляцией частоты излучения. Показано, что по отношению гармоник низкочастотного спектра автодинного сигнала при токовой модуляции можно определить расстояние до объекта с точностью в 1%.

PACS: 42.62.-b, 42.55.Px

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. Представляет интерес рассмотреть возможность использования полупроводникового лазера, работающего в автодинном режиме, для определения расстояния до покоящегося объекта.

В работах [1–4] была показана связь набега фазы излучения полупроводникового лазера с расстоянием до объекта. Для определения расстояния до объекта (в пределах изменения набега фазы, равного π) могут быть использованы разработанные ранее методики спектрального анализа автодинного сигнала полупроводникового лазера [5]. В частности, это возможно в случае, если известны какое-либо расстояние, на которое перемещается объект, или характеристики специально возбуждаемых вибраций объекта.

То есть для определения расстояния до объекта по указанным выше методикам необходимо либо перемещать объект на измеренное независимым методом с высокой точностью расстояние, либо

специально приводить объект в состояние вибраций. Например, при измерении нанометровых перемещений для определения набега фазы, характерного для покоящегося объекта, авторами [6] предлагалось использовать метод наложения на объект дополнительных колебаний с известными характеристиками. Однако на практике реализовать колебательное движение объекта, расстояние до которого необходимо определить, не всегда представляется удобным и возможным. Поэтому представляет интерес рассмотреть возможность замены необходимой для определения расстояния до объекта по набегу фазы вибрации отражателя с известными характеристиками периодической модуляцией длины волны излучения полупроводникового лазера, которая, в свою очередь, может быть достигнута токовой модуляцией лазера.

В связи с этим целью настоящей работы явилась разработка методики определения расстояния до объекта с использованием полупроводникового лазерного диода, работающего в автодинном режиме, с дополнительной модуляцией частоты (длины волны) излучения.

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 набега (фазовая составляющая) [5]:

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

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 [7]. При использовании токовой модуляции частоты излучения полупроводникового лазера с частотой модуляции Ω тока питания лазерного диода частота излучения полупро-

водникового лазера в автодинном режиме определится соотношением:

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \omega_A \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad (2)$$

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

$$P_1(j(t)) = I_1 \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad P_2(j(t)) = I_2 \sin(\Omega t + \varepsilon). \quad (3)$$

С учетом соотношений для амплитудной (3) и фазовой (2) компонент при изменении тока питания лазера соотношение для мощности излучения полупроводникового лазера переписется в виде

$$P(t) = I_1 \sin(\Omega t + \varepsilon) + I_2 \sin(\Omega t + \varepsilon) \cos(\omega_0 \tau + \omega_A \tau \sin(\Omega t + \varepsilon)). \quad (4)$$

Обозначая за θ величину $\omega_0 \tau$, а за σ величину $\omega_A \tau$, выражение для $P(t)$ может быть представлено в виде разложения в ряд по функциям Бесселя:

$$\begin{aligned} P(t) = & (I_1 \sin(\varepsilon) + I_2 \cos(\theta) J_0(\sigma) \sin(\varepsilon) - I_2 \cos(\theta) J_2(\sigma) \sin(\varepsilon)) \cos(\Omega t) \\ & + (I_1 \cos(\varepsilon) + I_2 \cos(\theta) J_0(\sigma) \cos(\varepsilon) - I_2 \cos(\theta) J_2(\sigma) \cos(\varepsilon)) \sin(\Omega t) \\ & + (\sin(\theta) I_2) \cos(2n\Omega t) + \left(\sin(\theta) I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n+1} - J_{2n-1}) \sin(2n\varepsilon) \right) \sin(2n\Omega t) \\ & + \left(\cos(\theta) I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n} - J_{2n+2}) \sin((2n+1)\varepsilon) \right) \cos((2n+1)\Omega t) \\ & + \left(\cos(\theta) I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n} - J_{2n+2}) \cos((2n+1)\varepsilon) \right) \sin((2n+1)\Omega t), \quad (5) \end{aligned}$$

где $\theta = \omega_0 \tau$, $\sigma = \omega_A \tau$, J_n — функция Бесселя первого рода порядка n .

Используя разложение $P(t)$ в ряд Фурье

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

можно получить следующие выражения для коэффициентов:

$$a_1 = I_1 \sin(\varepsilon) + I_2 \cos(\theta) J_0(\sigma) \sin(\varepsilon) - I_2 \cos(\theta) J_2(\sigma) \sin(\varepsilon),$$

$$b_1 = I_1 \cos(\varepsilon) + I_2 \cos(\theta) J_0(\sigma) \cos(\varepsilon) - I_2 \cos(\theta) J_2(\sigma) \cos(\varepsilon),$$

$$a_{2n} = \sin(\theta) I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n-1} - J_{2n+1}) \cos(2n\varepsilon),$$

$$b_{2n} = \sin(\theta) I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n+1} - J_{2n-1}) \sin(2n\varepsilon),$$

$$a_{2n+1} = \cos(\theta) I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n} - J_{2n+2}) \sin((2n+1)\varepsilon),$$

$$b_{2n+1} = \cos(\theta) I_2 \sum_{n=1}^{\infty} (J_{2n} - J_{2n+2}) \cos((2n+1)\varepsilon).$$

Вводя коэффициенты C_1, C_2, C_3, C_4 , равные по модулю четным и нечетным спектральным составляющим сигнала и определяемые как

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

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

можно получить их значения в виде

$$C_1 = \cos(\theta) I_2 (J_0(\sigma) - J_2(\sigma)) + I_1,$$

$$C_2 = \sin(\theta) I_2 (J_1(\sigma) - J_3(\sigma)),$$

$$C_3 = \cos(\theta) I_2 (J_2(\sigma) - J_4(\sigma)),$$

$$C_4 = \sin(\theta) I_2 (J_3(\sigma) - J_5(\sigma)).$$

Для определения неизвестной величины σ можно использовать отношение четных спектральных составляющих автодинного сигнала:

$$\frac{C_2}{C_4} = \frac{J_1(\sigma) - J_3(\sigma)}{J_3(\sigma) - J_5(\sigma)}. \quad (6)$$

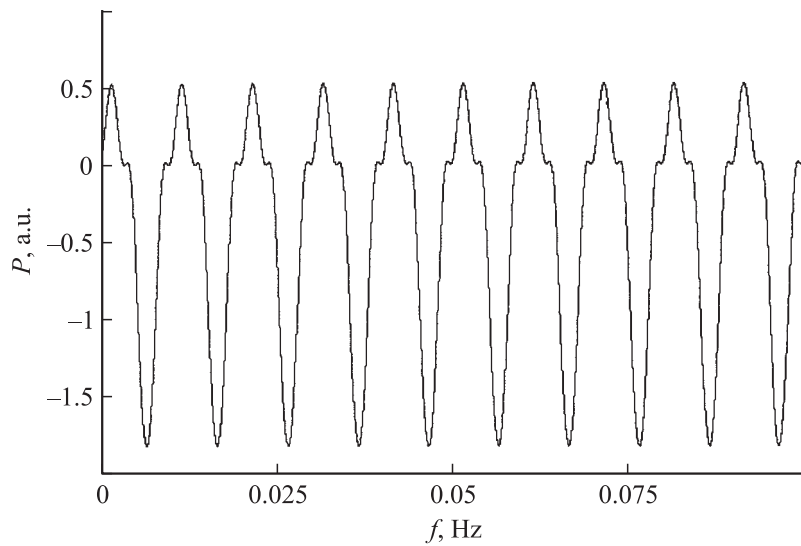


Рис. 1. Зависимость мощности излучения частотно-модулированного лазерного диода от времени.

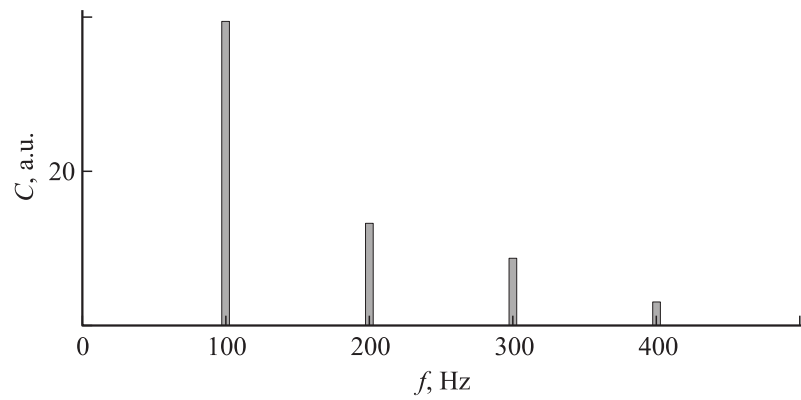


Рис. 2. Спектр автокорреляционного сигнала, приведенного на рис. 1.

Численное моделирование предложенного метода определения расстояния до объекта $l = c\tau/2$ (где c — скорость света) с помощью частотно-модулированного полупроводникового лазерного автодина проводилось при условии $I_1 = I_2 = 1$ (так как отношение C_2/C_4 не зависит от соотношений между I_1 и I_2) и следующих параметрах: длина волны лазерного излучения $\lambda = 650$ nm, глубина модуляции полупроводникового лазерного диода $\omega_A = 4.5 \cdot 10^9$. На рис. 1 приведена зависимость мощности излучения частотно-модулированного лазерного диода от времени и соответствующий спектр (рис. 2).

Как видно из рис. 2, в спектре автодинного сигнала наблюдаются четыре гармоники, амплитуды которых составляют $C_1 = 0.975$, $C_2 = 0.320$, $C_3 = 0.212$, $C_4 = 0.063$.

Решение уравнения (6) при наличии в спектре автодинного сигнала второй и четвертой спектральных составляющих позволяет определить значение неизвестной величины σ и, следовательно, расстояние до объекта l , при этом относительная погрешность определения произведения величин $\omega_A \tau$ не превосходит 1%.

Таким образом, использование частотно-модулированного излучения полупроводникового лазерного автодина позволяет с высокой точностью определять расстояние до объекта.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства образования и науки РФ и гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 05-08-17924а.

Список литературы

- [1] Donati S., Giuliani G., Merlo S. // IEEE J. Quantum Electron. 1995. V. 31. N 1. P. 113–119.
- [2] Pernick B.J. // Appl. Opt. 1973. V. 12. N 3. P. 607–610.
- [3] Sudarshanam V.S., Srinivasan K. // Opt. Lett. 1989. V. 14. N 2. P. 140–142.
- [4] Усанов Д.А., Скрипаль А.В. // Письма в ЖТФ. 2003. В. 9. С. 51–57.
- [5] Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В. Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003. 312 с.
- [6] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Камышанский А.С. // Письма в ЖТФ. 2004. В. 7. С. 77–82.
- [7] Olesen H., Osmundsen J.H., Tromborg B. // IEEE J. Quantum Electron. 1986. V. 22. P. 762–773.