

09

Измерение амплитуды нановибраций частотно-модулированным лазерным автодином

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.И. Астахов

Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского,
410012 Саратов, Россия
e-mail: usanovda@info.sgu.ru

(Поступило в Редакцию 3 апреля 2013 г.)

Предложен метод измерения амплитуды нановибраций отражателя по низкочастотному спектру автодинного сигнала частотно-модулированного лазерного автодина. Приведено теоретическое описание вида частотно-модулированного автодинного сигнала при гармонических вибрациях отражателя и представлен вывод соотношений для спектральных составляющих автодинного сигнала с использованием разложений в ряды Фурье и Бесселя. Приведено описание экспериментальной установки и результатов измерений амплитуд нановибраций и спектров автодинных сигналов при нановибрациях отражателя.

В настоящее время частотная модуляция в лазерной интерферометрии находит применение для создания высокоточных измерителей расстояний, перемещений, скоростей и вибраций в микронном диапазоне величин перемещений [1–7]. Использование отношений четных и нечетных гармоник низкочастотного спектра автодинного сигнала [7] позволяет с микронным разрешением определять расстояния от лазерного автодина до неподвижного отражателя в диапазоне до 8 см.

Как известно, для определения амплитуд микро- и нановибраций отражателя может быть использовано отношение четных и нечетных гармоник низкочастотного спектра автодинного сигнала [8–12]. Для калибровки автодинного сигнала при нановибрациях используется метод наложения дополнительных механических вибраций на отражатель [12].

Нами для измерения амплитуд нановибраций предлагается использовать частотно-модулированный лазерный автодин, чтобы избежать дополнительного механического возбуждения колебаний с микронной амплитудой в измеряемом объекте.

Целью настоящей работы явилось теоретическое и экспериментальное обоснование возможности измерения амплитуд нановибраций по низкочастотному спектру автодинного сигнала частотно-модулированного лазерного автодина.

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) и записана в виде зависимости от тока накачки (амплитудная составляющая) и фазового набега (фазовая составляющая) [12]

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

где $P_1(j(t))$ и $P_2(j(t))$ — амплитудные составляющие мощности излучения полупроводникового лазера,

$j(t)$ — плотность тока накачки, $\omega\tau$ — фазовый набег в системе с внешним отражателем, $\tau(t)$ — 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. 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_1 тока питания лазерного диода частота излучения полупроводникового лазера в автодинном режиме определится соотношением

$$\omega(j(t)) = \omega_0 + \omega_A \sin(\Omega_1 t + \varepsilon_1), \quad (2)$$

где ω_0 — частота излучения полупроводникового уединенного лазерного диода, ω_A — амплитуда отклонения частоты излучения полупроводникового лазерного диода, ε_1 — начальная фаза.

При движении отражателя по гармоническому закону время обхода лазерным излучением внешнего резонатора изменяется по закону

$$\tau(t) = \tau_0 + \tau_A \sin(\Omega_2 t + \varepsilon_2), \quad (3)$$

где τ_0 — время обхода лазерным излучением внешнего резонатора с неподвижным отражателем, $\tau_A = \frac{2\xi}{c}$ — амплитудное значение, ε_2 — начальная фаза, ξ и Ω_2 — амплитуда и частота колебаний отражателя лазерного излучения.

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

$$P_1(j(t)) = I_1 \sin(\Omega_1 t + \varepsilon_1),$$

$$P_2(j(t)) = I_2 \sin(\Omega_1 t + \varepsilon_1). \quad (4)$$

С учетом соотношений для амплитудной (4) и фазовой (2), (3) компонент при изменении тока питания лазера соотношение для мощности излучения полупроводникового лазера будет иметь вид

$$P(j(t)) = I_1 \sin(\Omega_1 t + \varepsilon_1) + I_2 \sin(\Omega_2 t + \varepsilon_2) \times \cos(\omega_0 \tau_0 + \omega_A \tau_0 \sin(\Omega_1 t + \varepsilon_1) + \omega_0 \tau_A \sin(\Omega_2 t + \varepsilon_2)). \quad (5)$$

Для получения аналитического выражения рассмотрим случай, когда частота модуляции лазерного излучения равна частоте колебаний отражателя $\Omega_1 = \Omega_2 = \Omega$ и начальные фазы в (5) равны $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$. Как будет показано ниже, эти условия легко реализуются в экспериментальной установке. Выражение (5) примет следующий вид

$$P(j(t)) = I_1 \sin(\Omega t + \varepsilon) + I_2 \sin(\Omega t + \varepsilon) \times \cos(\omega_0 \tau_0 + (\omega_A \tau_0 + \omega_0 \tau_A) \sin(\Omega t + \varepsilon)). \quad (6)$$

Обозначая за θ величину $\omega_0 \tau_0$, а за σ величину $\omega_A \tau_0 + \omega_0 \tau_A$, выражение для $P(t)$ может быть представлено в виде разложения в ряд по функциям Бесселя [7]. Используя разложение $P(t)$ в ряд Фурье, можно получить выражения для коэффициентов C_1, C_2, C_3, C_4 , равных по модулю четным и нечетным спектральным составляющим автодинного сигнала, и получить их связь с функциями Бесселя первого рода в виде

$$\begin{aligned} C_1 &= \cos(\theta) I_2 (J_0(\sigma) - J_2(\sigma)) + I_1, \\ C_2 &= \sin(\theta) I_2 (J_1(\sigma) - J_3(\sigma)), \\ C_3 &= \cos(\theta) I_2 (J_2(\sigma) - J_4(\sigma)), \\ C_4 &= \sin(\theta) I_2 (J_3(\sigma) - J_5(\sigma)). \end{aligned}$$

Для определения амплитуды нановибраций ξ , входящей в параметр σ , используем отношение второй и четвертой гармоник

$$C_2/C_4 = (J_1(\sigma) - J_3(\sigma)) / (J_3(\sigma) - J_5(\sigma)). \quad (7)$$

Решение полученного уравнения (7) относительно неизвестного параметра $\sigma = \omega_A \tau_0 + \omega_0 \tau_A$ требует знания параметров токовой модуляции лазерного автодина, в частности, амплитуды отклонения частоты ω_A . Принимая во внимание, что $\tau_A = 2\xi/c$ и $\sigma_M = \omega_A \tau_0$, получаем соотношение для определения амплитуды нановибраций

$$\xi = \frac{c}{2} \frac{\sigma - \sigma_M}{\omega_0}. \quad (8)$$

Измерения проводились на установке, схема которой представлена на рис. 1.

В состав установки входили частотно-модулированный полупроводниковый лазерный автодин на лазерном диоде RLD-650(5) на квантоворазмерных структурах с

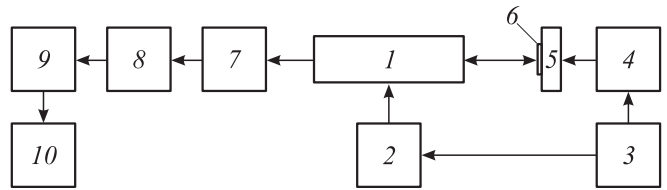


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 — полупроводниковый лазер, 2 — блок управления током питания, 3 — генератор сигналов на базе платформы NI ELVIS, 4 — усилитель сигнала, 5 — пьезокерамическая пластинка, 6 — объект, 7 — фотоприемник, 8 — фильтр переменного сигнала, 9 — АЦП, 10 — компьютер.

дифракционно-ограниченной одиночной пространственной модой с длиной волны 654 nm 1, излучение которого направлялось на объект 6, закрепленный на пьезокерамической пластинке 5, при этом диаметр пятна лазерного излучения на поверхности объекта составлял 1 mm. Модуляция длины волны излучения проводилась на частоте $\Omega = 500$ Hz посредством модуляции тока питания лазера с помощью встроенного в платформу 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. Колебания пьезокерамической пластинки осуществлялись путем подачи на усилитель сигнала 4 переменного напряжения с генератора 3. Частота и начальная фаза колебаний пьезокерамической пластинки были синхронизированы с частотой и начальной фазой модуляции длины волны лазерного излучения с помощью программного обеспечения к платформе NI ELVIS, в котором выставляются параметры генерируемых сигналов 3. При этом выполнялись условия равенства частот и фаз колебаний отражателя и модуляции лазерного излучения. Предложенная схема колебаний пьезокерамической пластинки может быть использована для определения собственных частот и соответствующих им амплитуд колебаний исследуемой структуры.

Нами было экспериментально установлено, что эффективная модуляция тока питания лазерного диода наблюдалась при амплитуде модулирующего сигнала 20 mV. Отметим, что лазерный диод запитывался по схеме с постоянным источником тока. Отраженное излучение направлялось в резонатор лазера, изменение мощности которого фиксировалось фотоприемником 6. Протектированный и усиленный сигнал с фотоприемника, поступал на вход аналого-цифрового преобразователя 8 компьютера 9.

На рис. 2, а представлен автодинный сигнал без токовой модуляции при колебаниях отражателя с амплитудой $\xi = 29$ nm. В спектре сигнала (рис. 2, в) присутствовала только первая и вторая гармоники, что не достаточно для измерения амплитуды вибрации без калибровки автодинного сигнала.

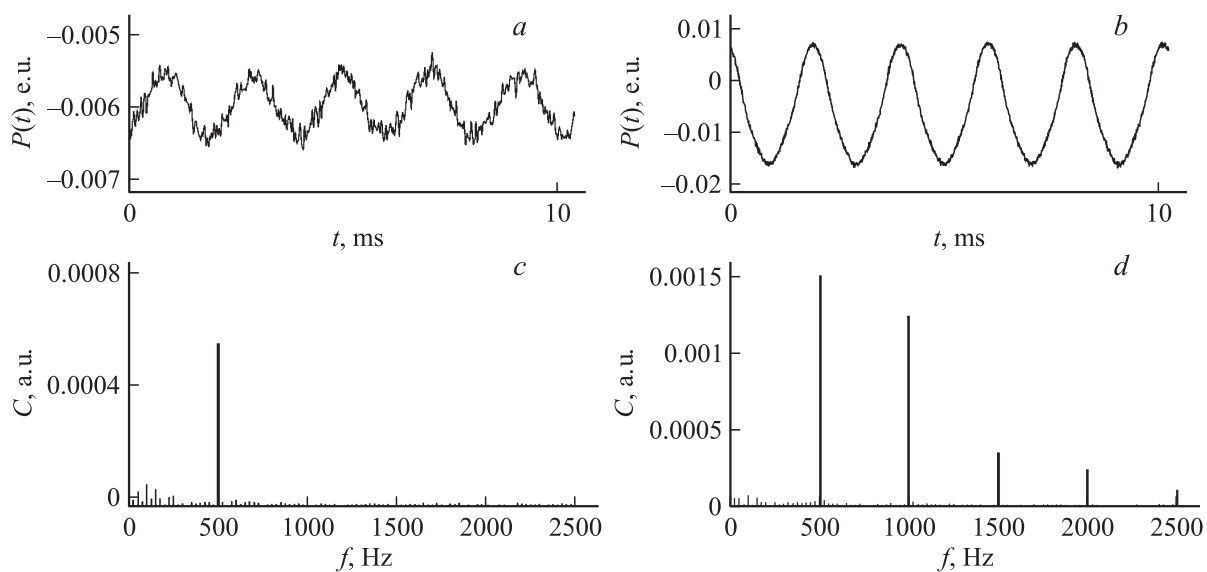


Рис. 2. Экспериментальный автодинный сигнал и его спектр: *a* — автодинный сигнал при колебаниях отражателя с амплитудой $\xi = 29$ nm, *b* — частотно-модулированный автодинный сигнал при колебаниях отражателя с амплитудой $\xi = 29$ nm, *c* — спектр автодинного сигнала (*a*), *d* — спектр автодинного сигнала (*b*).

Для калибровки автодинного сигнала полупроводникового лазерного автодина подавалось модулирующее напряжение величиной 20 mV и частотой 500 Hz. Измеренный автодинный сигнал и спектр частотно-модулированного лазерного автодина приведены на рис. 2, *b* и *d* соответственно. Вычисленное значение по нескольким измерениям $\sigma_M = \omega_A \tau_0$ при неподвижном отражателе составило $\sigma_M = 2.052$.

Зная величину σ и $\sigma_M = \omega_A \tau_0$, определяли амплитуду колебаний отражателя из соотношения (8).

Измеренное значение амплитуды колебаний отражателя в эксперименте составило $\xi = 29 \cdot 10^{-9}$ m. Среднеквадратичное отклонение составило $\Delta = \pm 5 \cdot 10^{-9}$ m.

При проведении измерений амплитуды колебаний пьезокерамики с увеличенной в 2 раза величиной подаваемого на нее напряжения измеренная амплитуда колебаний составила $\xi = 56 \cdot 10^{-9}$ m. Среднеквадратичное отклонение составило $\Delta = \pm 4 \cdot 10^{-9}$ m.

Таким образом, использование частотно-модулированного излучения полупроводникового лазерного автодина позволяет с высокой точностью определять амплитуду нановибраций объекта без использования дополнительного механического возбуждения колебаний с микронной амплитудой в измеряемом объекте.

Список литературы

- [1] *Соболев В.С., Кащеева Г.А.* // Автометрия. 2008. Т. 44. № 6. С. 49–65.
- [2] *Economou G. Youngquist R.G., Davies D.E.N.* // J. Lightwav. Technol. 1986. LT-4. N 11. P. 1601.
- [3] *Chebbour A., Gorecki C., Tribillon G.* // Opt. Commun. 1994. Vol. 111. N 1–2. P. 1.

- [4] *Amman M.-Ch., Bosch Th., Lescure M.* // Opt. Eng. 2001. Vol. 40. N 1. P. 10.
- [5] *Scheider R., Thurmel P., Stockmann M.* // Opt. Eng. 2001. Vol. 40. N 1. P. 33.
- [6] *Gouaux F. Servagent N., Bosch Th.* // Appl. Opt. 1998. Vol. 37. P. 6684.
- [7] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С.* // Письма в ЖТФ. 2007. Т. 33. Вып. 21. С. 72–77.
- [8] *Усанов Д.А., Скрипаль А.В.* // Квант. электрон. 2011. Т. 41. № 1. С. 86–94.
- [9] *Vikram C.S., McDevitt T.E.* // Opt. Eng. 1989. Vol. 28. P. 922–925.
- [10] *Pernick B.J.* // Appl. Opt. 1973. Vol. 12. P. 607–610.
- [11] *Wei Jin, Li Ming Zang, Deepak Uttamchandani, Brain Culshaw.* // Appl. Opt. 1991. Vol. 30. N 31. P. 4496–4499.
- [12] *Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В.* Физика полупроводниковых радиочастотных и оптических автодинов. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 2003. 312 с.