

07;12

Измерение амплитуды нановибраций с помощью полупроводникового лазерного автодина с учетом влияния обратной связи

© Д.А. Усанов, А.В. Скрипаль, Е.О. Кащавцев, М.Ю. Калинин

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

Поступило в Редакцию 21 февраля 2012 г.

Исследовано влияние внешней оптической обратной связи на форму продектированного сигнала полупроводникового лазерного автодина. Предложен метод определения амплитуды нановибраций, заключающийся в измерении отношения амплитуд основных спектральных составляющих автодинного сигнала при нановибрациях и при наложении дополнительных механических колебаний, с учетом уровня внешней оптической обратной связи. Экспериментально подтверждена возможность при таком методе измерений значительного повышения точности определения амплитуд нановибраций.

Ранее было показано, что полупроводниковый лазерный автодин может применяться для измерения микровибраций и смещений [1]. Для определения характеристик вибрирующих объектов с нанометровыми амплитудами предложено использовать метод, основанный на проведении нормировки амплитуды основной гармоники спектра автодинного сигнала вибраций отражателя путем наложения на отражатель дополнительных механических колебаний [2].

При использовании для измерений такой лазерной автодинной системы с целью повышения точности необходимо учитывать влияние внешней оптической обратной связи. В известных работах [1,2] предполагалось, что обратная связь в системе мала и ее влияние на результат измерений можно не учитывать. В то же время, как было показано ранее [3,4], внешняя оптическая обратная связь может влиять на форму и низкочастотный спектр автодинного сигнала. В связи с этим представляет интерес разработка метода определения амплитуды

нановибраций с учетом влияния внешней оптической обратной связи лазерного автодина.

Для полупроводникового лазера с внешней оптической обратной связью Р. Лэнгом и К. Кобаяши [5] была предложена модель, в которой лазерный диод описывается системой дифференциальных уравнений для амплитуды и фазы электромагнитного поля и концентрации носителей заряда. В автодинной системе в режиме стационарной генерации, когда изменения в системе происходят за время, значительно превышающее период колебаний электромагнитного излучения, нормированная 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 времени обхода $\tau(t)$ лазерным излучением расстояния L до внешнего отражателя:

$$P = \cos(\omega(t)\tau(t)), \quad (1)$$

где $\omega(t)$ — частота излучения полупроводникового лазера, находится из фазового уравнения [6]

$$\omega_0\tau = \omega\tau + C \sin(\omega\tau + \psi), \quad (2)$$

$$C = \tau z \sqrt{1 + \alpha^2}, \quad (3)$$

C — коэффициент, характеризующий уровень внешней оптической обратной связи, $\omega_0 = 2\pi c/\lambda_0$, λ_0 — длина волны излучения лазера без обратной связи, c — скорость света, $\psi = \arctg(\alpha)$, α — коэффициент уширения линии генерации, z — коэффициент обратной связи [6].

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

$$\tau(t) = \tau_0 + \tau_a \cdot \sin(\Omega t + \varepsilon), \quad (4)$$

где Ω — частота гармонических колебаний объекта, $\tau_0 = 2L/c$, $\tau_a = 2\xi/c$, ξ — амплитуда вибраций объекта, ε — начальная фаза колебаний объекта.

Результаты численного моделирования $P(t)$ автодинного сигнала, нормированного на амплитуду $P(t)$ автодинного сигнала при $C = 1$, для разных уровней обратной связи приведены на рис. 1. При этом в расчетах использовались следующие параметры: $\xi = 1250$ nm, $L = 8.5$ cm, $\varepsilon = \pi/6$, $\Omega = 4$ Hz, $\alpha = 5$, $\lambda_0 = 654$ nm.

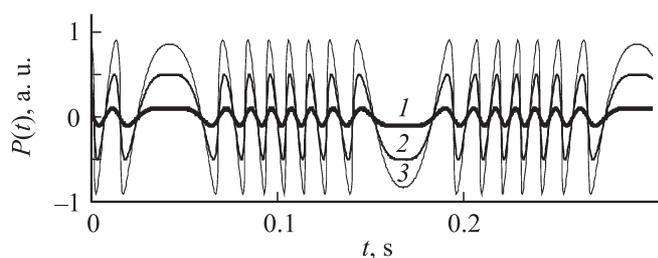


Рис. 1. Переменная составляющая автодинного сигнала гармонических колебаний объекта при разных уровнях обратной связи: 1 — $C = 0.1$; 2 — $C = 0.5$; 3 — $C = 0.9$.

Из результатов моделирования, приведенных на рис. 1, следует, что с изменением уровня обратной связи изменяются амплитуда и форма автодинного сигнала, по форме которого может быть определен уровень обратной связи C .

Метод определения амплитуды нановибраций с учетом уровня внешней оптической обратной связи основан на проведении нормировки амплитуды основной гармоники спектра автодинного сигнала искомым спектра нановибраций отражателя путем наложения на отражатель дополнительных механических колебаний [2].

Зарегистрированный автодинный сигнал при искомой амплитуде нановибраций раскладывают в спектральный ряд и регистрируют амплитуду основной гармоники спектра S_x . Затем последовательно увеличивают амплитуду дополнительных механических колебаний объекта до тех пор, пока основная гармоника спектра не достигнет максимума, и фиксируют значение ее амплитуды $S_{1\max}$. С учетом уровня обратной связи рассчитывается калибровочная зависимость $S_x/S_{1\max}$ от амплитуды искомой вибрации ξ .

Экспериментальные исследования проводились с использованием полупроводникового лазерного автодина [2], в качестве источника излучения которого использовался лазерный диод RLD-650 с характеристиками: мощность излучения 5 mW, длина волны 654 nm. В качестве внешнего отражателя использовался пьезоизлучатель типа VSB35EW0701B. С помощью генератора звуковых колебаний в пьезокерамике вызывались дополнительные механические вибрации, амплитуда которых изменялась во времени.

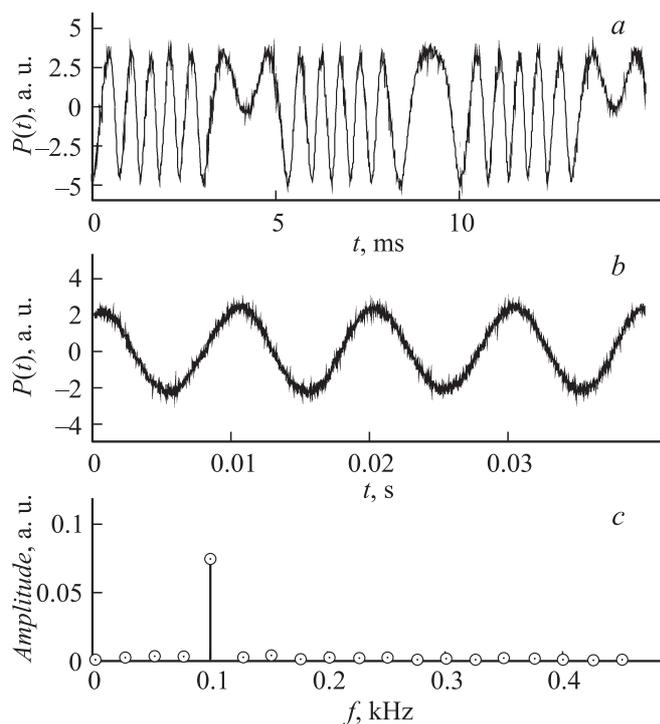


Рис. 2. Продетектированные лазерным автодином сигналы: *a* — автодинный сигнал при микровибрациях объекта, *b* — автодинный сигнал при нановибрациях объекта с неизвестной амплитудой и *c* — его спектр.

Амплитуда дополнительных колебаний увеличивалась до тех пор, пока амплитуда первой гармоники спектра автодинного сигнала не достигала максимального значения, при котором фиксировался автодинный сигнал. По его спектру определялось максимальное значение амплитуды первой гармоники $S_{1\max}$, которое составило 0.131.

Для определения уровня обратной связи амплитуду дополнительных механических колебаний увеличивали до микрометровых значений. На рис. 2, *a* приведен автодинный сигнал при микровибрациях. Определенное из рис. 2, *a* значение уровня внешней оптической обратной связи составило $C = 0.19$.

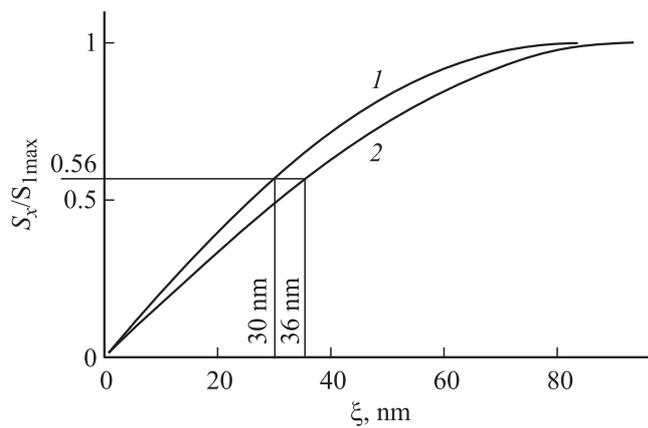


Рис. 3. Зависимость S_x/S_{1max} от амплитуды вибраций ξ : 1 — $C = 0.19$; 2 — $C = 0.0001$.

После исключения дополнительных колебаний измерялся автодинный сигнал вибраций объекта с неизвестной нанометровой амплитудой при вычисленном уровне обратной связи и известных параметрах S_{1max} и ξ_{max} , форма и спектр которого приведены на рис. 2, *b* и *c* соответственно. По спектру нановибраций (рис. 2, *c*) определялась амплитуда первой гармоники S_x , которая составила 0.074. Отношение S_x/S_{1max} для приведенных экспериментальных автодинных сигналов составило величину 0.56.

Для полученного уровня обратной связи $C = 0.19$ была построена калибровочная зависимость S_x/S_{1max} от амплитуды вибрации ξ , представленная на рис. 3 кривой 1, по которой была определена амплитуда нановибраций для автодинного сигнала, приведенного на рис. 2, *b*, составившая 30 nm. Без учета уровня внешней оптической обратной связи измеренная описанным выше методом величина амплитуды нановибраций составила 36 nm (рис. 3, кривая 2).

Результаты измерений амплитуды нановибраций ξ с учетом уровня обратной связи и без его учета для различных уровней обратной связи приведены в таблице. Все вычисления проводились по усредненным результатам обработки протектированных лазерным автодином сигналов. Изменение уровня обратной связи производилось путем изменения степени фокусировки пучка лазерного излучения.

Измеренный уровень обратной связи C	Значение искомой амплитуды нановибраций ξ с учетом уровня обратной связи, nm	Значение амплитуды нановибраций ξ без учета уровня обратной связи, nm	Относительная погрешность определения амплитуды нановибраций δ_ξ без учета уровня обратной связи, %
0.19	30	36	24
0.39	27	40	38
0.53	30	52	79

Как следует из результатов, приведенных в таблице, с ростом уровня обратной связи увеличивается погрешность определения амплитуды нановибраций, если влияние обратной связи в автодинной системе на результат измерений не учитывается.

Таким образом, показано, что в методе определения амплитуды нановибраций, заключающемся в измерении отношения амплитуд основных спектральных составляющих автодинного сигнала при нановибрациях и при наложении дополнительных механических колебаний, учет уровня внешней оптической обратной связи позволяет значительно повысить точность измерений.

Список литературы

- [1] Усанов Д.А., Скрипаль А.В. // Квант. электрон. 2011. Т. 41. № 1. С. 86–94.
- [2] Усанов Д.А., Скрипаль А.В. // Письма в ЖТФ. 2003. В. 9. С. 51–57.
- [3] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Авдеев К.С. // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2009. Т. 17. № 2. С. 54–65.
- [4] Усанов Д.А., Скрипаль А.В., Калинин М.Ю. // ЖТФ. 2000. Т. 70. В. 2. С. 125–129.
- [5] Lang R., Kobayashi K. // IEEE J. Quantum Electron. 1980. QE-16. P. 347–355.
- [6] Tromborg B., Osmundsen J.H., Olesen H. // IEEE J. Quantum Electron. 1984. V. QE-20. P. 1023–1032.