

УДК 681.787

В.С. Соболев, А.М. Харин, Ф.А. Журавель, Щербаченко А.М.

Учреждение Российской академии наук  
Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН  
630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1, E-mail: sobolev@iae.nsk.su

## **МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ, ПОСТРОЕННЫХ НА ОСНОВЕ ЯВЛЕНИЙ ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ И ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ЛАЗЕРОВ**

*Представлены результаты метрологических исследований способа бесконтактных измерений дальности, наноперемещений и вибраций, основанного на явлениях оптической обратной связи и частотной модуляции в полупроводниковых лазерах. Показано, что частота получаемого сигнала линейно связана с дальностью, чувствительность составляет 8 кГц/мм, а погрешность при выдаче результатов 10 раз в секунду составляют около 0,3% в диапазоне измерений порядка полуметра. Метод позволяет оценивать наноперемещения в диапазоне расстояний около 10 см с разрешением 5 нм. В отличие от доплеровских виброметров, реагирующих на виброскорости, исследуемая методика позволяет оценивать величину вибросмещений.*

**ИНТЕРФЕРОМЕТРИЯ, ОПТИЧЕСКАЯ ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ, ЧАСТОТНАЯ МОДУЛЯЦИЯ, ДАЛЬНОМЕТРИЯ, НАНОМЕТРОЛОГИЯ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

*Все существовавшие (в долазерную эпоху) типы источников света представляли собой устройства, которые радиоинженеры обычно называют генераторами шума, и все тонкие и оригинальные методы оптических измерений имели дело, по существу, с использованием шума. Изобретение лазера сразу же опрокинуло этот барьер. Это позволяет надеяться, что в будущем мы сможем управлять электромагнитными полями, генерируемыми на оптических и более высоких частотах, с той же самой точностью и с тем же разнообразием методов, которые стали обычными в радиотехнике.*

1964 г. Р. Глаубер, лауреат Нобелевской премии по физике 2005 г.

Уникальные характеристики полупроводниковых лазеров открыли широкие перспективы дальнейшего развития высокоразрешающей спектроскопии, оптоэлектроники и метрологии. Высокая чувствительность этих лазеров к рассеянному излучению, считавшаяся ранее крупным недостатком, в последнее время усиленно исследуется и привела к созданию нового направления в оптико-физических измерениях – интерферометрии с оптической

обратной связью (Self-mix interferometry) [1 – 7], а возможность существенного (до десятков Гигагерц) изменения частоты излучения простым изменением инжекционного тока создала предпосылки для разработки методов интерферометрии с частотной модуляцией [8 – 13]. Интерес к этому направлению связан с тем, что традиционные методы и аппаратура лазерной интерферометрии не всегда удовлетворяют условиям современного научного эксперимента и измерений в промышленности. Примером могут служить требования работоспособности интерферометров при отражении света от диффузных, а не зеркальных поверхностей, что необходимо в дальнометрии, медицинской диагностике и при измерении вибраций. В отличие от классических интерферометров, особенно значительных, содержащих большое количество оптических элементов и требующих тщательной юстировки, интерферометр с оптической обратной связью и частотной модуляцией имеет очень простую конструкцию. Он состоит из полупроводникового лазера и коллимирующей линзы и вовсе не требует юстировки. В этом плане стоимость такого прибора не идет ни в какое сравнение со стоимостью стандартного интерферометра Майкельсона. Высокий коэффициент усиления активной среды полупроводникового лазера обеспечивает получение интерференционного сигнала даже от удаленных (до трех-пяти метров) и слабо рассеивающих объектов. Лазерный луч можно сфокусировать в пятно порядка длины волны, а это значит, что в сочетании с высокой чувствительностью интерферометр позволяет без возмущений исследовать параметры движения очень малых объектов.

Конкуренцию таким интерферометрам (да и то только в области дальнометрии) могут составить только ультразвуковые приборы и лазерные дальнометры триангуляционного типа. Но даже в этой области, как показано в [14], имеется зона дальности, где рассматриваемые интерферометры могут найти свою нишу.

Одним из путей расширения возможностей лазерной интерферометрии, упрощения конструкции и снижения стоимости соответствующих приборов является использование упомянутых выше особенностей полупроводниковых лазеров путем объединения явлений оптической обратной связи и частотной модуляции в одном устройстве

Цель доклада состоит в том, чтобы представить результаты метрологических исследований рассматриваемого метода для целей бесконтактной дальнометрии ближнего диапазона, нанометрологии и виброметрии.

## **ПРИНЦИПЫ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ С ОПТИЧЕСКОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ И ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ**

В основу рассматриваемой методики измерений дальности до исследуемых объектов и параметров их движения положено, как уже упоминалось, свойство полупроводниковых лазеров изменять частоту излучения под воздействием изменений инжекционного тока. Как показано в [14] при небольших (до 5%) изменениях тока частота излучения линейно связана с ними. Таким образом, если ток, питающий полупроводниковый лазер, периодически модулируется, то, соответственно этому, меняется мощность излучения и его частота. Модулированный таким образом пучок света направляется на исследуемый объект, как показано на рис. 1. Рассеянное им излучение попадает обратно в активную среду лазера, где усиливается и интерферирует с исходным излучением. Из-за конечного значения скорости света рассеянное излучение приходит в лазер с некоторой задержкой, вследствие чего частота этого излучения не совпадает с частотой, генерируемой лазером в данный момент. В результате, на выходе встроенного в лазер фотодиода возникает электрический сигнал, параметры которого несут полезную информацию об отражающей способности исследуемого объекта, его удаленности и характеристиках движения. Положительный эффект от объединения частотной модуляции и оптической обратной связи состоит в том, что последняя реализует интерферометр, свойства которого во многом эквивалентны интерферометру Майкельсона, а частотная модуляция позволяет создать несущую частоту для интерференционного сигнала, что, как уже упоминалось, обеспечивает возможность определения направления движений исследуемого объекта. В принципе модуляция может

осуществляться по любому периодическому закону, но если она будет изменяться линейно во времени, то, как будет показано ниже, частота интерференционного сигнала при неподвижном объекте будет величиной постоянной и пропорциональной дальности до него, а если объект вибрирует, то ее величина будет линейной функцией виброскорости. Это обстоятельство существенно упрощает электронную систему обработки сигнала.

Линейный закон модуляции может быть реализован двумя путями – симметричным или несимметричным пилообразным током. В первом случае фаза интерференционного сигнала скачком изменяется на 180 градусов на каждом полупериоде модуляции, что требует некоторого усложнения системы обработки сигнала, поэтому мы в этом докладе рассматриваем случай несимметричной модуляции. Как уже отмечалось, при модуляции изменяется не только частота, но и мощность излучения лазера. Поэтому сигнал на выходе фотодиода кроме полезной интерференционной части содержит пилообразную помеху, которая, впрочем, убирается в процессе электронной обработки сигнала.

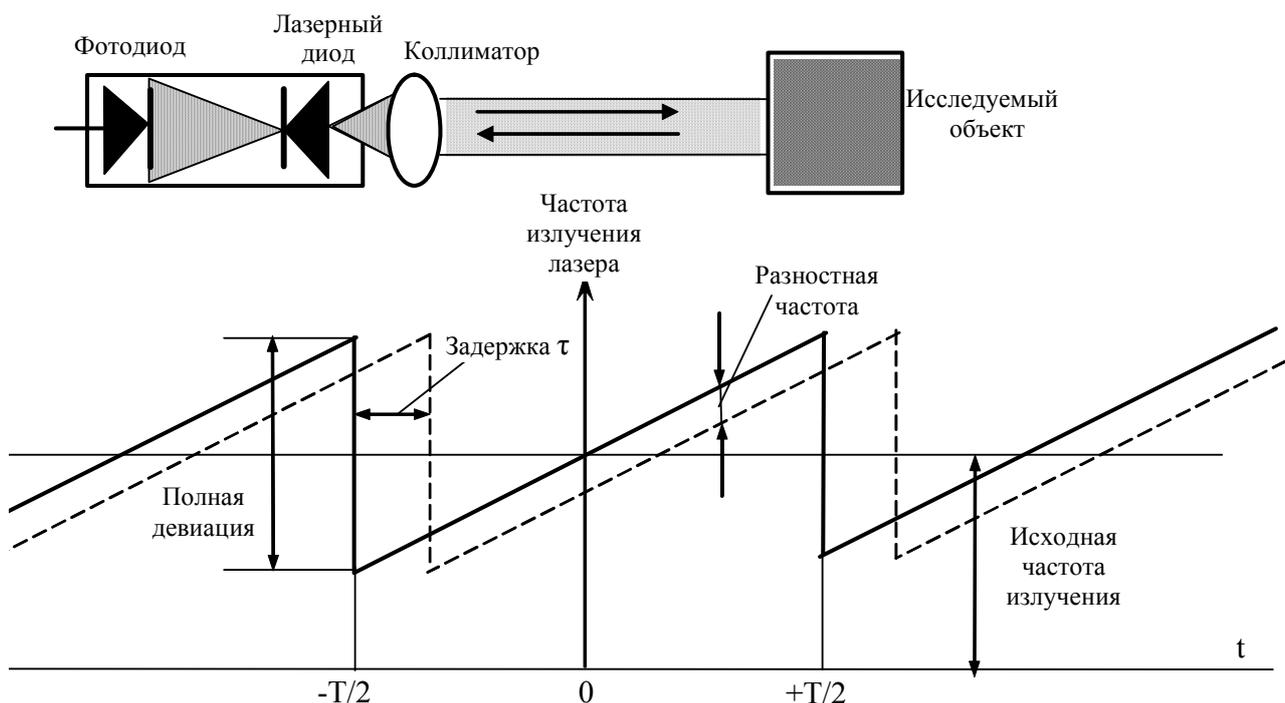


Рис. 1. Принцип интерферометрии на основе явлений оптической обратной связи и частотной модуляции

## ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫЙ СИГНАЛ

При линейном изменении инжекционного тока лазера частота его излучения может быть представлена в виде

$$f(t) = f_0 + \alpha t \quad \text{при} \quad -\frac{T}{2} < t < \frac{T}{2} \quad (1)$$

где  $f_0$  – исходная частота излучения лазера,  $\alpha = \frac{df}{dt}$  – крутизна изменения его частоты во времени под влиянием модулирующего тока,  $t$  – текущее время,  $T$  – период пилообразной модуляции. Если исследуемый объект удален от лазера на расстояние  $S$ , то рассеянное поле придет в лазер с задержкой  $\tau = 2S/c$ , где  $c$  – скорость света.

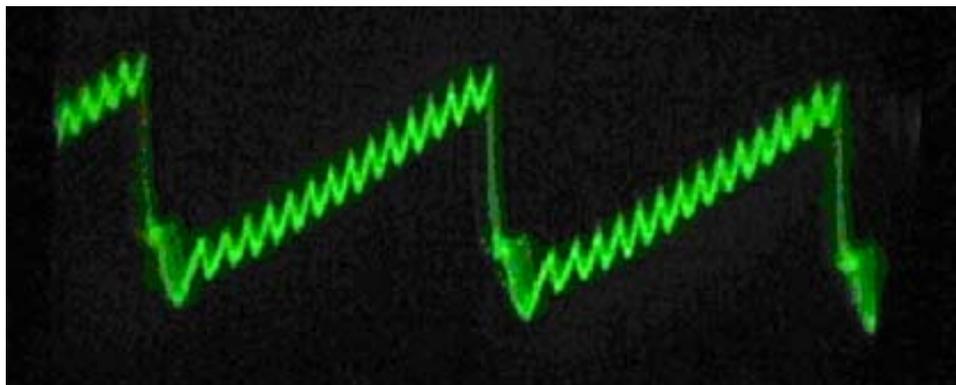
Тогда, фототок встроенного в лазер фотодиода определится следующим образом

$$i(t) = \kappa |E_Z(t) + E_R(t)|^2 = \kappa \left[ E_{Z0}^2 + E_{R0}^2 + 2E_{Z0}E_{R0} \cos(\omega_0 \tau + 2\pi\alpha \tau t - \pi\alpha \tau^2) \right], \quad (2)$$

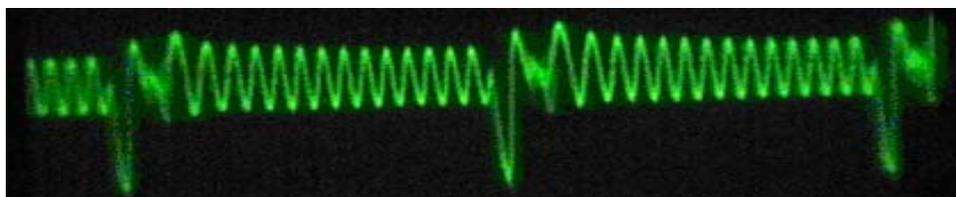
где  $E_Z(t)$  – напряженность зондирующего поля,  $E_R(t)$  – напряженность усиленного лазером (с учетом коэффициента обратной связи) рассеянного поля;  $E_{Z0}, E_{R0}$  – их амплитудные значения;  $\omega_0$  – круговая частота излучения лазера,  $\kappa$  – чувствительность фотоприемника.

Осциллограммы интерференционной части сигнала непосредственно с выхода фотоприемника и после компенсации амплитудной модуляции представлены на рис. 2 (а) и (б), соответственно. Они получены от лазера ADL-65102TL фирмы Арима при средней мощности излучения 8 мВт, амплитуде модулирующего тока 0,7 мА при частоте модуляции 20 кГц и расстоянии до рассеивающего объекта 0,5 м. Хорошо видна пилообразная помеха и интерференционная часть сигнала, частота которой в данном случае составляет 300 кГц. Небольшие пики на каждом периоде модуляции объясняются неполной компенсацией пилообразной части сигнала.

Эксперимент показал, что можно получить достаточно устойчивый сигнал с отношением сигнал-шум более 3 от простой белой бумаги в пределах дальности до 3 м.



(а)



(б)

Рис. 2. Осциллограммы интерференционной части сигнала. (а) – сигнал с выхода фотодиода; (б) – сигнал с выхода трансимпедансного усилителя

Рассмотрим теперь поведение интерференционного сигнала в случае, когда, начиная с некоторого расстояния  $S_0$ , в момент  $t = 0$ , объект начинает движение со скоростью  $V(t)$ . Как следует из (2), его полная фаза  $\varphi(t)$  в этом случае определится как

$$\varphi(t) = \frac{4\pi S_0}{\lambda} + \frac{4\pi \int_0^t V(t) dt}{\lambda} + \frac{4\pi\alpha S_0 t}{c} + \frac{4\pi\alpha t \int_0^t V(t) dt}{c} - \frac{4\pi\alpha S_0^2}{c^2} - \frac{8\pi\alpha S_0 \int_0^t V(t) dt}{c^2} - \frac{4\pi\alpha \left( \int_0^t V(t) dt \right)^2}{c^2} \quad (3)$$

Здесь учтено, что

$$\omega_0 \tau = \omega_0 \cdot \frac{2 \left( S_0 + \int_0^t V(t) dt \right)}{c} = \frac{4\pi S_0}{\lambda} + \frac{4\pi \int_0^t V(t) dt}{\lambda}, \quad \omega_0 = 2\pi \frac{c}{\lambda}, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны излучения лазера.

Теперь рассмотрим, каким образом движение объекта влияет на частоту сигнала, определяемую, как производная его фазы по времени.

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt} = \frac{2V(t)}{\lambda} + \frac{2\alpha S_0}{c} + \frac{2\alpha \int_0^t V(t) dt}{c} + \frac{2\alpha t V(t)}{c} - \frac{4\alpha S_0 V(t)}{c^2} - \frac{4\alpha V(t) \int_0^t V(t) dt}{c^2} \quad (5)$$

Из выражений (3)-(5) следует, что фаза и частота интерференционного сигнала зависят от расстояния (дальности) до рассеивающего объекта, его перемещений ( $\Delta S = \int_0^t V(t) dt$ ) и скорости. Таким образом, открывается возможность измерения этих характеристик движения объекта. Важно также отметить присутствие постоянной составляющей частоты (второй член (5)), играющей роль несущей.

## ОЦЕНКА МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТИСТИК МЕТОДА ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ДАЛЬНОСТИ

Анализ выражения (5) показывает, что тремя его последними членами можно пренебречь и тогда частота интерференционного сигнала при неподвижном объекте будет иметь вид

$$S_0 = \frac{f_c \cdot c}{2\alpha} \quad (6)$$

Таким образом, если оценить частоту сигнала, то дальность до объекта, при известном значении коэффициента  $\alpha$  можно легко определить.

Оценка метрологических характеристик исследуемого метода определения дальности осуществлялась следующим образом. Диффузно отражающий объект, дальность до которого должна быть определена, устанавливался на оптическую скамью, снабженную масштабной линейкой с разрешением 0,2 мм. На этой же скамье жестко закреплялась оптическая головка

с лазером и коллимирующей линзой. Эта линза фокусировала лазерный пучок в область, находящуюся в конце диапазона измерений дальности. В нашем случае этот диапазон простирался от 100 до 400 мм. В этом диапазоне дальностей объект вручную дискретно перемещался с приращениями в 10 мм, и в каждой точке производилось 2000 измерений частоты интерференционного сигнала. Эти данные накапливались в памяти персонального компьютера (ПК), и затем производилась их статистическая обработка. В результате для каждого положения объекта (оцениваемой дальности) вычислялось среднее значение частоты и ее среднеквадратичное отклонение.

Исследования проводились при следующих условиях

- средняя мощность излучения лазера устанавливалась равной номинальному значению для лазера выбранного типа;
- частота пилообразной модуляции составляла 20 кГц;
- глубина модуляции 5% от среднего значения инжекционного тока;
- частота интерференционного сигнала, пропорциональная дальности, определялась путем оценки обратного значения величины одного периода интерференционного сигнала, получаемого с выхода контрольного фотодиода, размещенного в корпусе лазера, на каждом периоде модуляции.

Функциональная схема испытательного стенда представлена на рис. 3.

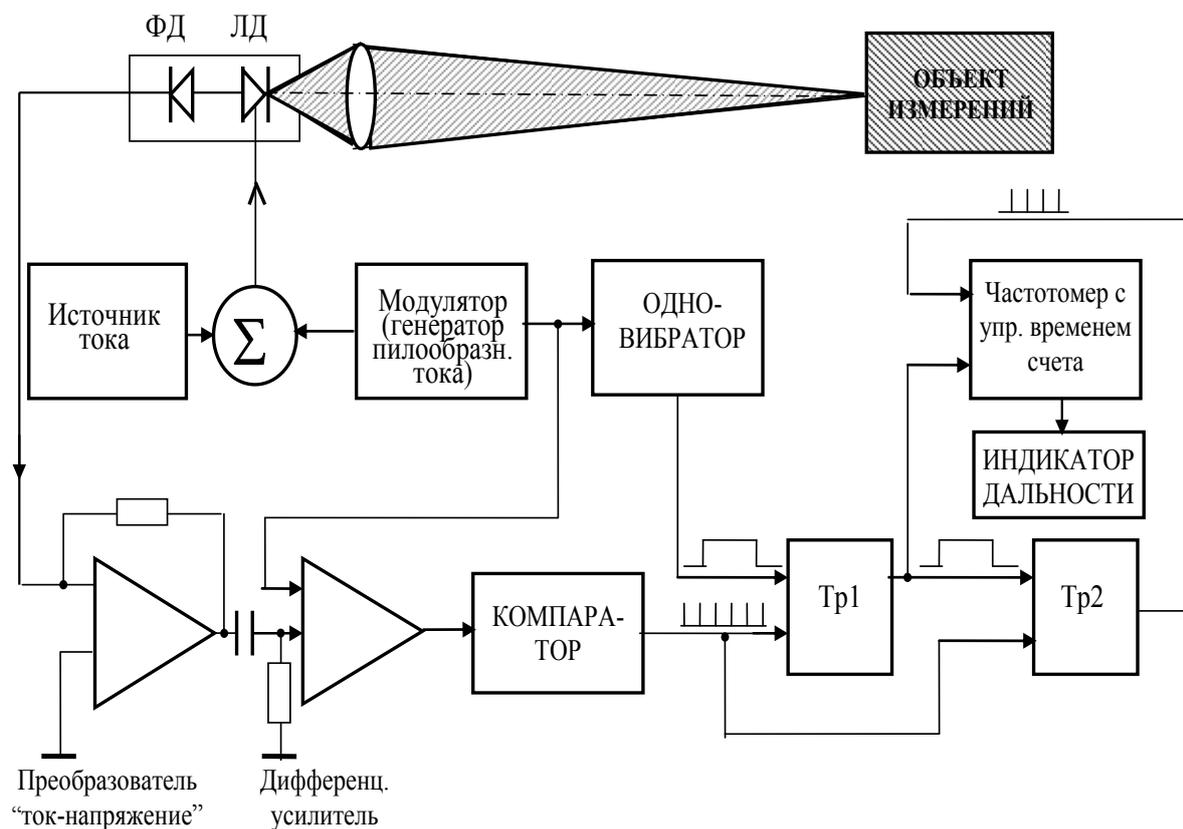


Рис. 3. Функциональная схема стенда для метрологических исследований оценок дальности

Электроника стенда включает в себя модулятор лазера, генератор пилообразного тока, питающего лазер, трансимпедансный усилитель сигнала фотодиода, с цепями компенсации амплитудной помехи, получающейся при модуляции лазера. Эта часть схемы позволяет получить на выходе усилителя сигнал, частота которого пропорциональна оцениваемой дальности. Его форма показана на рис. 2б. Этот сигнал далее подается на компаратор, который на каждом периоде модуляции выдает импульс, длительность которого равна одному периоду интерференционного сигнала. Этот импульс поступает на управляющий

вход счетчика, счетный вход которого подключен к кварцевому генератору импульсов с частотой 20 МГц. Цифровые сигналы счетчика передаются в регистр и через специальный интерфейс попадают в память ПК. В соответствии со специальной программой ПК вычисляет величину, обратную значению периода и в памяти ПК для каждого положения объекта накапливались значения частоты интерференционного сигнала, пропорциональные дальности. По этим данным ПК вычисляет среднее значение частоты и ее среднеквадратичные отклонения. Результаты этой операции представлены на рис.4.

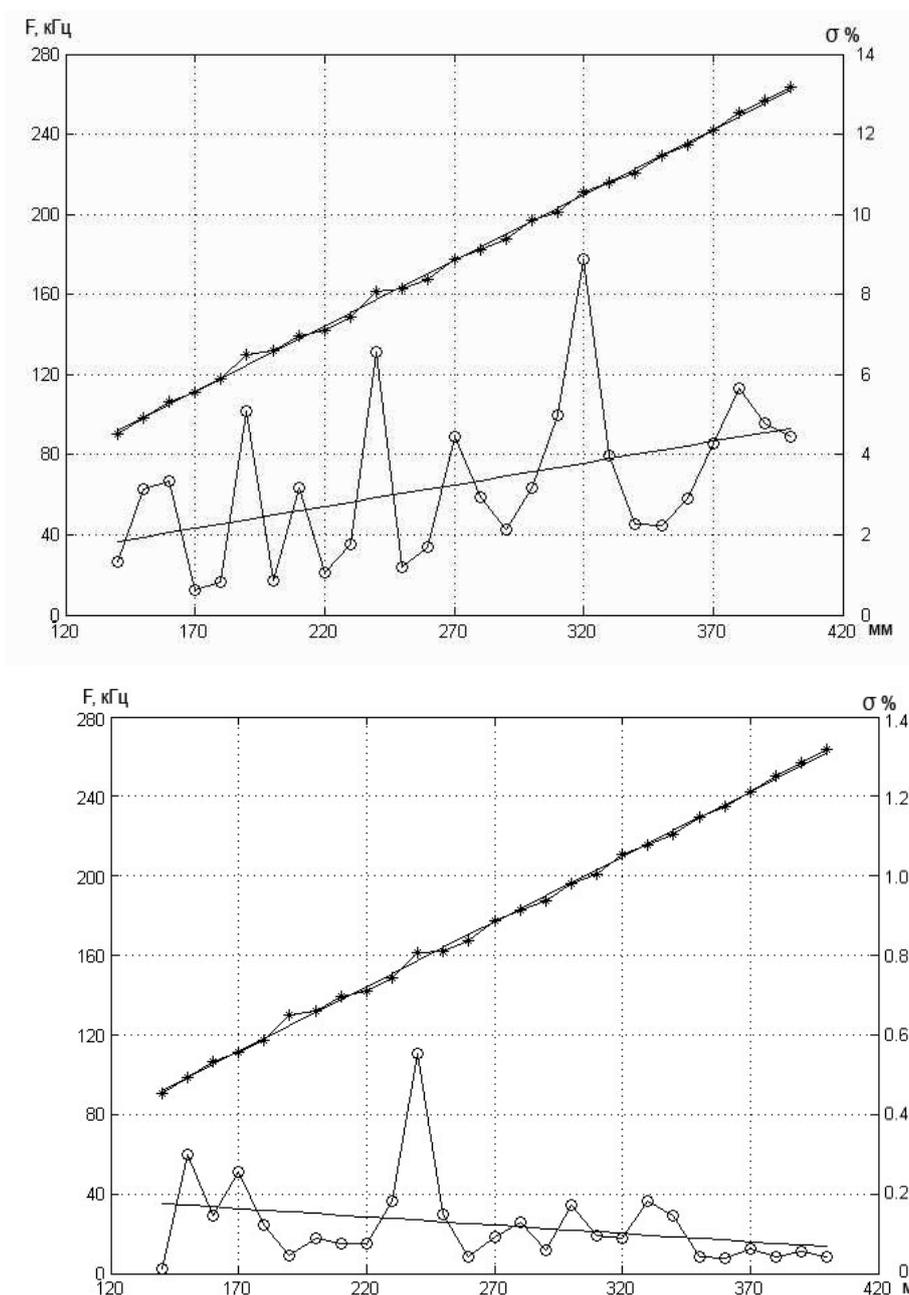


Рис. 4. График зависимости «дальность – частота» и «дальность – среднеквадратичная ошибка». Верхний график отвечает выдаче результатов 10 раз в секунду при осреднении по 2000 отсчетов, а нижний 1 раз в секунду при осреднении по 20000 отсчетам. Звездочками Точками показаны средние значения частоты, кружками – ее среднеквадратичные отклонения, а сплошными линиями – линии регрессии.

Анализ этих данных позволяет утверждать, что:

- значения частоты линейно связаны с дальностью
- коэффициент пропорциональности составляет величину 800 Гц на 1мм дальности

- Среднеквадратичные отклонения измеренной дальности при выдаче результата каждую десятую секунды лежат в диапазоне от 0,1 до 9%, а при выдаче - каждую секунду от 0,02 до 0,5%.

## МЕТРОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ НАНОПЕРЕМЕЩЕНИЙ

Переменная часть фазы, обусловленная перемещением, как следует из (3), определяется следующим образом

$$\Delta\varphi(t) = \frac{4\pi\Delta S(t)}{\lambda} + \frac{4\pi\alpha t\Delta S(t)}{c} - \frac{8\pi\alpha S_0\Delta S(t)}{c^2} - \frac{4\pi\alpha\Delta S^2(t)}{c^2}, \quad (10)$$

где

$$\Delta S(t) = \int_0^t V(t)dt$$

Анализ показывает, что тремя последними членами в (10) по сравнению с первым можно безболезненно пренебречь. Тогда основной вклад в изменение фазы сигнала дает первый член, то есть

$$\Delta\varphi(t) = 4\pi\Delta S(t)/\lambda \quad (11)$$

Следует отметить высокую чувствительность приращений фазы к величине перемещения: если оно составит всего лишь половину длины волны излучения лазера, фаза сигнала изменится на  $360^\circ$ .

Цель исследований состояла в том, чтобы экспериментально определить разрешающую способность метода, диапазон дальностей, в пределах которого возможны измерения наноперемещений и определения дрейфа нуля. Функциональная схема стенда представлена на рис. 5, а общий вид стенда на рис. 6.

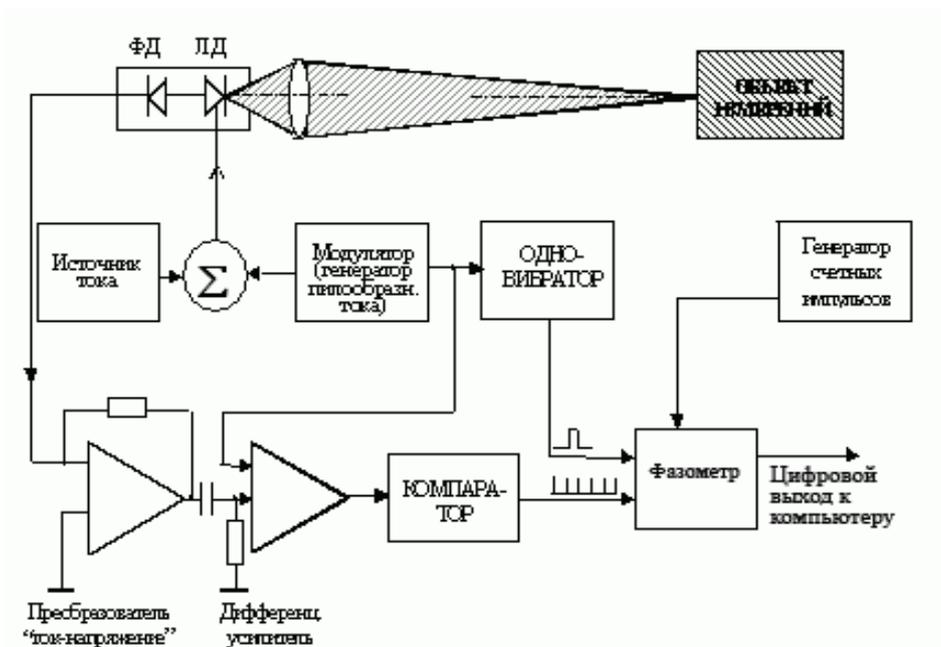


Рис. 5. Функциональная схема стенда для исследования метрологических исследований метода измерений наноперемещений

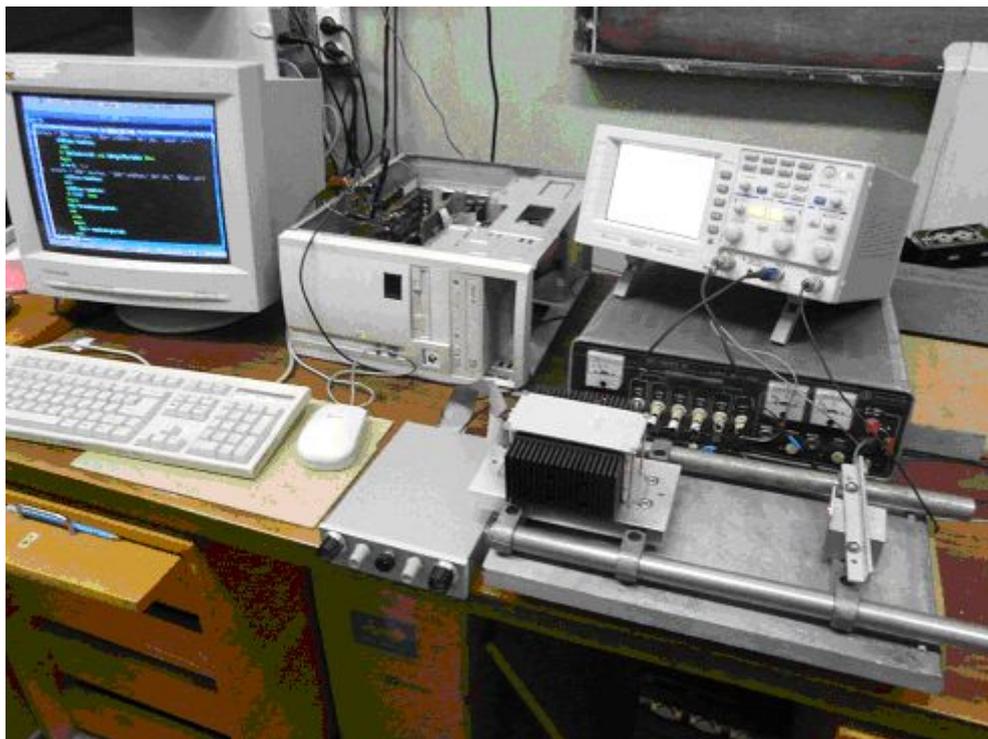


Рис. 6. Общий вид стенда для измерения наноперемещений. Лазер и исследуемый объект расположены внизу справа и закреплены на инваровых стержнях

Измерения приращений фазы осуществлялись путем оценки длительности соответствующих отрезков времени, получаемых как длительности выбросов сигнала за нулевой уровень от начала каждого периода модуляции и коррекции результата, если величина перемещения в течение одного периода модуляции превысит половину длины волны излучения лазера. Причем эти приращения измеряются на каждом периоде модуляции, которая производится с частотой 20 кГц. Длительности соответствующих приращений фазы импульсов оцениваются с помощью счетчика, заполняемого счетными импульсами от кварцевого генератора частоты 20 МГц. Отсчеты фазовых приращений через специальный интерфейс попадают в память ПК, который переводит их в нанометры перемещений. На рис. 7 представлена одна из реализаций результатов измерений наноперемещений неподвижного объекта в течение 721 с.

Анализ полученных данных позволяют сделать вывод том, что разрешающая способность исследуемого метода, определяемая как среднеквадратичное отклонение результатов измерений при неподвижном объекте, на который направлен луч лазера, составляет  $1,5 \div 5$  нанометров. Дрейф нуля в течении 10 минут приблизительно равен 10 нанометрам. Измерения нано перемещений возможны в диапазоне дальностей от 3 до 30 см.

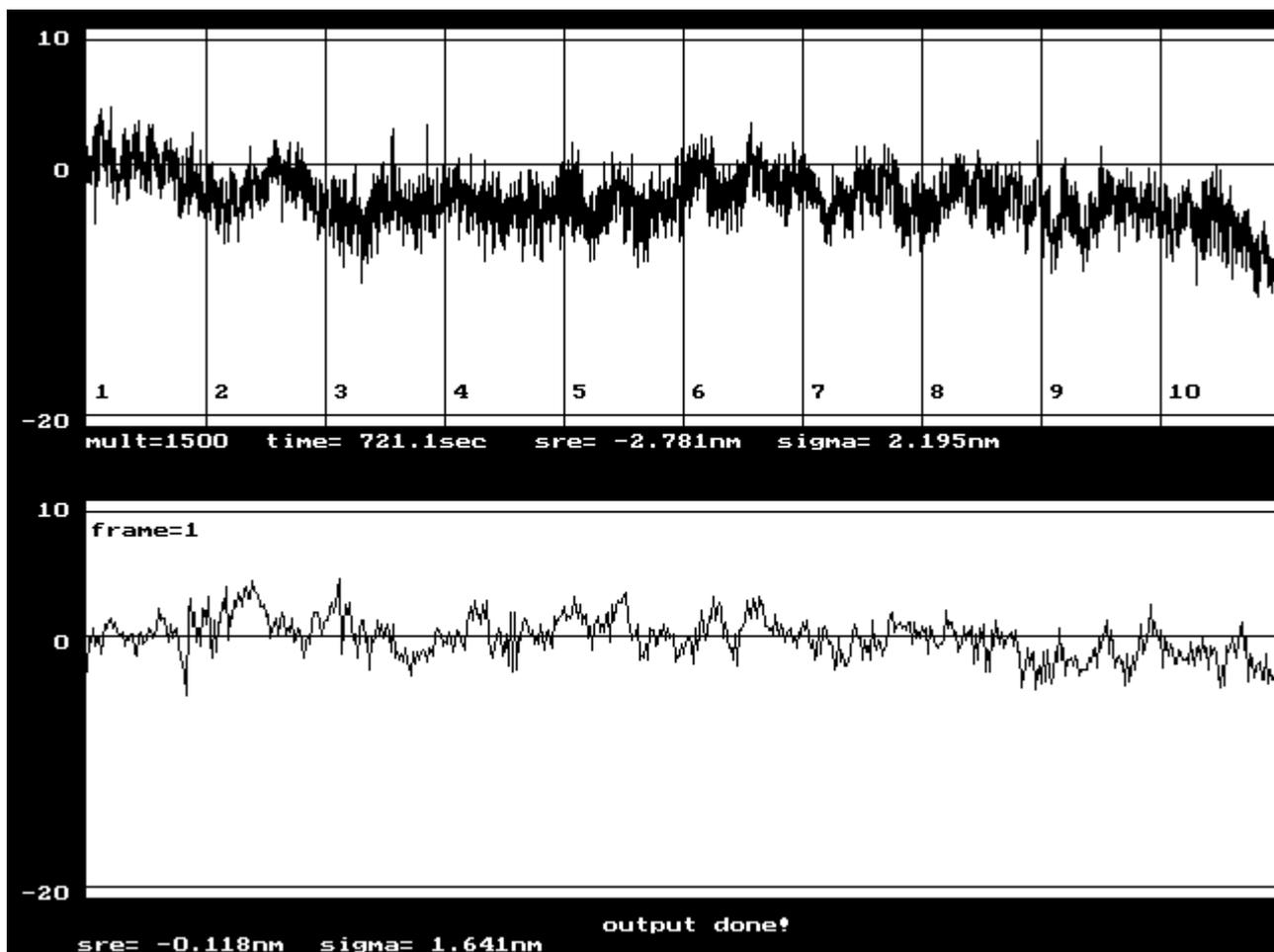


Рис. 7. Временной ход оценок наноперемещений. Внизу в укрупненном масштабе представлена первая часть оценок. Масштаб по оси ординат выражен в нанометрах

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИЙ

Если диффузно рассеивающий объект вибрирует по гармоническому закону с вибросмещением

$$S(t) = S_0 \cos \Omega t . \quad (12)$$

Тогда, как следует из (11), открывается возможность путем измерений приращений фазы интерференционного сигнала измерять параметры вибраций. Причем в отличие от стандартных доплеровских виброметров, оценивающих виброскорости, здесь результаты измерений оказываются пропорциональными вибросмещению. Учитывая, что измерения производятся с частотой 20 кГц, в соответствии с теоремой Котельникова вибросмещения могут быть измерены в полосе частот до 10 кГц. Преимущества исследуемого метода заключается в том, что, как следует из (11), соответствующий измеритель вибраций (при известной длине волны излучения лазера) не требует калибровки.

Эксперимент проводился на том же стенде, на котором оценивались характеристики наноперемещений. Лазерный луч направлялся на диффузор громкоговорителя, возбуждаемого генератором звуковых частот. На рис. 8 представлены результаты измерения смещений диффузора с амплитудой колебаний, составляющей одну интерференционную полосу, то есть 325 нм, и частотой 50 Гц.

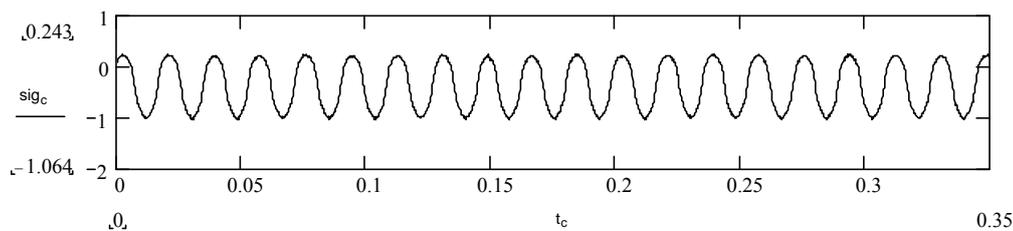


Рис. 8. Выходной сигнал с экрана монитора ПК

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленный материал показывает, что методы интерферометрии, основанный на оптической обратной связи и частотной модуляции излучения полупроводниковых лазеров позволяет реализовать дальнометры ближнего действия (от 5 до 50 см) с погрешностями порядка 0,2% при выдаче результатов каждую секунду и порядка 2% при выдаче за 0,1с.

Метод обладает высоким быстродействием, то есть может оценивать дальность всего лишь с частотой 20 кГц при погрешности одного измерения около 5%. Особенно привлекательно его применение для оценки наноперемещений. С расстояний порядка 10 см наноперемещения можно измерять с погрешностью порядка 3 – 5 нанометров при дрейфе нуля около 10 нм в течение 10 мин. Метод позволяет дистанционно (до одного метра) оценивать вибрации нанометрового диапазона. При этом такой виброметр не требует калибровки и в отличие от распространенных доплеровских виброметров выдает результат в виде вибросмещения, а не виброскорости.

Учитывая простоту оптической части устройств, основанных на рассмотренном методе, можно ожидать, что они найдут широкое применение в народном хозяйстве, как датчики для оценки параметров движения диффузно отражающих объектов.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Bosch Th., Servagent N., Donati S.** Optical feedback interferometry for sensing application // Optical Engineering. 2001. **40** № 1. P.20.
2. **Giuliani G., Norgia M., Donati S. and Bosch Th.** Laser diode self-mixing technique for sensing applications // Journ. Opt. A: Pure Appl. Opt. 2002. **4**. P. 283.
3. **Plantier G., Servagent N., Sourice A., and Bosch Th.** Real-time parametric estimation of velocity using optical feedback interferometry // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2001. **50**. № 4. P. 915.
4. **Plantier G., Bes C., and Bosch Th.** Behavior model of a self-mixing laser diode sensor // IEEE Journal of Quantum Electronics. 2005. **41**. № 9. P. 1157.
5. **Plantier G., Servagent N., Bosch Th., and Sourice A.** Real-time tracking of time-varying velocity using a self-mixing laser diode // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2004. **53** № 1. P. 109.
6. **Bes C., Plantier G., and Bosch Th.** Displacement measurements using a self-mixing laser diode under moderate feedback // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2006. **55**. № 4. P. 1101.
7. **Активная лазерная интерферометрия: состояние и перспективы /** Соболев В.С., Уткин Е.Н., Щербаченко А.М. и др. // Автометрия. 2004. **40**. № 6. С. 4.
8. **Economou G., Youngquist R.G., Davies D.E.N.** Limitations and noise in interferometric systems using frequency ramped single-mode diode lasers // Journ. of Lightwave Technology 1986. **LT-4**. № 11. P. 1601.
9. **Chebbour A., Gorecki C., Tribillon G.** Range finding and velocimetry with directional discrimination using a modulated laser diode Michelson interferometer // - Optics Communications. 1994. № 111. P. 1.

10. **Laser ranging: a critical review of usual techniques for distance measurement** / Amman M.-Ch., Bosch Th., Lescure M. et al. // Opt. Eng. 2001. **40**. № 1. P. 10.
11. **Schneider R., Thürmel P., Stockmann M.** Distance measurement of moving objects by frequency modulated laser radar // Opt. Eng. 2001. **40**. № 1. P. 33.
12. **Gouaux F., Servagent N. and Bosch Th.** Absolute distance measurement with an optical feedback interferometer // Appl. Opt. 1998. 37. P.6684.
13. **Соболев В.С., Кашеева Г.А.** Активная лазерная интерферометрия с частотной модуляцией // Автометрия. 2008. № 6. С. 49.
14. **Compact and high-precision range finder with wide dynamic range and its application** / Shinohara Sh., Yoshida H., Ikeda H. et al. // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 1992. **41**. № 1. P. 40.

V.S. Sobolev, A.M. Kharin, F.A. Zhuravel'

*Institute of Automation and Electrometry, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch, Russia,  
630090, Novosibirsk, Acad. Koptug Ave., 1, E-mail: sobolev@iae.nsk.su*

#### **METROLOGICAL INVESTIGATIONS OF INTERFEROMETRIC SYSTEMS BASED ON THE PHENOMENA OPTICAL FEEDBACK AND FREQUENCY MODULATION OF SEMICONDUCTOR LASER**

*The results of metrological researches of the contactless measurements' method using for range, nanodisplacements and vibrations and based on the phenomena of an optical feedback and frequency modulation in semi-conductor lasers are presented. It is shown that the frequency of received signal is linear with the range, the sensitivity is 8 kHz/mm, and the error at indication the results of 10 times per second is about 0,3% in the range of measurements of the order 0,5 meter. The method allows to evaluate nanodisplacements in the range of distances nearby 10 to 40 cm with resolution of 5 nm. Unlike Doppler vibrometer, reacting to the vibrovelocity, the investigated technique allows to estimate the magnitude of vibrodisplacement.*

**INTERFEROMETRY, OPTICAL FEEDBACK, FREQUENCY MODULATION, RANGE  
MEASUREMENT, NANOMETROLOGY**