УДК 535.417

Р.В. Ромашко, Т.А. Ефимов, М.А. Асалханова

Голографическая система измерений наноперемещений микро- и макрообъектов

Разработана система для измерения наномасштабных перемещений микро- и макрообъектов на основе адаптивного голографического интерферометра. Измерительная система на основе адаптивного интерферометра позволяет осуществлять устойчивую регистрацию и измерение перемещений микро- и макрообъектов в диапазоне от 0,5 до 266 нм на различных скоростях.

Ключевые слова: адаптивный голографический интерферометр, нанометрология, фоторефрактивный кристалл, динамическая голограмма, наномасштабные перемещения.

Актуальность систем измерения перемещений микро- и макрообъектов. Бурное развитие в последнее десятилетие в России и за рубежом исследований в сфере нанотехнологий обусловливает необходимость осуществления прецизионных измерений сверхмалых физических величин, среди которых наномасштабные перемещения и наномасштабные колебания, параметры наночастиц. Это, в свою очередь, требует наличия новых высокочувствительных и высокоточных измерительных систем, способных обеспечить решение задач нанометрологии в процессе создания и эксплуатации объектов наноиндустрии. Интерферометрические измерительные системы являются наиболее чувствительными инструментами для регистрации и измерения широкого класса физических величин, в том числе параметров перемещений объектов [1]. Вместе с тем высокая чувствительность любого интерферометра делает его в значительной степени подверженным влиянию внешних факторов (изменению температуры, давления, неконтролируемых деформаций, микросейсмических вибраций и пр.). Это в свою очередь обусловливает потребность в системе, обладающей как высокой чувствительностью, так и помехозащищенностью. Для решения задачи детектирования перемещений микро- и макрообъектов в настоящей работе используется адаптивный голографический интерферометр, основанный на двухволновом взаимодействии на динамических голограммах, формируемых в фоторефрактивном кристалле [2]. Ввиду адаптивных свойств голограммы система позволяет производить измерения малых смещений исследуемых объектов в условиях неконтролируемых изменений параметров окружающей среды.

Измерительная система на основе адаптивного интерферометра. В качестве источника излучения в данной работе использовался Nd:YAG – лазер, работающий в непрерывном режиме на длине волны 1064 нм, мощностью 25 мВт. Объектный пучок интерферометра фокусировался на объекте, перемещения которого регистрировались. Отраженный от объекта пучок попадал в кристалл CdTe, где взаимодействовал с опорной волной. Адаптивный интерферометр обеспечивал преобразование изменений фазы отраженной волны, вызванных перемещением объекта, в изменения интенсивности, которые регистрируются фотоприемником.

Одним из наиболее важных параметров адаптивного интерферометра является частота отсечки, определяющая способность интерферометра подстраиваться под неконтролируемые изменения внешних условий. Для выбранного образца кристалла и длины волны излучения время записи определяется интенсивностью излучения (обратно пропорционально) [3]. При интенсивности объектного пучка 177 Вт/см^2 частота отсечки интерферометрической системы $f_{\text{отс}} = 1{,}2$ кГц.

Чувствительность системы. В качестве критерия чувствительности был выбран относительный порог детектирования (ОПД), который является отношением минимального значения модуляции фазы, детектируемой адаптивным интерферометром, к минимальному значению модуляции фазы, которую способен зарегистрировать классический гомодинный интерферометр, не имеющий оптических потерь. Значение ОПД измерительной системы составило 16. Отсюда с учетом теоретического порога детектирования гомодинного интерферометра, которая составляет $\varphi_C = 1{,}5\times10^{-9}$ рад(Вт/Гц)$^{1/2}$, абсолютное значение порога детектирования перемещений поверхности адаптивного интерферометра с использованием длины волны $\lambda = 1064$ нм составило $x_A = 2{,}03\times10^{-6}$ нм(Вт/Гц)$^{1/2}$. При ширине полосы пропускания адаптивного интерферометра

$\Delta f = 17$ МГц и мощности объектного пучка в 5 мВт величина абсолютного порога регистрируемых перемещений составила 0,1 нм.

Регистрация наноперемещений. Для перемещений макрообъектов, в качестве которых выступали плоские зеркала, использовался пьезоэлектрический нанотранслятор. Его перемещения задавались прилагаемым к нему напряжением различной формы (пилообразной, треугольной и прямоугольной) и длительности (от 20 мкс до сотен мс).

В силу свойств адаптивности измерительная система будет по-разному реагировать на перемещения объекта, совершаемые с разными скоростями: подстраиваться под медленные перемещения (совершаемые за время много больше времени записи голограммы) и регистрировать быстрые. Деление на указанные две группы перемещений – медленные и быстрые – осуществляется относительно некоторой характерной скорости (V_0), являющейся параметром адаптивной системы и определяемой временем записи динамической голограммы $V_0 = \lambda / 8\tau_R$. Время записи голограммы было определенно экспериментально и при интенсивности опорного пучка 16 Вт/см^2 составило 60 мс, отсюда V_0 = 2,2 мкм/с. Перемещения со скоростями порядка V_0 не регистрировались, ввиду нелинейности отклика измерительной системы.

Рисунок 1 иллюстрирует одну из осциллограмм задающего и регистрируемого сигналов для перемещений со скоростью 5,2 мкм/с.

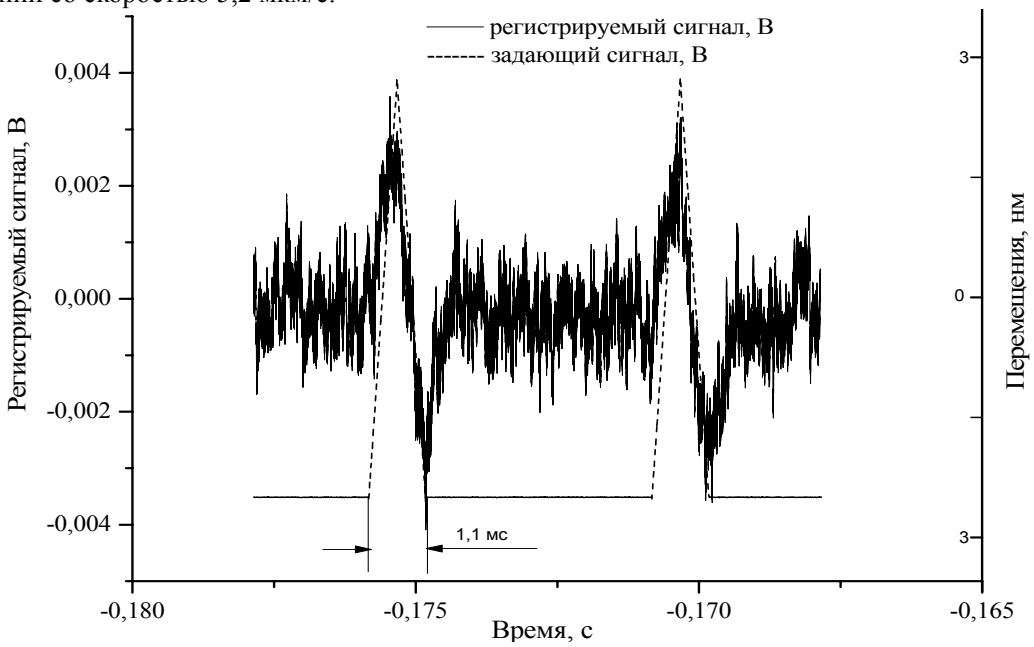

Рис. 1. Осциллограмма регистрируемого сигнала и напряжения, подаваемого на пьезоэлектрический нанотранслятор

Как видно из рисунка, были зарегистрированы перемещения в 2,9 нм. Минимальное значение регистрируемых перемещений, ограниченное шумами системы, составило 0,5 нм.

Также видно, что существует отличие регистрируемого сигнала от сигнала, задающего перемещения. Это можно объяснить тем, что пьезокерамический транслятор обладает резонансными свойствами и конечным временем отклика.

В качестве объекта для регистрации перемещений микрообъектов использовался микрокантилевер размерами 215×42×8 мкм. Он закреплялся на электроиндукционный позиционер, который перемещался за счет подачи переменного напряжения с частотой 400 Гц с различной амплитудой. На рис. 2 показаны форма задающего напряжения и сигнал, регистрируемый измерительной системой, изображен сигнал от объекта, перемещающегося на расстояния до 150 нм. Перемещения осуществлясь за счет подачи на позиционер синусоидального сигнала амплитудой в 500 мВ.

Как видно из рис. 2, регистрируемый сигнал смещен по фазе относительно задающего сигнала примерно на $\pi/2$, что связано с инерционностью работы позиционера. Так как линейный режим демодуляции фазы объектной волны достигается при модуляции фазы, не превышающей значение $\varphi=\lambda/4$ (λ – длина волны лазерного излучения, в данной работе равна 1064 нм) [2], перемещения с амплитудой 266 нм и более приводят к появлению в регистрируемом сигнале дополнительных гармоник. Данную величину можно считать максимальной амплитудой, ограничивающей диапазон за-

регистрированных перемещений. Число гармоник и их амплитуда увеличиваются с увеличением амплитуды сигнала, подаваемого на позиционер. Минимальный порог детектирования перемещений, определяемый собственными шумами измерительной системы, составил 1,7 нм.

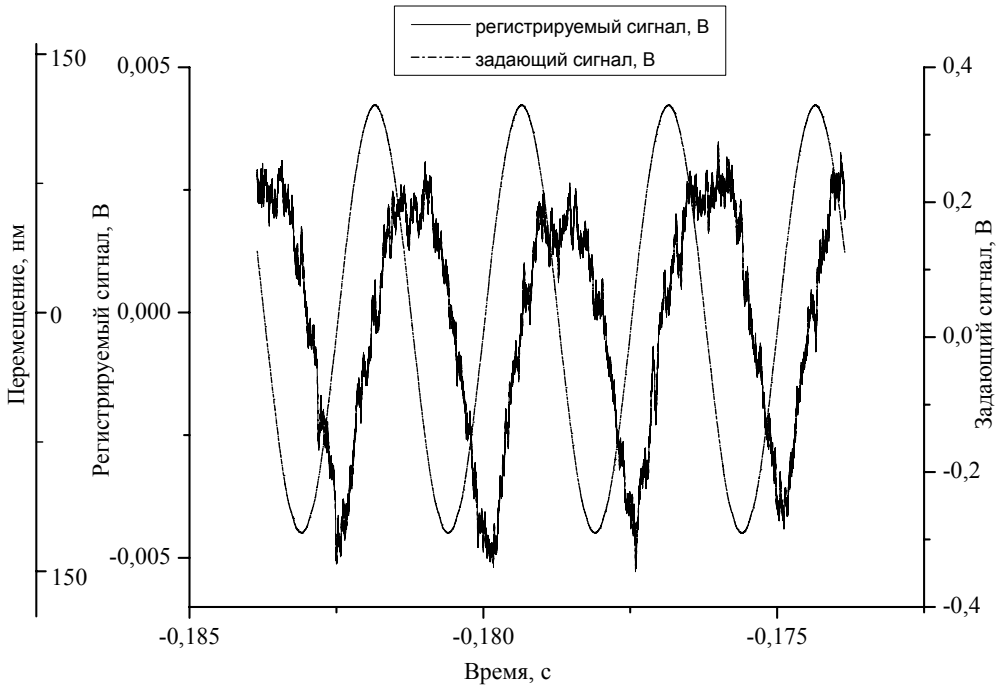

Рис. 2. Осциллограмма регистрируемого сигнала и напряжения, подаваемого на электроиндукционный нанотранслятор

Заключение. Ввиду адаптивных свойств системы представленный принцип детектирования наномасштабных перемещений может быть использован в том числе и для исследования микро- и нанообъектов сложной формы и обладающих неоднородными поверхностями. Для перемещений макрообъектов со скоростью 5,2 мкм/с теоретический порог детектирования перемещений составил 0,1 нм, практически удалось зарегистрировать перемещения от 0,5 нм. Для перемещений микрообъектов минимальный порог детектирования составил 1,7 нм. Система регистрации наномасштабных перемещений на основе адаптивного интерферометра может быть использована в задачах нанометрологии и контроля перемещений микро- и макрообъектов.

Литература

1. Hariharan P. Optical interferometry / P. Hariharan // Rep. Prog. Phys. – 1990. – Vol. 54. – P. 339–390.

2. Петров М.П. Фоточувствительные электро оптические среды в голографии и оптической обработке информации / М.П. Петров, С.И. Степанов, А.В. Хоменко/ – Л.: Наука/ Ленингр. отд., 1983. – 269 с.

3. Fast adaptive interferometer on dynamic reflection hologram in CdTe:V. / S. Di Girolamo, A.A. Kamshilin, R.V. Romashko et al. // Optics Express. – 2007. – Vol. 15, № 2. – P. 545–555.

Ромашко Роман Владимирович
Вед. науч. сотрудник Института автоматики и процессов управления
Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН), г. Владивосток
Тел.: 8 (423-2) 231-04-39
Эл. почта: romashko@iacp.dvo.ru

Ефимов Тимофей Александрович
Аспирант ИАПУ ДВО РАН
Тел.: 8 (423-2) 231-04-39
Эл. почта: tim2vl@yandex.ru

Асалханова Мария Алексеевна
Студентка каф. квантовой и оптической электроники
Дальневосточного федерального университета, г. Владивосток
Тел.: 8 (914) 328-06-94
Эл. почта: facir@mail.ru

Romashko R.V., Efimov T.A., Asalchanova M.A.
The holographic measurement system of nano scale movements of micro and macro objects.

We developed a system for measuring nano scale movements of micro and macro objects based on an adaptive holographic interferometer. The measuring system based on an adaptive interferometer allows the stable registration and measuring movements of micro-and macro-objects in the range of 1.7 to 266 nm at speeds of tens of nm / s to a few μm / s.
Keywords: adaptive holographic interferometer, nanometrology, photorefractive crystal, dynamic hologram, nano scale movements.