

УДК 535.417

Р.В. Ромашко, Т.А. Ефимов

Система для измерения сверхмалых масс на основе адаптивного голографического интерферометра

Предложена система на основе адаптивного голографического интерферометра для регистрации и измерения массы микро- и нанообъектов. Чувствительным элементом системы является микроосциллятор. Объекты, подлежащие взвешиванию, присоединяются к поверхности микроосциллятора. Выполнены экспериментальные исследования функционирования измерительной системы, определены ее рабочие характеристики. В процессе экспериментальной апробации зарегистрировано изменение массы прикрепленных к микроосциллятору наноразмерных частиц платины в 420×10^{-12} г, порог детектирования составил $8,5 \times 10^{-12}$ г.

Ключевые слова: адаптивный голографический интерферометр, микроосциллятор, резонансное микровзвешивание.

Задача регистрации и измерения сверхмалых масс. Основные направления фундаментальных исследований в области нанометрологии не обходятся без измерения сверхмалых масс. Наиболее предпочтительным подходом к определению массы микро- и нанообъектов является резонансное микровзвешивание, которое заключается в определении частоты собственных колебаний самих микро- и нанообъектов либо колебательных систем (микроосцилляторов), к которым эти микрообъекты присоединяются. Детектирование колебаний осуществляется, в основном, оптическими методами [1–3], из которых интерферометрические являются наиболее чувствительными и позволяют детектировать колебания порядка нескольких ангстрем.

Вместе с тем высокая чувствительность любого интерферометра делает его в значительной степени подверженным влиянию внешних факторов, что влечет за собой появление шумов и, как следствие, повышает порог детектирования массы. Применение электронных систем стабилизации существенно усложняет измерительную систему в целом и вносит дополнительные шумы [4]. Другая проблема, заключается в том, что увеличение чувствительности систем на основе резонансного микровзвешивания неразрывно связано с необходимостью сокращения размеров микроосциллятора. Уменьшение размеров микроосциллятора приводит к значительным искажениям фронта зондирующей волны интерферометра и значительному падению его чувствительности. Кроме того, поверхность микроосцилляторов в силу технологических особенностей не всегда может быть выполнена зеркальной, что также вносит дополнительные искажения в волновой фронт и снижает точность определения массы.

Комплексное решение указанных проблем, по всей видимости, заключается в использовании при создании систем измерения сверхмалых масс принципов адаптивной интерферометрии [5, 6]. Ключевым элементом адаптивного интерферометра являются динамические голограммы, формируемые в фоторефрактивном кристалле (ФРК). Голографический принцип объединения волн в кристалле позволяет обеспечить точное согласование произвольных волновых фронтов опорного и зондирующего световых пучков, а адаптивные свойства динамической голограммы обеспечивают стабилизацию рабочей точки интерферометра в области его максимальной чувствительности (квадратурные условия) [6].

В этой связи целью настоящей работы стало построение и практическая апробация системы измерения сверхмалых масс на основе резонансного микровзвешивания с использованием принципов адаптивной голографической интерферометрии.

Система для измерения сверхмалых масс. Схема системы для измерения сверхмалых масс представлена на рис. 1. В качестве чувствительного элемента системы (микроосциллятора) используется кантилевер прямоугольной формы длиной 180 мкм, шириной 40 мкм, толщиной 15 мкм. В ходе измерений собственные колебания кантилевера возбуждались лазерными импульсами с длиной волны 532 нм, длительностью 7 нс, энергией 0,5 мДж, частотой следования 1 Гц. В свою очередь детектирование собственных колебаний кантилевера осуществлялось с помощью адаптивного интерферометра.

В адаптивном интерферометре использован непрерывный лазер с длиной волны излучения 1,06 мкм, мощностью 20 мВт. Излучение лазера делилось на объектный и опорный пучки в отношении 1/5. Объектный пучок фокусировался линзой на свободном конце кантилевера. Пучок, отраженный от кантилевера, попадал в кристалл, где взаимодействовал с опорной волной. Адаптивный интерферометр обеспечивал преобразование изменений фазы отраженной волны, вызванных колебаниями кантилевера, в изменения интенсивности, которые детектировались фотоприемником [12].

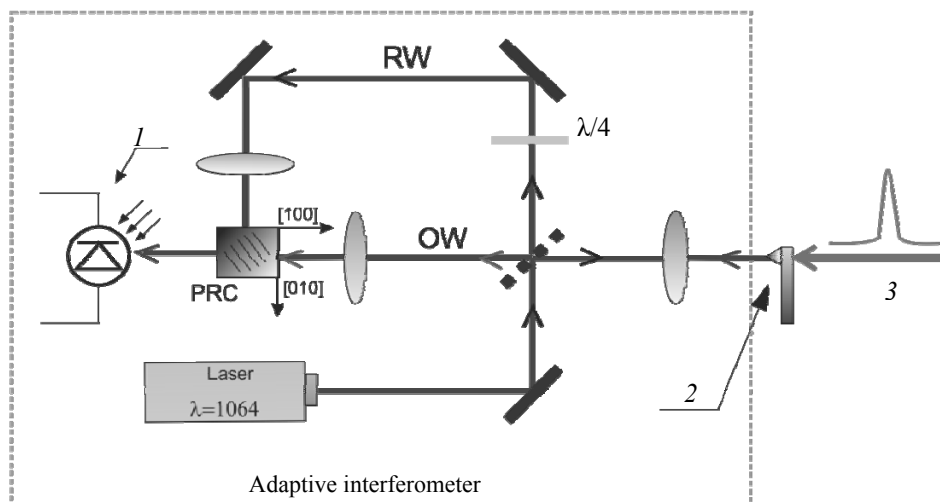


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для измерения сверхмалых масс:

1 – фотоприемник; 2 – кантилевер; 3 – лазерный импульс (длина волны 532 нм, длительность 7 нс, энергия 0,5 мДж); RW – опорная волна; OW – объектная волна; PRC – фоторефрактивный кристалл; $\lambda/4$ – четвертьволновая пластинка

Измерительная система была экспериментально апробирована в задаче измерения масс микрообъектов, в качестве которых использовались наночастицы платины. Перед началом измерений наночастицы платины с поперечными размерами от 60 до 400 нм помещались на кантилевер методом магнетронного вакуумного напыления. В процессе измерений каждый лазерный импульс, возбуждающий колебания, приводил к отсоединению некоторого количества наночастиц от кантилевера. Вследствие постепенного удаления масса присоединенных частиц постоянно уменьшалась, что

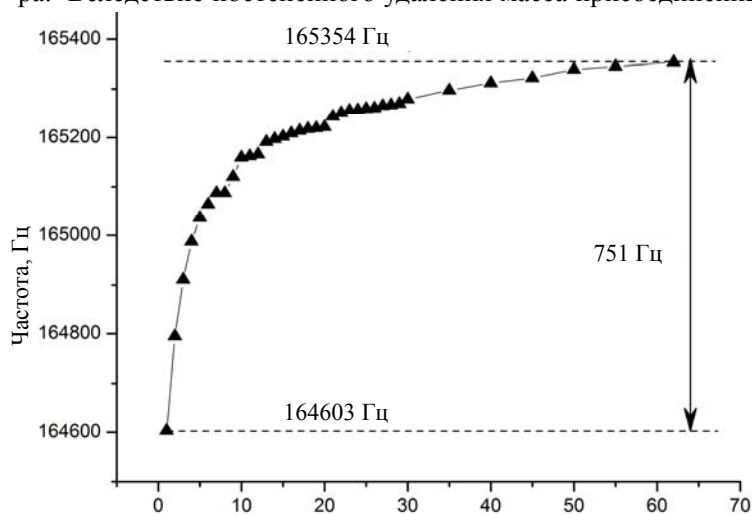


Рис. 2. Динамика изменения частоты колебаний кантилевера

приводило к соответствующему росту частоты собственных колебаний кантилевера.

Рисунок 2 демонстрирует динамику изменения частоты колебаний кантилевера в результате воздействия серии лазерных импульсов. Как видно, после воздействия лазерных импульсов частота колебаний кантилевера увеличилась на 751 Гц. Изменение частоты позволяет определить суммарное изменение массы присоединенных частиц [1], которое составило 420×10^{-12} г. Порог детектирования, определяемый шумами измерительной системы, составил $8,5 \times 10^{-12}$ г.

Заключение. Применение адаптивной интерферометрии для измерения сверхмалых масс расширило возможности систем на основе резонансного микровзвешивания: увеличилась стабильность работы, упростилась настройка, отсутствует необходимость юстировки оптических элементов. Кроме того измерительная система обладает потенциалом увеличения чувствительности за счет использования кантилеверов меньших размеров и с более высокой частотой собственных колебаний. Полученные результаты послужат основой создания нового типа метрологических систем, предназначенных для измерения сверхмалых масс широкого класса микро- и нанообъектов.

Литература

1. Salehi-Khojin A. Nanomechanical cantilever active probes for ultrasmall mass detection / A. Salehi-Khojin, S. Bashash, N. Jalili // *J. Appl. Phys.* – 2009. – Vol. 105. – P. 013506.
2. Bimaterial microcantilevers as a hybrid sensing platform / S. Singamaneni et al. // *Advanced Materials.* – 2008. – Vol. 20. – P. 653–680.
3. Gupta S.V. Nano-technology for detection of small mass difference // *Journal of Metrology Society of India.* – 2008. – Vol. 23, № 3. – P. 177–192.
4. Stable dynamic detection scheme for magnetostrictive fiber-optic interferometric sensors / C.-H. Shi et al. // *Optics Express.* – 2006. – Vol. 14, № 12. – P. 5098–5102.
5. Stepanov S.I.. Adaptive interferometry: a new area of applications of photorefractive crystals / *International Trends in Optics*; ed. J. W. Goodman. – New York, London: Academic Press, Inc, 1991. – Ch. 9. – P. 125–140.
6. 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. – P. 545–555.

Ромашко Роман Владимирович

Вед. науч. сотрудник Института автоматизации и процессов управления
Дальневосточного отделения Российской академии наук (ИАПУ ДВО РАН), г. Владивосток
Тел.: 8 (423-2) 23-104-39
Эл. почта: romashko@iacp.dvo.ru

Ефимов Тимофей Александрович

Аспирант ИАПУ ДВО РАН
Эл. почта: tim2vl@yandex.ru

Romashko R.V., Efimov T.A.

Micromechanical mass sensor with holographic interferometer

An experimental measurement system based on adaptive interferometer measurement of the mass of micro-and nano-objects is suggested. The sensitive element of the system is a micro oscillator. We present experimental result of applying interferometry technique for measuring picograms of adsorbed mass on micromechanical resonators. In experimental testing of measuring system the change in mass attached to a micro-oscillator nanoobjects was 420×10^{-12} g, the mass detection threshold was $8,5 \times 10^{-12}$ g.

Keywords: adaptive interferometer, determine mass.