

Т.А. ЕФИМОВ, Р.В. РОМАШКО, Ю.Н. КУЛЬЧИН, А.Б. ЧЕРЕПАХИН

Адаптивный голографический интерферометр для детектирования колебаний микрокантилеверов в жидкой среде

Чувствительным элементом микромеханических биосенсоров является осциллятор – микрокантилевер, частота собственных колебаний которого зависит от массы присоединенных биологических объектов. Чувствительность таких биосенсоров определяется как размером и геометрическими параметрами осциллятора, так и методами возбуждения и детектирования перемещений осциллятора. В настоящей работе представлены результаты экспериментального применения адаптивного голографического интерферометра, основанного на двухволновом взаимодействии в фоторефрактивном кристалле $CdTe:V$, для детектирования колебаний микромеханических осцилляторов в жидкой среде. Показано, что адаптивный голографический интерферометр способен эффективно детектировать колебания микрокантилевера размером $210 \times 40 \times 7 \text{ мкм}^3$.

Ключевые слова: адаптивный интерферометр, микрокантилевер, фоторефрактивный кристалл, биосенсор.

Adaptive holographic interferometer for detection of microcantilever vibration in liquid environment.

T.A. EFIMOV, R.V. ROMASHKO (Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Vladivostok), Yu.N. KULCHIN (Institute of Automation and Control Processes FEB RAS, Vladivostok, Far Eastern Federal University, Vladivostok), A.B. CHEREPAHIN (Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg).

The sensitive element of micromechanical biosensors is microcantilever. The microcantilever natural frequency depends on the mass of the attached biological objects. The sensitivity of micromechanical biosensors is determined both by the its geometry and by the method of excitation and detection of the microcantilever motions. The paper presents the results of an experimental application of adaptive holographic interferometer based on two wave mixing in photorefractive crystal of $CdTe:V$ for detection of microcantilever vibration in liquid environment. It is shown that the adaptive holographic interferometer is able to effectively detect vibration of microcantilever with size of $210 \times 40 \times 7 \text{ }\mu\text{m}^3$.

Key words: adaptive interferometer, microcantilever, photorefractive crystal, biosensor.

Наиболее значимым приложением микро- и наномеханических осцилляторов является разработка биологических сенсоров [3]. Чувствительность и порог детектирования таких сенсоров естественным образом связаны с размером механического осциллятора. С уменьшением размера осциллятора становится актуальной проблема детектирования перемещений или колебаний осцилляторов. Интерферометрические измерительные системы имеют наибольшую чувствительность при регистрации и измерении широкого

*ЕФИМОВ Тимофей Александрович – младший научный сотрудник, РОМАШКО Роман Владимирович – доктор физико-математических наук, профессор, ведущий научный сотрудник (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток), КУЛЬЧИН Юрий Николаевич – академик, профессор, директор (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток), ЧЕРЕПАХИН Артем Борисович – магистрант (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург). *E-mail: tim2vl@yandex.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, грант № 18-32-00574мол_а.

класса физических величин, в том числе параметров перемещений объектов [3, 5]. Вместе с тем высокая чувствительность делает любой интерферометр в значительной степени подверженным влиянию внешних факторов (изменению температуры, давления, неконтролируемых деформаций). Это, в свою очередь, обуславливает потребность в системе, обладающей как высокой чувствительностью, так и помехозащищенностью.

Микромеханические биосенсоры в жидкостях работают в основном в статическом (изгибном) режиме, в то время как более чувствительным в воздушной среде является резонансный режим. Это связано с тем, что в жидкой среде значительно уменьшается амплитуда колебаний микроосциллятора и, как следствие, точность определения частоты колебаний, существенно ухудшая метрологические характеристики биосенсора. Главный недостаток статического режима – невозможность обнаруживать сверхмалые количества биологических объектов, так как для возникновения поверхностного натяжения, которое изгибает сенсор, необходимо практически полное (более 60 %) заполнение детектируемыми биологическими объектами активированной поверхности сенсора [5].

Увеличить добротность колебаний микроосциллятора в жидкой среде и перейти к динамическому режиму работы биосенсора можно путем уменьшения геометрических размеров осциллятора. Однако при уменьшении его размеров до размера зондирующего пучка интерферометра увеличиваются шумы измерительной системы вплоть до полного нарушения работоспособности. Решить эту проблему можно с использованием принципов адаптивной интерферометрии [1], которые снимают ограничение на размер осциллятора и благодаря адаптивным свойствам динамической голограммы снижают собственные шумы измерительной системы [4].

Ключевым элементом адаптивного интерферометра служит динамическая голограмма, записываемая в фоторефрактивном кристалле. В настоящей работе динамическая голограмма записывается в кристалле CdTe:V в ортогональной геометрии [2]. В качестве осциллятора используется АФМ-микрокантилевер прямоугольной формы размером $210 \times 40 \times 7$ мкм³, выполненный из кремния. Для исследования особенностей работы адаптивного интерферометра при детектировании колебаний микроосцилляторов в жидкой среде была изготовлена проточная кювета (рис. 1). Стенки кюветы изготовлены из кварца. На одном из торцов кюветы имеется отверстие, через которое в кювету устанавливается микрокантилевер на поворотном держателе. Ввиду малой мощности излучения, отражаемого от микрокантилевера, и сравнительно большой мощности излучения, отражаемого от окон кюветы, с целью уменьшения собственных шумов адаптивного интерферометра на

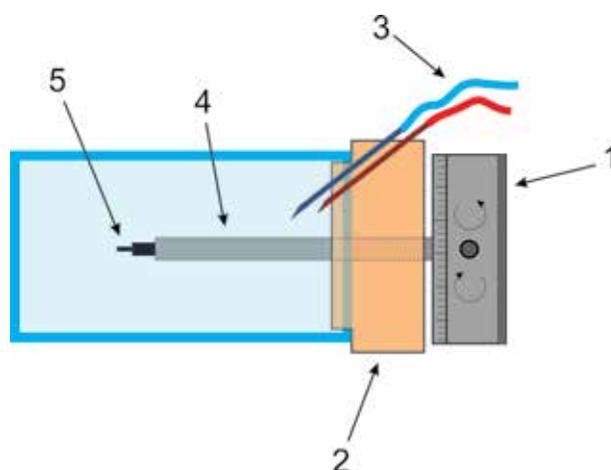


Рис. 1. Жидкостная кварцевая кювета с поворотным держателем микрокантилевера. 1 – поворотная платформа; 2 – фторопластовый корпус кюветы; 3 – каналы для притока и оттока жидкости; 4 – держатель микрокантилевера; 5 – кремниевый микрокантилевер

окна кюветы методом электронно-лучевого испарения нанесено антиотражающее покрытие для длины волны 1064 нм, состоящее из слоев MgF_2 и Al_2O_3 толщиной 193 и 151 нм соответственно. Нанесение антиотражающего покрытия позволило уменьшить мощность излучения, отражаемого от окон кюветы в 12 раз, что упростило процесс юстировки оптической системы и значительно снизило собственные шумы адаптивного интерферометра. Конструкция кюветы предусматривает возможность вращения держателя микрокантилевера внутри кюветы для осуществления юстировки относительно объектного пучка интерферометра. Контроль положения микрокантилевера осуществляется посредством CCD-камеры, установленной за кюветой. В верхней части кюветы сделаны два жидкостных канала для притока и оттока жидкости. В процессе экспериментальной апробации кювета заполнялась раствором Na_2HPO_4 с концентрацией 0,013 М/мл и $pH = 8,6$.

Собственные колебания микрокантилевера возбуждаются лазерными импульсами мощностью 70 мкДж на длине волны 532 нм, длительностью 5 нс, частотой следования 20 Гц. В адаптивном интерферометре излучение непрерывного Nd:YAG-лазера мощностью 14 мВт делится на объектный и опорный пучки. Объектный пучок фокусируется линзой и направляется на микрокантилевер. Размер объектного пучка в месте установки микрокантилевера – 42 мкм. Мощность излучения, отражаемого от поверхности микрокантилевера, составляет не более 0,6 мВт. Колебания микрокантилевера приводят к изменениям фазы волны, отражаемой от микрокантилевера, которые после взаимодействия с опорной волной в фоторефрактивном кристалле преобразовываются в изменения интенсивности, регистрируемые фотоприемником. Сигнал с фотоприемника фиксируется цифровым осциллографом Agilent DSO90404A. Собственная частота колебаний микрокантилевера определяется с помощью анализатора спектра электрических сигналов Agilent PXA9030A. На рис. 2а показана экспериментально зарегистрированная осциллограмма сигнала, соответствующая собственным колебаниям микрокантилевера. Длительность колебаний обычно составляла 100–250 мкс, максимальная глубина модуляции сигнала – 5 %, соотношение сигнал/шум (SNR) = 13,5 дБ. Как видно из Фурье-спектра регистрируемого сигнала, показанного на рис. 2б, колебания микрокантилевера происходят только на собственной частоте первой резонансной моды, составляющей $59,9 \pm 0,3$ кГц при ширине резонансного пика на полувысоте 14 кГц, что соответствует добротности колебаний $Q = 4$. Увеличивая энергию лазерных импульсов, возбуждающих колебания, можно повысить соотношение сигнал/шум, однако при

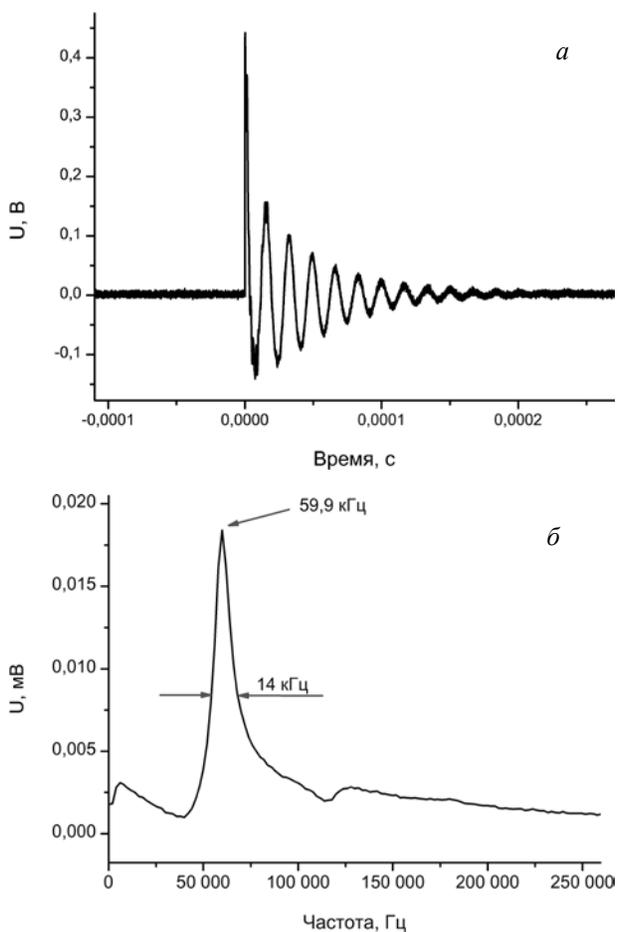


Рис. 2. Осциллограмма колебаний микрокантилевера (а) и Фурье-спектр колебаний микрокантилевера (б)

некотором значении энергии импульсов (как правило, при более 140 мкДж) происходит повреждение микрокантилевера: он частично или полностью отсоединяется от основания. В процессе эксперимента факт деградации механических свойств микрокантилевера можно установить по изменению резонансной частоты. Установлено, что долговременная работа при энергии импульсов 70 мкДж не приводит к повреждению микрокантилеверов, используемых в настоящей работе. Величину соотношения сигнал/шум можно значительно повысить, используя импульсный лазер с высокой частотой следования импульсов. Например, с помощью лазера с частотой следования импульсов 1 кГц можно увеличить SNR примерно в 100 раз.

Таким образом, создан макет лазерного адаптивного интерферометра для детектирования колебаний микроосцилляторов в жидкой среде. Проведена экспериментальная апробация работы адаптивного интерферометра по регистрации колебаний кремниевого микрокантилевера размером $210 \times 40 \times 7$ мкм³ в жидкой среде. Экспериментально зарегистрированы колебания на частоте 59,9 кГц длительностью 200 мкс, с максимальной глубиной модуляции сигнала 5 % и соотношением сигнал/шум 13,5 дБ. Полученные результаты могут быть использованы при создании лазерных высокочувствительных биосенсоров, построенных на принципах адаптивной интерферометрии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Шандаров С.М., Буримов Н.И., Кульчин Ю.Н. и др. Динамические голограммы Денисюка в кубических фоторефрактивных кристаллах // Квантовая электроника. 2008. Т. 38, № 11. С. 1059–1069.
2. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V. et al. Fast adaptive interferometer on dynamic reflection hologram in CdTe:V // Optics express. 2007. Vol. 15, N 2. P. 545–555.
3. Raiteri R., Grattarola M., Butt H.J. et al. Micromechanical cantilever-based biosensors // Sens. Actuators, B: Chemical. 2001. Vol. 79, N 2/3. P. 115–126.
4. Shandarov S.M., Kolegov A.A., Burimov N.I. et al. Two-wave mixing on reflection dynamic gratings in sillenite crystals under phase modulation of signal beam // Physics of Wave Phenomena. 2009. Vol. 17, N 1. P. 39–44.
5. Waggoner P.S., Craighead H.G. Micro- and nanomechanical sensors for environmental, chemical, and biological detection // Lab. on a Chip. 2007. Vol. 7, N 10. P. 1238–1255.