

**Аханова Н.Е.<sup>1,2</sup>, Дарзбек С.А.<sup>3</sup>, Желкобаев Ж.Е.<sup>3</sup>,  
Габдуллин М.Т.<sup>1,2</sup>, Ерланулы Е.<sup>1,2\*</sup>, Батрышев Д.Г.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа,  
Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы,  
\*e-mail: yerlanuly@physics.kz

<sup>2</sup>АО «Казахстанско-Британский технический университет», Казахстан, г. Алматы

<sup>3</sup>АО «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума»,  
Россия, г. Москва

## **РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ ИЗМЕРЕНИЯ В НАНОДИАПАЗОНЕ**

Работа посвящена измерению линейных смещений в нанодиапазоне, анализу особенностей такого рода работ, обеспечению единства измерений и стабильности измеряемой физической величины, достоверности результатов и их привязки к Госэталоном. Рассмотрены критерии, которым должны соответствовать методы и средства прецизионных измерений в нанодиапазоне, а также методы и средства съема и представления обработки получаемой информации. Сделан анализ основных источников погрешностей. Результаты этих исследований представлены в работе [1]. Рассмотрены особенности построения измерительных комплексов, а также вопросы калибровки фазовых измерений в оптике. Рассмотрены вопросы прикладного характера: измерение реальных перемещений объектов в нанодиапазоне, определения их скорости и ускорения, а также вопросы внедрения разработанных методов в область практического применения. Приведены результаты, полученные при решении экспериментальных и прикладных задач с использованием метода и средств численного гетеродинамирования. Разработанная измерительная система «интерферометр-фазометр», позволяет исследовать, в реальном масштабе времени, сложные пьезокерамические структуры используемых в различных устройствах в качестве актюаторов.

**Ключевые слова:** лазер, линейное перемещение, нанодиапазон, интерферометр, угол фазового сдвига (УФС).

Akhanova N.E.<sup>1,2</sup>, Darzбек S.A.<sup>3</sup>, Zhelkobaeв J.E.<sup>3</sup>,  
Gabdullin M.T.<sup>1,2</sup>, Erlanuly E.<sup>1,2\*</sup>, Batryshev D.G.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>National nanotechnology laboratory of open type,  
Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty,  
\*e-mail: yerlanuly@physics.kz

<sup>2</sup>JSC "Kazakh-British Technical University", Kazakhstan, Almaty

<sup>3</sup>JSC "Research Center for the Study of Surface and Vacuum Properties", Russia, Moscow

### **Development of a nanoscale measurement system**

The work is devoted to measuring linear displacements in the nanoscale, analyzing the features of this kind of work, ensuring the unity of measurements and stability of the measured physical quantity, the reliability of the results and their linkage to the State Standard. The criteria that must be met by methods and means of precision measurements in the nanoscale, as well as methods and means for acquiring and presenting the information obtained. The analysis of the main sources of errors is made and the results of these studies are presented in [1]. The features of the construction of measuring systems, as well as the problems of calibration of phase measurements in optics, are considered. The problems of an applied nature are considered: the measurement of real displacement of objects in the nanoscale, their speed and acceleration, as well as the introduction of the developed methods into the field of practical application.

The results obtained in solving experimental and applied problems using methods and means of numerical heterodyning are presented. The developed "interferometer-phase meter" measuring system allows online investigating of complex piezoceramic structures used in various devices as actuators.

**Key words:** laser, linear displacement, nanoscale, interferometry, phase shift angle (PSA).

Аханова Н.Е.<sup>1,2</sup>, Дарзбек С.А.<sup>3</sup>, Желкобаев Ж.Е.<sup>3</sup>,  
 Ғабдуллин М.Т.<sup>1,2</sup>, Ерланұлы Е.<sup>1,2\*</sup>, Батрышев Д.Г.<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Ашық типті нанотехнологиялар зертханасы,  
 әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.,  
 \*e-mail: yerlanuly@physics.kz

<sup>2</sup>«Қазақстан-Британ техникалық университеті» АҚ, Қазақстан, Алматы қ.

<sup>3</sup>«Беттік және вакуумдық қасиеттерді зерттеудің ғылыми орталығы» АҚ, Ресей, Мәскеу қ.

### Наномадиализондағы өлшеу жүйесін әзірлеу

Жұмыс нанодиапазонда сызықтық орын ауыстыруларды өлшеуге арналған, осындай жұмыстар талдауларының ерекшеліктері өлшеу тұтастығы мен өлшенетін физикалық өлшем тұрақтылығы және нәтижелер нақтылығы мен олардың Мемлекеттік эталонға байланысын қамтамасыз ету. Нанодиапазонда прецизионды өлшемдер тәсілі мен әдістеріне, сондай-ақ орым тәсілі мен әдістеріне сәйкес болуы және алынатын ақпараттың өңделуіне ұсынылу шарттары қарастырылған. Негізгі қателік көздеріне талдау жасалынды. Бұл зерттеулер нәтижелері [1] жұмыста келтірілген. Өлшеулер кешендерінің құрылу ерекшеліктері, сонымен қатар оптикадағы фазалық өлшеулерді калибрлеу сұрақтары қарастырылды. Қолданбалы сипатының сұрақтары: нанодиапазонда нақты объектілердің орын ауыстыруын өлшеу, олардың жылдамдығы мен үдеуін анықтау, сонымен қоса практикалық қолданылу аймағында құрастырылған әдістерді енгізу мәселелері қарастырылды. Сандық гетеродинамикалық құралы мен әдісін қолдану арқылы тәжірибелік және қолданбалы есептерді шешу кезінде алынған нәтижелер келтірілген. Құрастырылған «интерферометр-фазометр» жүйесі уақыттың нақты масштабында актюатор есебінде әртүрлі қондырғыларда пайдаланылатын күрделі пьезокерамикалық құрылымын зерттеуге мүмкіндік береді.

**Түйін сөздер:** лазер, сызықтық орын ауыстыру, нанодиапазон, интерферометр, фазалық жылжу бұрышы (ФЖБ).

### Введение

Развитие наукоемких технологий немислимо без создания высокочувствительных методов и высокоточных средств измерений линейных размеров и контроля прецизионных перемещений объектов в нанодиапазоне. При этом должны быть достигнуты предельно возможные степени точности и обеспечен соответствующий метрологический уровень.

Прецизионное измерение сверхмалых перемещений необходимо для проведения фундаментальных работ, связанных с созданием нового поколения взаимосвязанных эталонов в области механических и акустических величин, при исследовании квантово-размерных эффектов, высокостабильных источников когерентного излучения, калибровки актюаторов микро и нанодиапазона и контроля техногенно – опасных объектов с целью обеспечения экологического баланса окружающей среды.

Оптимальным решением этих проблем, в долговременной перспективе, может стать внедрение в практику линейных измерений методов и средств оптической (лазерной) интерферометрии

(интерферометрии) (нанометрии), опирающихся на фундаментальные константы и эталоны физических величин [1, 2, 3].

Фазовые (интерференционные) методы в оптике используются для измерений пространственно-временных изменений величины разности фаз – угла фазового сдвига (УФС) в интерференционном поле между измерительным и опорным пучками, обусловленных частотной, пространственной или поляризационной дисперсией излучения в фазовом объекте [3-8].

Оптическая (лазерная) интерферометрия – фазометрия (нанометрия), совместно с высококоразвитой техникой фазометрии радиодиапазона, дает возможность создать высокоточные измерительные системы и заложить основы для обеспечения единства линейных измерений в микрометровом и нанометровом диапазонах, а также в радио и оптическом диапазонах

Это дало возможность создать, новый класс измерительных средств и методов, отвечающих высоким метрологическим требованиям нанотехнологий и обладающих широкими возможностями для удовлетворения запросов науки и техники в области высокоточных измерений, т.е.

соответствовать широкому спектру требований наукоемких технологий, в том числе нанотехнологий.

В данной работе разработана структура и функциональная схема фазоизмерительной системы в нанодиапазоне. Проведено измерение реальных перемещений объектов в нанодиапазоне и рассмотрены вопросы практического применения разработанных методов.

### Экспериментальная установка

На основе анализа и обсуждения была разработана линейная система измерений ЛИС-01М. Данная система включает в себя:

- стабилизированный гелий-неоновый лазер;
- интерференционный оптический преобразователь;
- фотоприёмное устройство (ФПУ);
- электронно-фазометрическую систему (ЭФС);

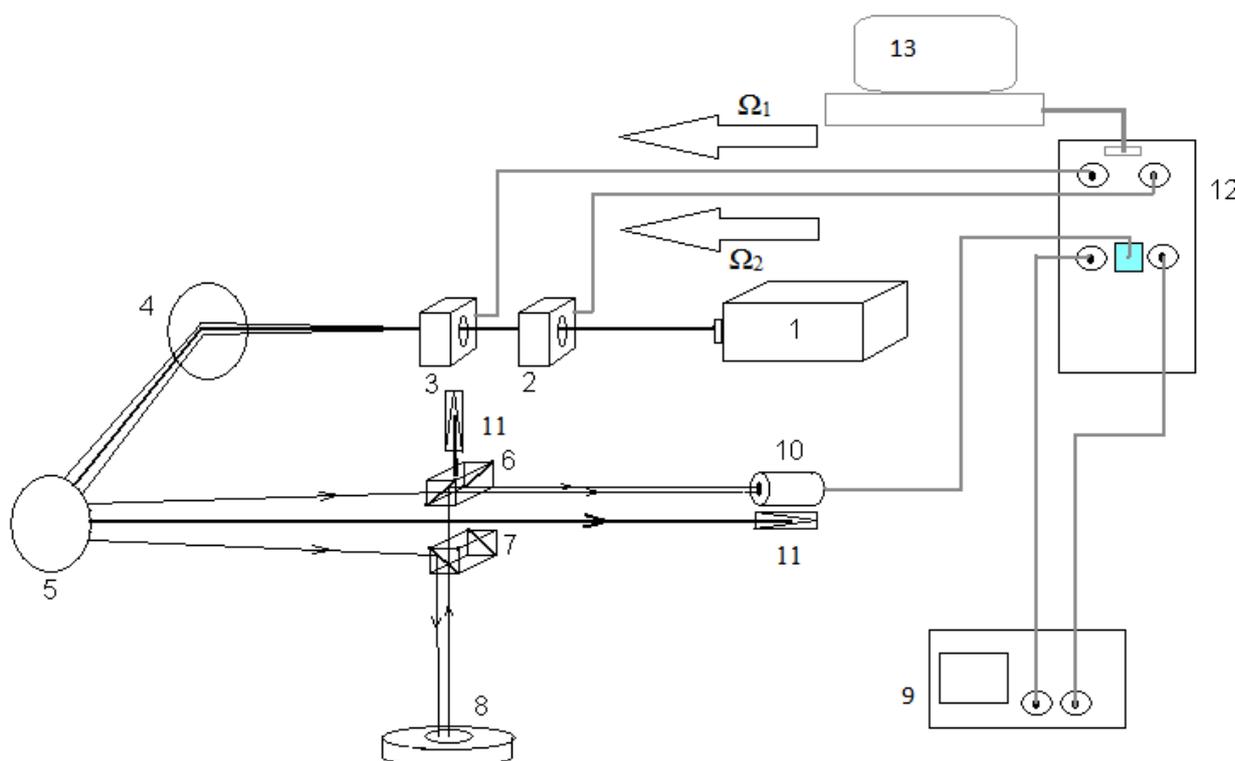
- блок высокочастотных генераторов (ВЧГБ);
- интерфейс связи;
- персональный компьютер;
- программное обеспечение.

ЛИС обеспечивает работу в режиме измерений перемещений  $\Delta X$  в реальном масштабе времени путем счета фазовых циклов (ФЦ) и добавленного к ним так называемого угла фазового сдвига (УФС)  $\Delta\varphi$ :

$$\Delta X = \left( N + \frac{\Delta\varphi}{2\pi} \right) \cdot \frac{\lambda}{2n} \quad (1),$$

где  $N$  – фазовые циклы ( $N=0,1,2,3,\dots,N$ ),  $\Delta\varphi$  – угол фазового сдвига.

Оптическая система ЛИС представляет собой двулучевой модифицированный интерферометр Майкельсона. Функциональная схема ЛИС представлена на рисунке 1.



1 – лазер ЛГН 302; 2, 3- АОМ; 4, 5 – зеркала; 6, 7 – светоделительные элементы;  
8 – образец с нанесённым отражающим покрытием; 9 – осциллограф; 10 – фотоприёмник;  
11 – поглотитель нерабочего пучка; 12 – ЭФС; 13 – ПК и/или ноутбук

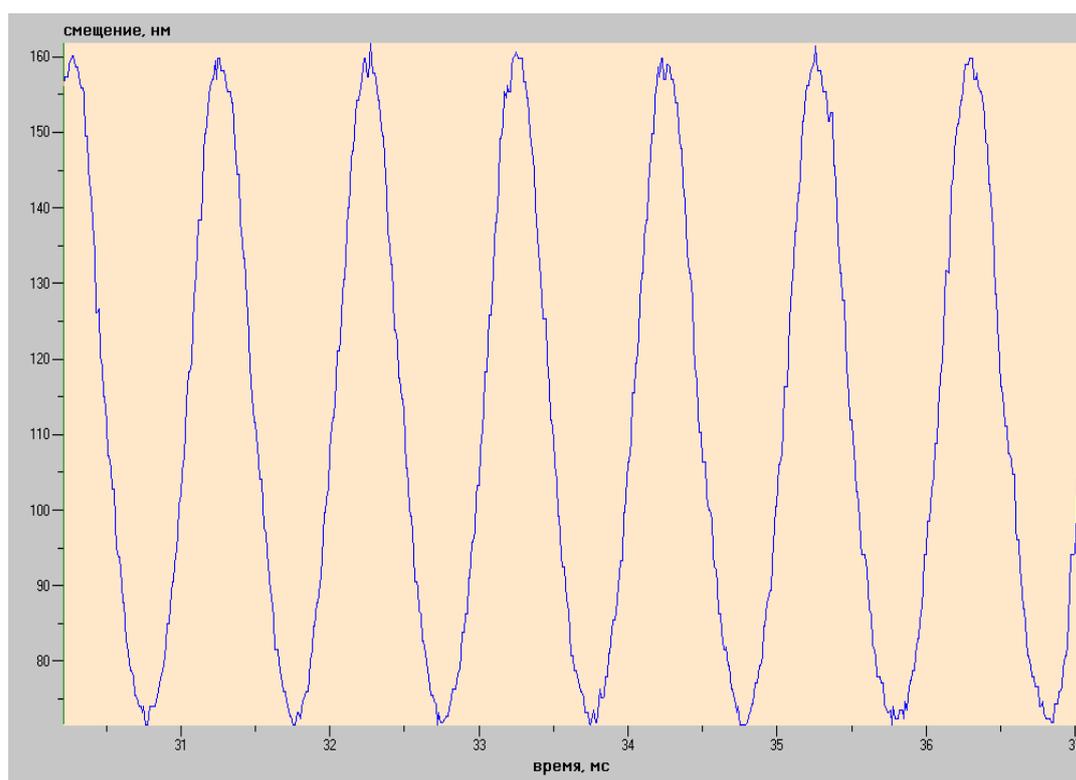
**Рисунок 1** – Структурно-функциональная схема ЛИС-01М

ЛИС обладает диапазоном измерений линейных перемещений  $10^{-9}$ - $10^{-2}$  м, с дискретностью отсчёта 0,1 нм и быстродействием обусловленной выбранной разностной частотой. Диапазон абсолютной погрешности измерений, в зависимости от диапазона, укладывается в промежуток от 0,5 до 3 нм. Такие технические характеристики дают возможность решать широкий спектр задач.

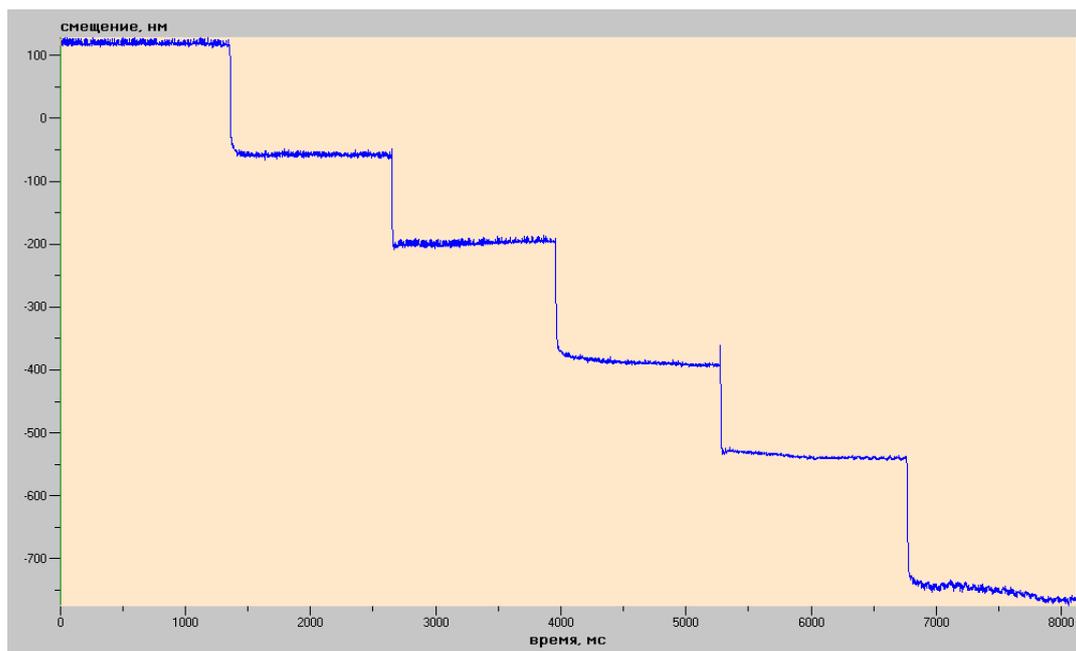
### Эксперимент и обсуждение

Оптический пучок, с частотой  $\omega_0$  (нулевой пучок), проходя через первый модулятор под углом Брэгга, дифрагирует на бегущей с частотой  $\Omega_1$  дифракционной решетке, разделяясь на два пучка с частотами  $\omega_0$  и  $\omega_0 + \Omega_1$  (плюс первый пучок). Далее нулевой пучок проходит через второй модулятор с частотой  $\Omega_2$  под углом Брэгга и разделяется опять на два пучка с частотами  $\omega_0$  и  $\omega_0 - \Omega_2$  (минус первый пучок). Таким образом,

на выходе АОМ мы получаем три пучка: нулевой, плюс первый и минус первый. Один из полученных пучков (например, плюс первый), падая на образец и отражаясь, получает информацию о перемещениях объекта в виде набега угла фазового сдвига  $\Delta\phi$  (информационный пучок); другой пучок проходит свой оптический путь, не соприкасаясь с образцом (опорный пучок). Нулевой пучок поглощается дополнительным устройством (см. рис. 2). Далее информационный и опорный пучки интерферируют, падая на фотоприемное устройство (ФПУ). Последующее выделение информационного сигнала происходит на разностной частоте  $|\Omega_1 - \Omega_2|$  в ФПУ. Обработка полученной информации производится в специализированной электронно-фазометрической системе (ЭФС). ЭФС подключен к персональному компьютеру. Программное обеспечение позволяет в режиме диалога осуществлять сбор измерительных данных, их обработку и представление в виде, удобном для пользования.



**Рисунок 2** – График смещения свободного конца пьезостолбика при подаче синусоидального колебания ( $f \approx 1$  кГц;  $U = 6$  В)



**Рисунок 3** – График смещения свободного конца пьезостолбика при подаче напряжения шагом 10В в диапазоне от 0 до 50В

Ниже приведены данные, полученные с использованием гетеродинного метода измерений смещений в нанодиапазоне. В частности, измерение колебательного смещения свободного конца пьезостолбика при подаче на него модулирующего сигнала различной частоты и формы.

### Вывод

Таким образом, разработан лазерный цифровой фазометр, работающий в широком спектральном диапазоне, предназначенные для калибровки и аттестации лазерных измерителей

линейных перемещений, а также для измерения амплитуд колебательного движения поверхности твердого тела и, обеспечивающие единство измерений в нанометровом диапазоне. Разработанная измерительная система «интерферометр-фазометр», позволяет исследовать, в реальном масштабе времени, сложные пьезокерамические структуры используемых в различных устройствах в качестве актюаторов.

*Благодарность.* Данная работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Республики Казахстан в рамках гранта AP05133211.

### Литература

- 1 Дарзбек С.А., Желкобаев Ж., Календин В.В., Новиков Ю.А. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений // Труды ИОФАН им. А.М. Прохорова, РАН. – 2006. – Том. 62. – С.14-35.
- 2 Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1970. – 856 с.
- 3 Карташев А.И., Эцин И.Ш. Методы измерения малых изменений разности фаз в интерференционных устройствах // УФН. – 1972. – Том. 106, Вып.4. – С. 687–721.
- 4 Галахова О.П., Колтик Е.Д., Кравченко С.А. Основы фазометрии. – М.: Энергия, 1976. – 250 с.
- 5 Мустель Е.Р., Парыгин В.Н. Методы модуляции и сканирования света. – М.: Наука, 1970. – 295 с.
- 6 Мезон У. Физическая акустика. Том VII. – М.: Мир, 1974. – 432 с.
- 7 Корпел А. Акустооптика. – М.: Мир, 1988. – 240 с.
- 8 Магдич Л.Н., Молчанов В.Я. Акустооптические явления и их применение. – М.: Советское радио, 1978. – 112 с.

### References

- 1 S.A. Darznek, ZH. Zhelkobayev, V.V. Kalendin, Yu.A. Novikov, Lazernyy interferometricheskyy izmeritel' nanopremeshcheniy, Trudy IOFAN im. A.M. Prokhorova, RAN, 62, 15-35 (2006). (in Russ).
- 2 M. Born, E. Vol'f Osnovy optiki (Moskva, Nauka, 1970), 856s. (in Russ).
- 3 A.I. Kartashev, I.SH. Etsin, UFN, 106 (4), 687–721 (1972). (in Russ).
- 4 O.P. Galakhova, Ye.D. Koltik, S.A. Kravchenko Osnovy fazometrii (Moskva, Energiya, 1976), 250s. (in Russ).
- 5 Ye.R. Mustel', V.N. Parygin Metody modulyatsii i skanirovaniya sveta (Moskva, Nauka, 1970), 295s. (in Russ).
- 6 U. Mezon Fizicheskaya akustika. Tom VII (Moskva, Mir, 1974), 432s. (in Russ).
- 7 A. Korpel Akustooptika (Moskva, Mir, 1988), 240s. (in Russ).
- 8 L.N. Magdich, V.YA. Molchanov Akustoopticheskiye yavleniya i ikh primeneniye (Moskva. Sovetskoye radio, 1978), 112s. (in Russ).