

Р.В. РОМАШКО

## Адаптивная голографическая интерферометрия: техника, прогресс и приложения

*Представлен обзор цикла исследований, направленных на развитие методов адаптивной интерферометрии, базирующейся на использовании динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах. Полученные в ходе исследования результаты позволили добиться существенного прогресса в эффективности методов адаптивной интерферометрии, повышения их чувствительности, стабильности и помехозащищенности. Предложенные новые схемы двух-, трех- и многоволновых взаимодействий на динамических голограммах стали основой построения поляризационно- и энергонезависимых, а также многоканальных адаптивных лазерных измерительных систем, что открыло перспективы их применения при решении практических задач в области инженерной и технической диагностики, неразрушающего контроля, биосенсорики, нанометрии и акустических измерений.*

*Ключевые слова: адаптивная интерферометрия, динамическая голограмма, нанометрия, биосенсорика, акустические измерения, неразрушающий контроль.*

**Adaptive holographic interferometry: technique, progress and applications.** R.V. ROMASHKO (Institute of Automation and Control Processes, FEB RAS, Far Eastern Federal University, Vladivostok).

*The paper provides a review of a series of studies aimed at the development of adaptive interferometry methods based on the use of dynamic holograms formed in photorefractive crystals. The results obtained in the course of the study made it possible to achieve significant progress in increasing the efficiency of adaptive interferometry methods, increasing their sensitivity, stability and noise immunity. The proposed new schemes of two-, three- and multi-wave interactions on dynamic holograms became the basis for constructing polarization- and non-volatile, as well as multichannel adaptive laser measuring systems, which opened up prospects for their application in solving practical problems in the field of engineering and technical diagnostics, non-destructive testing, biosensorics, nanometry and acoustic measurements.*

*Key words: adaptive interferometry, dynamic holograms, nanometry, biosensorics, acoustic measurements, non-destructive testing.*

### Введение

Неразрушающее исследование и мониторинг материалов и компонентов устройств нано-, микро- и оптоэлектроники, а также структурных элементов технических и инженерных конструкций в процессе их изготовления и/или эксплуатации является чрезвычайно важной и актуальной задачей современной науки и техники. Лазерные измерительные технологии находят широкое применение в данных областях, в то время как методы оптической интерферометрии рассматриваются как одни из наиболее чувствительных для регистрации сверхмалых физических величин. Теоретический порог детектирования малых флуктуаций фазы в классическом интерферометре, ограниченный дробовым шумом фотоприемника, составляет  $1,5 \times 10^{-9}$  рад(Вт/Гц)<sup>1/2</sup> [29], что в частности

РОМАШКО Роман Владимирович – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, профессор, директор (Институт автоматизации и процессов управления ДВО РАН, Владивосток, Дальневосточный федеральный университет, Владивосток). E-mail: romashko@iacp.dvo.ru

позволяет регистрировать механические вибрации с амплитудой менее  $0,01 \text{ \AA}$  в полосе частот  $100 \text{ кГц}$  при использовании излучения мощностью  $1 \text{ мВт}$  на длине волны  $500 \text{ нм}$ . Однако для достижения столь высокой чувствительности на практике необходимо решить две основные проблемы. Во-первых, необходимо обеспечить полное сопряжение волновых фронтов интерферирующих волн в плоскости фотоприёмника и, во-вторых, реализовать и постоянно поддерживать квадратурные условия, при которых средняя разность фаз между волнами будет равна  $\pi/2$ . Комплексное решение обеих проблем достигается за счет объединения интерферирующих световых пучков на динамической голограмме, формируемой ими же в фоторефрактивном кристалле (ФРК) [3, 27]. Благодаря конечности времени записи динамической голограммы интерферометрическая система, построенная на ее основе, становится адаптивной, т.е. способной подстраиваться под неконтролируемые изменения внешних факторов и сохранять работоспособность в реальных (внелабораторных) условиях. При этом голографический принцип объединения пучков позволяет обеспечить полное сопряжение абсолютно разных волновых фронтов.

Адаптивные системы на основе динамических фоторефрактивных (ФР) голограмм разрабатываются на протяжении нескольких десятилетий со времени открытия в 1966 г. ФР-эффекта [8]. К настоящему времени создано большое количество вариантов адаптивных интерферометров [28]. Однако до последнего времени их практическое применение было ограничено в силу ряда технических проблем и несовершенства методики [6].

В настоящей статье приводится обзор результатов выполненного в Институте автоматики и процессов управления ДВО РАН (Владивосток) комплекса исследований в области развития методов адаптивной голографической интерферометрии, построения на их основе эффективных сверхвысокочувствительных помехоустойчивых измерительных систем и практического применения таких систем в задачах нанометрии.

### Адаптивная интерферометрия на основе динамических голограмм

Ключевым элементом адаптивного интерферометра служит динамическая голограмма, формируемая в фоторефрактивном кристалле непосредственно при попадании на него оптического излучения [13]. Фоторефрактивными являются материалы, в которых под действием света с неоднородным распределением интенсивности возникают обратимые изменения показателя преломления. Для этого материал должен быть фотопроводящим и обладать электрооптическим эффектом. К настоящему времени фоторефрактивный эффект обнаружен в большом количестве диэлектриков ( $\text{LiNbO}_3$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{TiO}_{20}$ ,  $\text{Bi}_{12}\text{SiO}_{20}$ ,  $\text{BaTiO}_3$ , SBN, KTN и др.), полупроводников (GaAs, GaP, InP, CdTe и др.), жидких кристаллов, а также органических полимеров [4, 15–18]. При формировании динамической голограммы два когерентных световых пучка, пересекаясь и интерферируя между собой внутри кристалла, вызывают появление фотоиндуцированных зарядов, которые, перераспределяясь по его объему в результате диффузии либо дрейфа, формируют пространственный заряд  $\rho^{\text{sc}}(x)$ . В свою очередь электрическое поле  $E^{\text{sc}}(x)$  пространственного заряда вследствие электрооптического эффекта вызывает соответствующее изменение показателя преломления кристалла  $\Delta n(x)$ . Объемный профиль показателя преломления оказывается полностью согласованным с профилем интерференционного светового поля, который и вызвал эти изменения. Таким образом, профиль показателя преломления представляет собой голографическую запись двух интерферирующих волн (рис. 1).

Следует отметить, что динамическое равновесие между распределением интенсивности записывающего света и профилем пространственного заряда устанавливается в течение характерного времени – времени записи голограммы. Если параметры световых волн, формирующих голограмму, изменяются быстро, за время меньше времени записи, то голограмма не успевает следовать за ними. К «быстрым» здесь следует отнести изменения, вызванные воздействием исследуемого объекта (или физической величины). Для

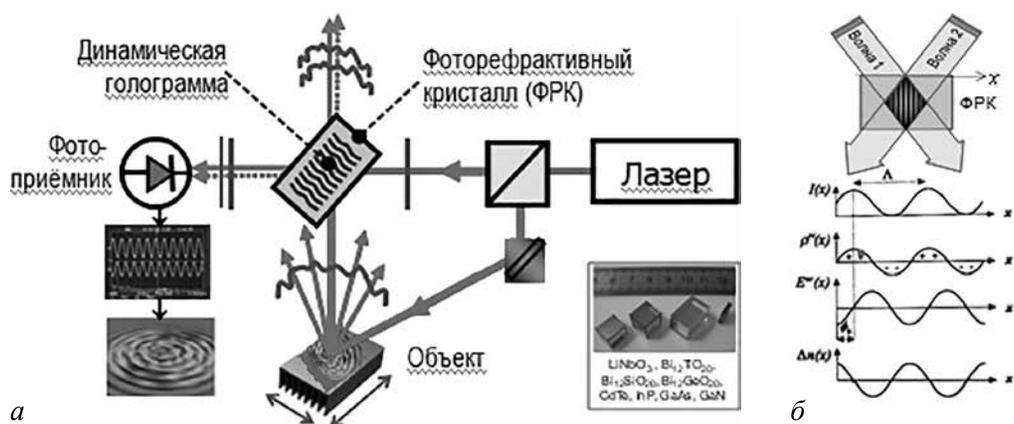


Рис. 1. Схема адаптивного интерферометра на основе двухволнового взаимодействия на динамической голограмме, формируемой в фоторефрактивном кристалле (а), и диаграмма, иллюстрирующая процесс формирования динамической голограммы в ФРК (б). На фото – образцы фоторефрактивных кристаллов

таких изменений голограмма будет «заморожена» (аналог статической голограммы), что обеспечит преобразование на ней световых волн и получение информации об объекте. В противном случае, если параметры световых волн меняются медленно (за время, превышающее характерное время записи), что, как правило, характерно для большинства температурных влияний или, например, медленного накопления механических напряжений в исследуемом объекте, то в кристалле вместо старой запишется новая голограмма. Как результат, изменения параметров световых волн и, следовательно, отрицательное влияние внешних факторов на измерительную систему будут компенсированы изменениями, произошедшими в голограмме. В этом заключается общий принцип адаптивности измерительной системы на основе применения динамических голограмм, формируемых в ФРК.

Повышение эффективности изначально слабого взаимодействия волн на динамической голограмме, формируемой в ФРК, а также обеспечение квадратурных условий такого взаимодействия, необходимых для реализации линейного режима работы адаптивного интерферометра (линейной демодуляции фазы), в классических схемах двухволнового взаимодействия достигается за счет приложения к кристаллу постоянного или переменного электрического поля напряженностью до 10 кВ/см. Необходимость использования такого сильного внешнего электрического поля делает измерительную систему энергозависимой и обуславливает ряд серьезных технических проблем, которые затрудняют, а в ряде случаев делают невозможным практическое применение адаптивного интерферометра в реальных приложениях.

В работе [23] нами предложена новая геометрия двухволнового встречного (отражательного) взаимодействия в фоторефрактивном кристалле кубической симметрии (рис. 2, а), которая позволила полностью отказаться от использования внешнего электрического поля в схеме адаптивного интерферометра. Квадратурные условия здесь реализуются за счет векторного взаимодействия волн с разным типом поляризации (линейной и эллиптической) в условиях анизотропной дифракции, в то время как высокая эффективность взаимодействия и, соответственно, высокая чувствительность интерферометра достигаются за счет высокой пространственной частоты голографической решетки, формируемой в отражательной геометрии. Для кристалла CdTe:V экспериментально показано, что переход от пропускающей к отражательной геометрии позволяет при достаточной концентрации фоторефрактивных центров добиться 5-кратного увеличения чувствительности интерферометра, обеспечив практический порог детектирования фазы в адаптивном интерферометре на уровне всего в 5,7 относительно минимально возможного уровня,

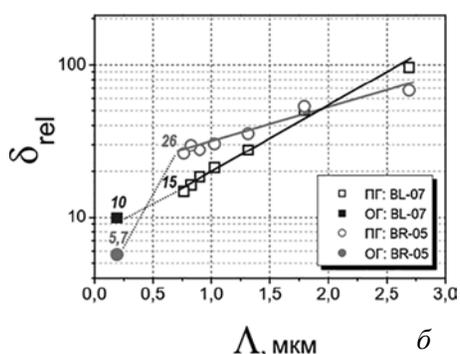
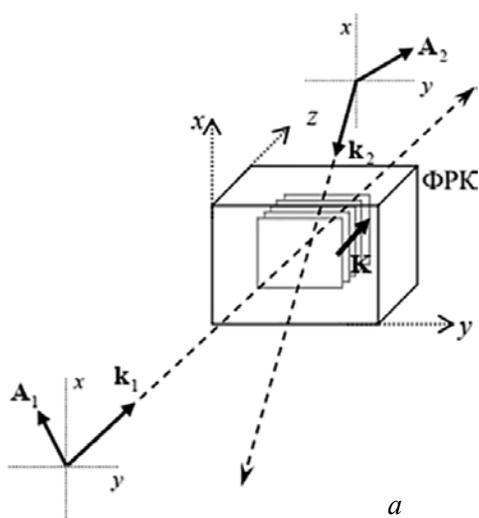


Рис. 2. Геометрия встречного (отражательного) двухволнового взаимодействия в ФРК (а) и зависимость относительного порога детектирования в адаптивном интерферометре от периода голографической решетки, сформированной в пропускающей (ПГ) и отражательной (ОГ) геометриях в двух образцах кристалла CdTe:V (б)

лишь теоретически достижимого в классическом гомодинном интерферометре, свободном от оптических потерь (рис. 2, б) [10].

Эффективность работы любого интерферометра, в том числе адаптивного, определяется состоянием поляризации интерферирующих волн [14, 26]. Взаимодействие же лазерного излучения с объектом исследования может сопровождаться изменением состояния поляризации объектной волны и даже полной ее деполаризацией, что в свою очередь приводит к появлению поляризационного шума в адаптивном интерферометре, нестабильности его работы или полной потере сигнала. В работе [12] нами предложена новая схема ортогонального двухволнового взаимодействия в ФРК (рис. 3, а), которая позволила обеспечить фазовую демодуляцию деполаризованной волны за счет формирования поляризационно-селективной динамической голограммы, а в работе [25] предложена перспективная схема векторного трехволнового 3D-ортогонального взаимодействия, в рамках которой три волны (одна объектная и две опорные), распространяющиеся в трех взаимно перпендикулярных направлениях, формируют две поляризационно-селективные голограммы (рис. 3, б). Комплементарная работа этих голограмм, сформированных взаимно ортогональными поляризационными компонентами объектной волны, позволяет полностью снять зависимость адаптивного интерферометра от состояния поляризации объектной волны (рис. 3, в). Как следствие, в адаптивном интерферометре устраняются поляризационные шумы, снижается порог детектирования, повышается стабильность его работы.

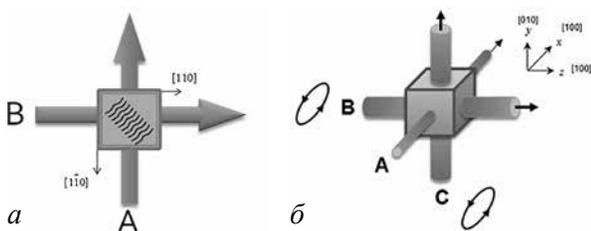
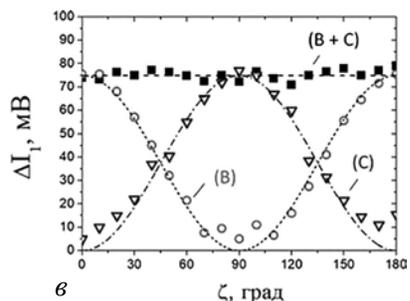


Рис. 3. Ортогональная геометрия двух- (а) и трехволнового (б) взаимодействия в фоторефрактивном кристалле; зависимость амплитуды выходного сигнала адаптивного интерферометра на основе трехволнового ортогонального 3D-взаимодействия от состояния поляризации объектной волны А (в): видно, что при наличии опорных волн В и С сигнал перестает зависеть от поляризации объектной волны



При создании многомерных адаптивных измерительных систем, состоящих из большого числа сенсоров (измерительных каналов), возникает необходимость в использовании соответствующего количества как фоторефрактивных кристаллов, так и опорных световых пучков, что влечет за собой нежелательное усложнение измерительной системы. Технические проблемы, возникающие при мультиплексной записи динамических голограмм в одном ФРК, в известных подобных системах ограничивают число мультиплексируемых голограмм несколькими единицами (от 2 до 4). В этой связи нами предложена новая схема [6, 11] и разработаны принципы сверхплотного мультиплексирования динамических голограмм в фоторефрактивном кристалле с потенциалом множественной записи до  $10^4$  голограмм [7], что открывает перспективы создания высокоэффективных адаптивных интерферометрических систем с большим количеством каналов. В работе [19] на основе этих принципов практически реализован 32-канальный адаптивный интерферометр с уровнем перекрестных помех между каналами не более  $-40$  дБ.

### Методы адаптивной интерферометрии в прикладных задачах

Методы адаптивной интерферометрии и динамической голографии открывают новые перспективы решения прикладных научно-технических задач. Так, с использованием развитых в рамках данного цикла исследований методов в работе [5] предложена и экспериментально реализована система измерения массы микро- и нанообъектов на основе резонансного микровзвешивания (рис. 4, а). Чувствительным элементом системы является микрокантилевер, к которому присоединяются объекты, подлежащие взвешиванию. Собственные колебания микрокантилевера возбуждаются лазерным импульсом. Детектирование колебаний осуществляется с помощью адаптивного голографического интерферометра, ключевой элемент которого – динамическая голограмма – формируется в фоторефрактивном кристалле CdTe. Присоединение объектов взвешивания к микрокантилеверу приводит к изменению частоты его собственных колебаний, что регистрируется с помощью адаптивного интерферометра. Зарегистрированное в работе изменение массы присоединенных микро- и наночастиц составило  $(420 \pm 9) \times 10^{-12}$  г, а точность измерения –  $8,5 \times 10^{-12}$  г. Чувствительность измерительной системы к изменению массы –  $1,7 \times 10^{12}$  Гц/г. Экспериментально продемонстрирована возможность увеличения чувствительности системы в  $6,5 \times 10^6$  раз и снижения порога детектирования массы в  $1,5 \times 10^7$  раз за счет использования микрокантилеверов субмикрометровых размеров. Это открывает перспективы для регистрации сверхмалых объектов, таких как отдельные молекулы ДНК/РНК. Так, биосенсоры, реализованные на основе данного подхода (рис. 4, б), были использованы для обнаружения в растворе белка БСА – бычьего сывороточного альбумина (рис. 4, в) [1].

Принципы адаптивной голографической интерферометрии позволяют на совершенно новом качественном уровне решать задачи неразрушающего технического контроля и диагностики. Волоконные световоды, выполняя функцию чувствительных элементов, могут быть интегрированы, в частности, в объект контроля (например, в элементы из полимерных композиционных материалов), в то время как высокая чувствительность интерферометра открывает возможность для регистрации слабых акустических сигналов, в частности сигналов акустической эмиссии, несущих информацию о состоянии объекта. Адаптивные свойства динамической голограммы позволяют проводить такие измерения непосредственно в процессе изготовления или эксплуатации объекта. При этом применение многоканальных адаптивных интерферометрических систем открывает перспективы по реконструкции пространственно-временных распределений деформаций или динамических напряжений по всему объему исследуемого объекта. Так, 32-канальная волоконно-оптическая адаптивная интерферометрическая система томографического типа была успешно применена для регистрации и исследования акустического поля,

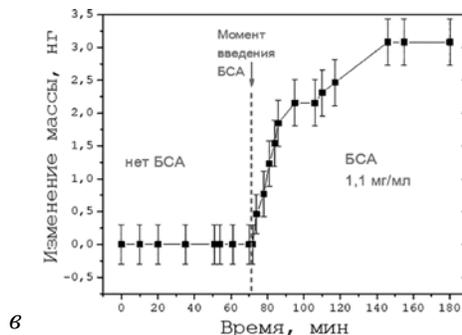
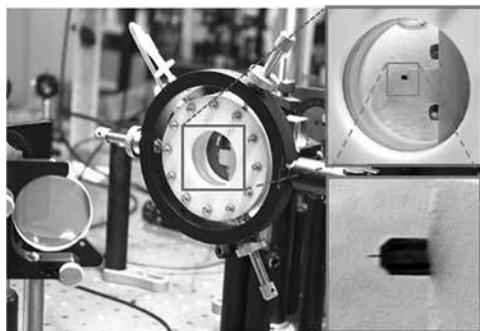
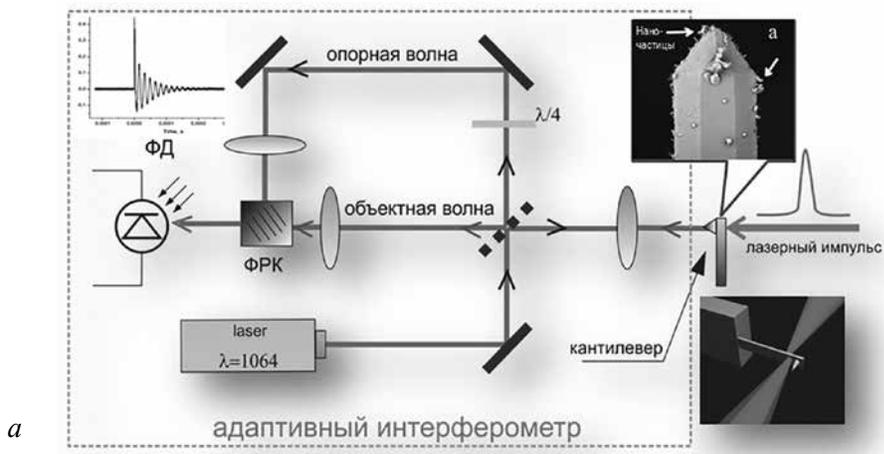


Рис. 4. Схема адаптивной лазерной системы измерения малых масс (а), внешний вид биосенсора, выполненного на его основе (б), и результат регистрации с помощью биосенсора динамики изменения молекул БСА (бычьего сывороточного альбумина) в растворе (в)

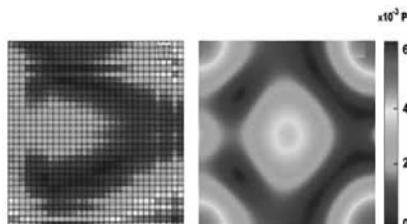
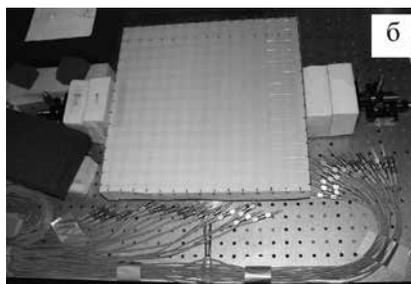
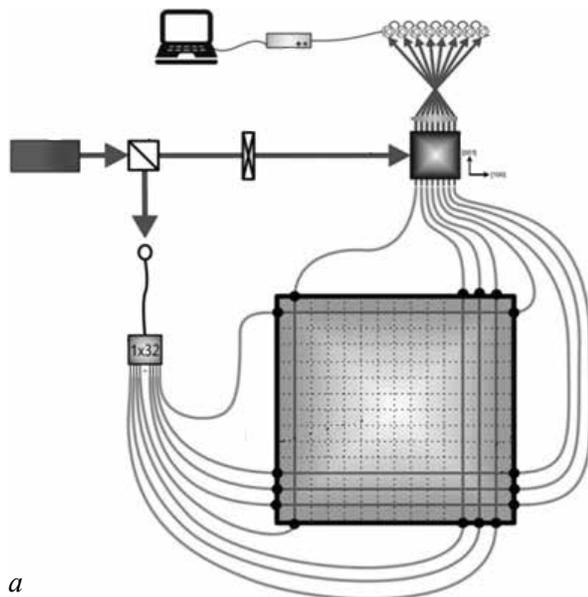


Рис. 5. 32-канальная адаптивная волоконно-оптическая система томографического типа. Схема организации (а), фото фрагмента системы с волоконными сенсорами, уложенными в плите (б), и результат реконструкции акустического поля в плите (в): слева – эксперимент, справа – расчет

распространяющегося в конструкционной полимерной плите (рис. 5) [19], а также для фиксации сигналов акустической эмиссии, возникающих в полимерном композитном материале при его деформациях [9].

На основе адаптивного голографического интерферометра нами также были разработаны уникальные регистраторы акустических колебаний, такие как лазерный микрофон с возможностью детектирования акустического давления менее 1 мПа в динамическом диапазоне до 55 дБ [20], семейство лазерных гидрофонов, включая векторно-фазового типа, способных в условиях реальной морской акватории, в присутствии значительных портовых шумов и при неблагоприятных погодных условиях (ветер, волнение), устойчиво регистрировать слабые гидроакустические сигналы амплитудой от 0,1 Па [21, 22, 24]. Кроме того, разработан адаптивный сейсмограф [2], способный в течение длительного времени обеспечивать режим ожидания сейсмического сигнала, стабильно поддерживая максимальную чувствительность.

## Заключение

Достигнут значительный прогресс в области развития методов адаптивной интерферометрии, базирующейся на применении динамических голограмм, формируемых в фоторефрактивных кристаллах. Разработаны новые принципы и подходы, которые позволили существенно повысить эффективность адаптивных интерферометров, увеличить их чувствительность, снизить шумы, сделать их поляризационно- и энергонезависимыми, а также многоканальными. Это открыло широкие перспективы для их практического применения при решении целого ряда прикладных задач в области инженерной и технической диагностики, неразрушающего контроля, биосенсорики, нанометрии и акустических измерений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ефимов Т., Захаренко А., Кульчин Ю., Ромашко Р. Лазерный биосенсор на основе микромеханических осцилляторов // VII междунар. конф. по фотонике и информ. оптике, Москва, 24–26 янв. 2018 г. М.: НИЯУ «МИФИ», 2018. С. 216–217.
2. Каменев О.Т., Петров Ю.С., Хижняк Р.В., Завестовская И.Н., Кульчин Ю.Н., Ромашко Р.В. Мобильный адаптивный голографический лазерный сейсмограф // Краткие сообщ. по физике / Физ. ин-т им. П.Н. Лебедева РАН. 2017. Т. 44, № 7. С. 27–31.
3. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоторефрактивные кристаллы в когерентной оптике. СПб.: Наука, 1992. 320 с.
4. Петров М.П., Степанов С.И., Хоменко А.В. Фоточувствительные электрооптические среды в голографии и оптической обработке информации. Л.: Наука, 1983. 269 с.
5. Ромашко Р.В., Ефимов Т.А., Кульчин Ю.Н. Лазерная адаптивная голографическая система микровзвешивания нанообъектов // Квантовая электроника. 2014. Т. 44, № 3. С. 269–273.
6. Ромашко Р.В. Физические основы построения сверхвысокочувствительных адаптивных измерительных систем на основе динамических голограмм: дис. ... д. ф.-м. наук / Ин-т автоматки и процессов управления ДВО РАН. Владивосток, 2010. 309 с.
7. Ромашко Р.В., Безрук М.Н., Камшилин А.А., Кульчин Ю.Н. Шестиканальный адаптивный волоконно-оптический интерферометр // Квантовая электроника. 2012. Т. 42, № 6. С. 551–556.
8. Ashkin A., Boyd G.D., Dziedzic J.M., Smith R.G., Ballman A.A., LeVistein J.J., Nassau K. Optically-induced refractive index inhomogeneities in  $\text{LiNbO}_3$  and  $\text{LiTaO}_3$  // Appl. Phys. Lett. 1966. Vol. 9, N 1. P. 72–74.
9. Bashkov O.V., Romashko R.V., Zaikov V.I., Panin S.V., Bezruk M.N., Khun K., Bashkov I.O. Detecting acoustic-emission signals with fiber-optic interference transducers // Rus. J. Nondestructive Testing. 2017. Vol. 53, N 6. P. 415–421.
10. Di Girolamo S., Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.-C. Fast adaptive interferometer on dynamic reflection hologram in  $\text{CdTe:V}$  // Opt. Express. 2007. Vol. 15, N 2. P. 545–555.
11. Di Girolamo S., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Launay J.-C., Kamshilin A.A. Fiber sensors multiplexing using vectorial wave mixing in a photorefractive crystal // Opt. Express. 2008. Vol. 16, N 22. P. 18040–18049.
12. Di Girolamo S., Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Orthogonal geometry of wave interaction in a photorefractive crystal for linear phase demodulation // Opt. Commun. 2010. Vol. 283, N 1. P. 128–131.

13. Gunter P. Holography, coherent light amplification and optical phase conjugation with photorefractive materials // *Phys. Rep.* 1982. Vol. 93, N 4. P. 199–299.
14. Kamshilin A.A., Romashko R.V., Kulchin Y.N. Adaptive interferometry with photorefractive crystals // *J. Appl. Phys.* 2009. Vol. 105, N 3. P. 031101, 1–11.
15. Moerner W.E., Grunnet-Jepsen A., Thompson C.L. Photorefractive polymers // *Ann. Rev. Mat. Sci.* 1997. Vol. 27. P. 585–623.
16. Photorefractive effects, materials, and devices / eds G. Zhang, D. Kip, D.D. Nolte, J. Xu. Wash.: OSA, 2005. 836 p. (OSA trends in optics and photonics; vol. 99).
17. Photorefractive effects, materials, and devices / eds P. Delaye, C. Denz, L. Mager, G. Montemezzani. La Colle-sur-Loup, France: OSA, 2003 (OSA trends in optics and photonics; vol. 87).
18. Photorefractive materials and their applications. 2: Materials / eds P. Gunter, J.-P. Huignard. 2007. 646 p. (Springer series in optical sciences; vol. 114).
19. Romashko R.V., Bezruk M.N., Ermolaev S.A., Storozhenko D.A., Kulchin Y.N. Detecting weak acoustic fields by multichannel fiber-optical sensory system // *Proc. SPIE.* 2016. Vol. 10176. Art. no. 1017612.
20. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Nippolainen E. Highly sensitive and noise-protected adaptive optical microphone based on a dynamic photorefractive hologram // *Laser Physics.* 2014. Vol. 24, N 11. P. 115604.
21. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Bezruk M.N., Ermolaev S.A. Laser adaptive holographic hydrophone // *Quantum Electronics.* 2016. Vol. 46, N 3. P. 277.
22. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Storozhenko D.V., Bezruk M.N., Dzyuba V.P. Laser adaptive vector-phase hydroacoustic measuring system // *Quantum Electronics.* 2021. Vol. 51, N 3. P. 265.
23. Romashko R.V., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Linear phase demodulation via reflection photorefractive holograms // *Photorefractive effects, materials, and devices* / eds G. Zhang, D. Kip, D.D. Nolte, J. Xu. Wash.: OSA, 2005. P. 675–680 (OSA trends in optics and photonics; vol. 99).
24. Romashko R.V., Bezruk M.N., Ermolaev S.A., Zavestovskaya I.N., Kulchin Y.N. Mobile adaptive holographic laser hydrophone // *Bull. of the Lebedev Physics Institute.* 2017. Vol. 44, N 7. P. 205–209.
25. Romashko R.V., Asalkhanova M.A., Kulchin Y.N. Orthogonal three-wave mixing in InP crystal // *Proc. SPIE.* 2016. Vol. 10176. Art. no. 101761U.
26. Romashko R.V., Di Girolamo S., Kulchin Y.N., Kamshilin A.A. Photorefractive vectorial wave mixing in different geometries // *J. Opt. Soc. Am. B.* 2010. Vol. 27, N 2. P. 311–317.
27. Solymar L., Webb D.J., Grunnet-Jepsen A. *Physics and applications of photorefractive materials.* Oxford Univ. Press, 1996. 512 p.
28. Stepanov S.I. Adaptive interferometry: a new area of applications of photorefractive crystals. Ch. 9 // *International trends in optics* / ed. J.W. Goodman. N.Y., L.: Acad. Press, 1991.
29. Wagner J.W., Spicer J. Theoretical noise-limited sensitivity of classical interferometry // *J. Opt. Soc. Am. B.* 1987. Vol. 4, N 8. P. 1316–1326.