



ОСЕВЫЕ СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ: ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, ПРИМЕНЕНИЯ.

ЧАСТЬ II*

А.Белозёров, д.т.н., Н.Ларионов, к.т.н.,
А.Лукин, д.т.н., А.Мельников, к.т.н.,
"НПО "Государственный институт прикладной
оптики", Казань, gipo@telebit.ru

Применение синтезированных голограммных оптических элементов (СГОЭ) будет полезным для решения насущных проблем экспериментальной газодинамики, в том числе при создании оптических систем визуализации газовых потоков в большом поле наблюдения (до 1000 мм).

При исследованиях газодинамических течений необходимо обеспечить возможно больший масштаб моделирования, высокую чувствительность измерений (как предельный случай – до тысячных долей длины волны видимого диапазона спектра) и учесть целый ряд других специфических особенностей, исключить внесение каких-либо изменений в поток за время эксперимента [1].

Осевые СГОЭ нашли свое применение в решении проблем экспериментальной газодинамики. В "НПО "Государственный институт прикладной оптики" ("НПО "ГИПО") под руководством д.т.н. А.Ф.Белозёрова был выполнен комплекс научно-исследовательских работ по применению синтезированных голограмм в интерференционных приборах для визуализации газовых потоков в аэродинамических трубах и баллистических трассах, а также для создания объективов коллиматоров систем оптико-физических измерений (ОФИ). Конкретным исполнителем этих работ стала Л.Т.Мустафина.

Причиной начала подобных исследований явился тот факт, что технологии, положенные в основу разработок теневых, интерференционных и интерференционно-теневых приборов 1 и 2-го поколений, так и не решили

ON-AXIS COMPUTER- GENERATED HOLOGRAM OPTICAL ELEMENTS: HISTORY OF DEVELOPMENT AND USE.

PART II

A.Belozyorov, N.Larionov,
A.Lukin, A.Melnikov,
"NPO "State Institute of Applied Optics", Kazan,
gipo@telebit.ru

Use of computer-generated hologram elements (CGHOEs) could be useful for solving pressing issues of experimental gas dynamics, including development of optical systems for gas flow visualization in a vast observation field (up to 1000 mm).

When conducting research of gas dynamic flows, it is necessary to provide a possibility for a larger modeling scale, absence of any alterations of the flow during the experiment, high sensitivity of measurements (to a limit of a thousandth of a visible spectrum's wavelength) and a series of other specific features [1].

On-axis CGHOEs have found their use in solving problems of experimental gas dynamics. In "NPO "State Institute of Applied Optics" ("NPO "GIPO") under the supervision of A.F. Belozyorov D.Sc. a complex of research efforts has been conducted on using computer-generated holograms in interference instruments for gas flow visualization in wind tunnels and ballistic tracks and to produce collimator objectives for opto-physical measurement systems (OPM). These works were executed by L.T. Mustafina.

The reason for such research was the fact that technologies which became the basis of shadow, interference and shadow-interference instruments of the 1-st and the 2-nd generations did not fully solve the problems set by researchers. It was necessary to equip modern aerodynamic and ballistic installations with such unique systems which would have allowed to experimentally study the processes of flow along models of planes, helicopters, future aircrafts, automobiles, multi-purpose rockets

* Часть I см.: Фотоника, 2014, №4, с.12–32.

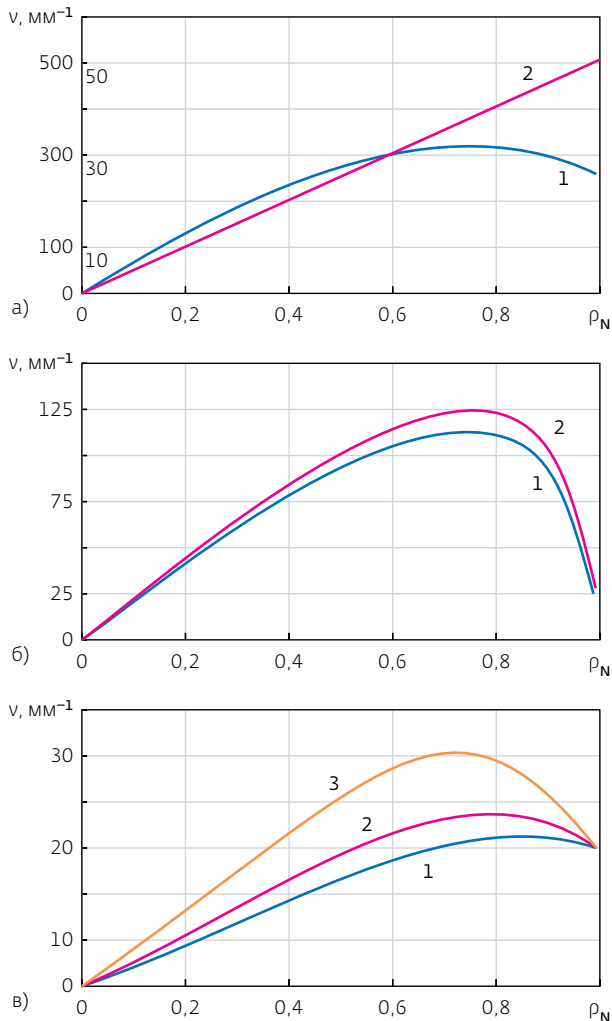


Рис.14. Частотные характеристики голограммных оптических элементов, рассчитанные для различных диаметров световых полей (230, 400 и 800 мм): а – для оптической системы рис.13 а, б (световой диаметр 230 мм, 1 – 0...50 мм⁻¹, 2 – 0...500 мм⁻¹); б – для оптических систем рис.13 в (1 – световой диаметр 230 мм; диаметр голограммы 140 мм; 2 – световой диаметр 400 мм; диаметр голограммы 220 мм); в – для оптической системы рис.13 д (1, 2, 3 – световые диаметры 230, 400, 800 мм соответственно; v – пространственная частота; ρ_N – нормированный радиус голограмм)

Fig. 14. Frequency characteristics of hologram optical elements, estimated for various light field diameters (230, 400 and 800 mm): а – for an optical system on Fig.13 а, б (light diameter 230 mm; 1 – 0...50 mm⁻¹, 2 – 0...500 mm⁻¹); б – for an optical system on Fig.13 в (1 – optical diameter 230 mm; hologram diameter 140 mm; 2 – optical diameter 400 mm; hologram diameter 220 mm); в – for an optical system on Fig.13 д (1, 2, 3 – optical diameters 230, 400, 800 mm accordingly; v – spatial frequency; ρ_N – normalized radius of the hologram)

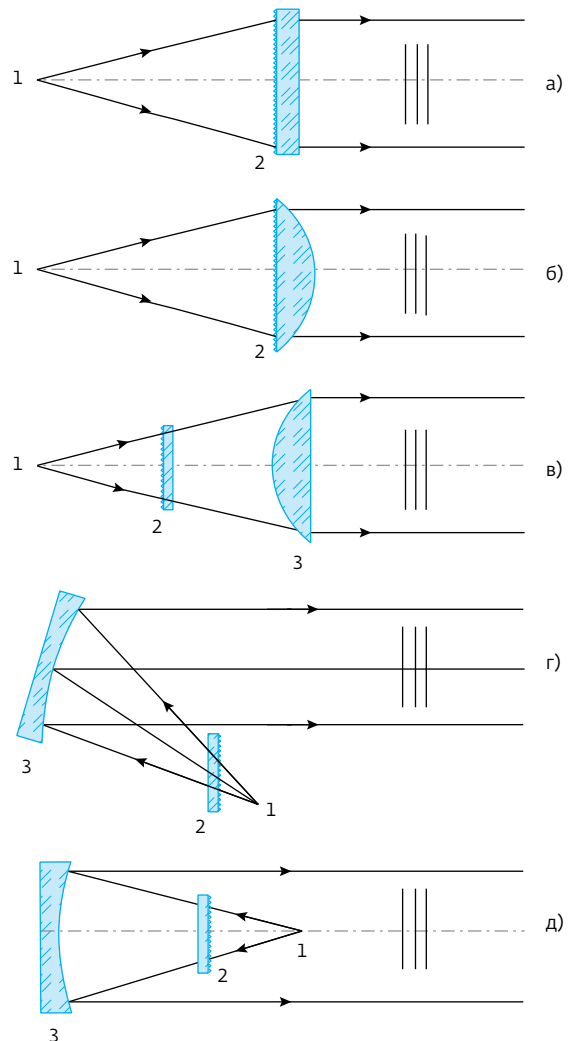


Рис.13. Основные варианты осветительной и приемной частей системы ОФИ: 1 – источник света; 2 – СГОЭ; 3 – оптический элемент

Fig. 13. Main variations of illuminating and receiving parts of an OPM system: 1 – light source; 2 – CGHOE; 3 – optical element

in near-natural conditions [1]. That is why it was required to develop relatively cheap and compact systems for OPM with work field (visualization field) of 800 to 1000 mm and more.

Prior to that a unified series of unique hologram objects have been developed based on the theory of imaging properties of holograms and elements of hologram optics [2, 3] – complex optical systems of two “contrary” collimators of a large sizes. They perform functions of blocks for illuminating and receiving sections of shadow and interference instruments.

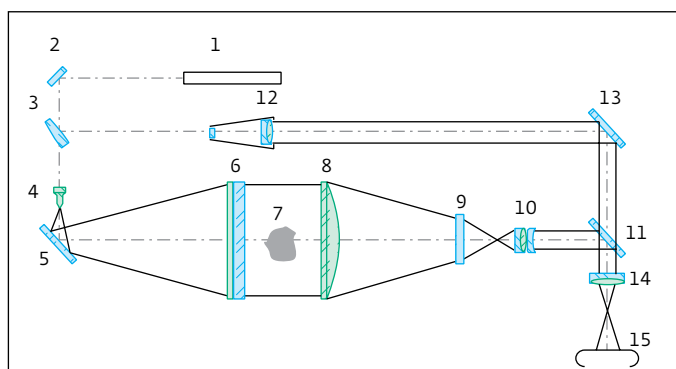


Рис.15. Интерферометр на основе линзового объектива с голограммным компенсатором: 1 – лазер; 2, 5, 13 – плоские зеркала; 3, 11 – светоделители; 4, 10, 14 – объективы; 6 – голограммный объектив (СГОЭ); 7 – фазовый объект; 8 – плоско-выпуклая крупногабаритная линза; 9 – голограммный компенсатор (СГОЭ); 12 – коллиматор; 15 – регистрирующая среда

Fig. 15. Interferometer based on a lens objective with a hologram compensator: 1 – laser; 2, 5, 13 – flat mirrors; 3, 11 – beam splitters; 4, 10, 14 – objectives; 6 – hologram objective (CGHOE); 7 – phase object; 8 – flat-convex large-dimension lens; 9 – hologram compensator (CGHOE); 12 – collimator; 15 – recording environment

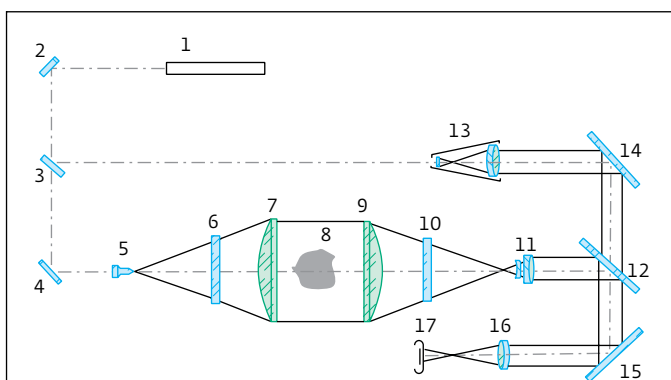


Рис.16. Интерферометр по четырехзеркальной схеме на основе голограммно-линзовых объективов с полем визуализации диаметром 400 мм: 1 – лазер; 2, 4, 14, 15 – зеркала; 5 – микрообъектив; 6, 10 – голограммные компенсаторы (СГОЭ); 7, 9 – плоско-выпуклые линзы диаметром 400 мм; 8 – фазовый объект; 11, 16 – объективы; 3, 12 – светоделители; 13 – телескопическая система; 17 – регистрирующая среда

Fig. 16. Interferometer with a four-mirror scheme based on hologram lens objectives with a 400 mm diameter visualization field: 1 – laser; 2, 4, 14, 15 – mirrors; 5 – micro objective; 6, 10 – hologram compensators (CGHOE); 7, 9 – flat-convex lenses with a 400 mm diameter; 8 – phase object; 11, 16 – objectives; 3, 12 – beam splitters; 13 – telescopic system; 17 – recording environment

до конца поставленных исследователями задач. Необходимо было оснастить современные аэродинамические и баллистические установки такими уникальными системами, на базе которых можно было бы экспериментально изучать процессы обтекания моделей самолетов, вертолетов, летательных аппаратов будущего, автомобилей, ракет различного назначения в условиях, приближенных к натурным [1]. Поэтому требовалось создать сравнительно дешевые и компактные системы для ОФИ с размерами рабочего поля (поля визуализации) 800-1000 мм и более.

Ранее на основе теории отображающих свойств голограмм и элементов голограммной оптики [2, 3] был разработан унифицированный ряд уникальных голограммных объективов – сложных

Use of hologram objectives in modern OPM systems gave them new properties and considerably increased their technical parameters: diameter of the studied gas flow – 230 to 1000 mm and extremely high values of relative aperture obtained in collimator objectives (from 1:3,5 to 1:2 and even to 1:1). Similar systems are developed in gas dynamics laboratories of world's leading aerospace companies.

In basic variations of principal schemes of technical formation of the object branch of OPM holographical systems (Fig. 13) CGHOEs are used either as main objectives (a,b), or as compensators (c-e). When making instruments, combined use of such objectives is also possible because their aberrational characteristics differ substantially.

СГОЭ – синтезированный голограммный оптический элемент

ГОЭ – голограммный оптический элемент

ОФИ – оптико-физическое измерение

ОАО – открытое акционерное общество

НПО – научно-производственное объединение

ГИПО – Государственный институт прикладной оптики

CGHOE – computer-generated hologram optical element

HOE – hologram optical element

OPM – opto-physical measurement

OJSC – open joint-stock company

NPO – scientific production association

GIPO – State Institute of Applied Optics



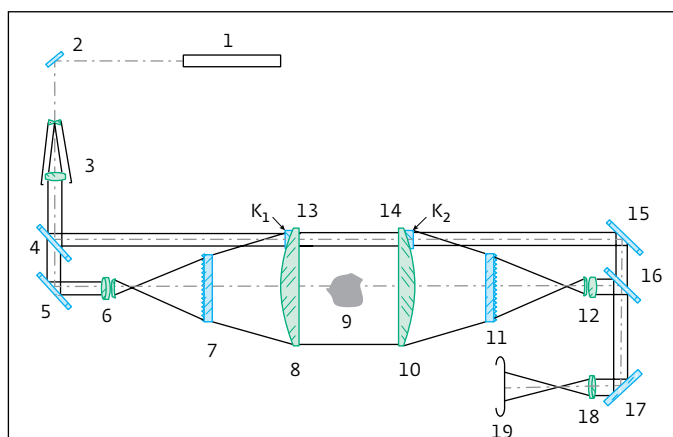


Рис.17. Функциональная оптическая схема интерферометра на основе голограммно-линзовых объективов диаметром 400 мм: 1 – лазер; 2, 5, 15, 17 – плоские зеркала; 3 – телескопическая система; 4, 16 – светоделители; 6, 12, 18 – объективы; 7, 11 – голограммные компенсаторы (СГОЭ); 8, 10 – плоско-выпуклые линзы диаметром 400 мм; 9 – фазовый объект; 13, 14 – основные объективы с элементами (оптические клинья K_1 и K_2) для прохождения опорного пучка; 19 – регистрирующая среда

Fig. 17. Functional optical scheme of an interferometer based on hologram lens objectives with a 400 mm diameter: 1 – laser; 2, 5, 15, 17 – flat mirrors; 3 – telescopic system; 4, 16 – beam splitters; 6, 12, 18 – objectives; 7, 11 – hologram compensators (CGHOE); 8, 10 – flat-convex lenses with a 400 mm diameter; 9 – phase object; 13, 14 – main objectives with elements (optical wedges K_1 and K_2) for a reference beam passage; 19 – recording environment

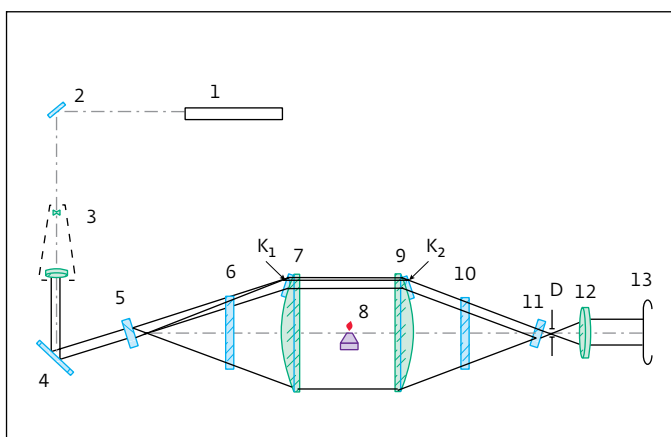


Рис.18. Схема интерферометра с полем визуализации диаметром 400 мм с применением светоделительных СГОЭ: 1 – лазер; 2, 4 – плоские зеркала; 3 – телескопическая система; 5, 11 – светоделительные СГОЭ; 6, 10 – голограммные компенсаторы СГОЭ; 7, 9 – плоско-выпуклые линзы основных объективов; 8 – фазовый объект; 12 – линза; 13 – регистрирующая среда; D – пространственный фильтр; K_1 и K_2 – оптические клинья

Fig. 18. Scheme of an interferometer with a 400 mm diameter visualization field with the use of beam splitting CGHOEs: 1 – laser; 2, 4 – flat mirrors; 3 – telescopic system; 5, 11 – beam splitting CGHOEs; 6, 10 – CGHOE hologram compensators; 7, 9 – flat-convex lenses of main objectives; 8 – phase object; 12 – lens; 13 – recording environment; D – spatial filter; K_1 and K_2 – optical wedges

оптических систем двух "встречных" коллиматоров большого размера. Они выполняют функции блоков осветительной и приемной частей теневого и интерференционных приборов. Использование голограммных объективов в современных системах ОФИ придало этим системам новые свойства и существенно повысило их технические параметры: диаметр изучаемого газового потока – с 230 до 1000 мм, относительное отверстие – до предельно высоких значений, достигаемых в объективах коллиматоров – с 1:3,5 до 1:2 и даже до 1:1. Подобные системы создаются в газодинамических лабораториях ведущих мировых аэрокосмических фирм.

В основных вариантах принципиальных схем технического построения объектной ветви голографических систем ОФИ (рис.13) СГОЭ используют либо в качестве основных объективов (а, б), либо – компенсаторов (в-д). При построении приборов возможно также комбинированное использование таких объективов, поскольку их абберационные характеристики существенно различаются между

From this point of view, in the illuminating section of the OPM system it is advisable to use high-aperture compact variations (Fig.13 c-e) and in the receiving section – those variations which provide the best quality of images of extensive objects (Fig.13 a,b).

Fig.14a shows frequency characteristics of CGHOEs in objectives and hologram lens objectives with diameters of 230 mm, where CGHOEs are used as spherical aberration compensators. Maximum compensating holograms' frequency for objectives with relative aperture of 1:3 and 1:2 does not exceed 20 mm^{-1} , whereas for objective holograms it is considerably greater. Estimation has been made for $\lambda = 694 \text{ nm}$ (pulse ruby laser). Similar curves for objectives with 400 and 800 mm diameters are set forth on Fig.14b and 14c. Two positions of the lens objective in relation to the compensator have been studied: in the first case – with its convex side towards the compensator, in the second case – with the flat side. Estimations of hologram lens objectives with diameters of 230, 400, 800 mm using 100 mm diameter compensator have been made.

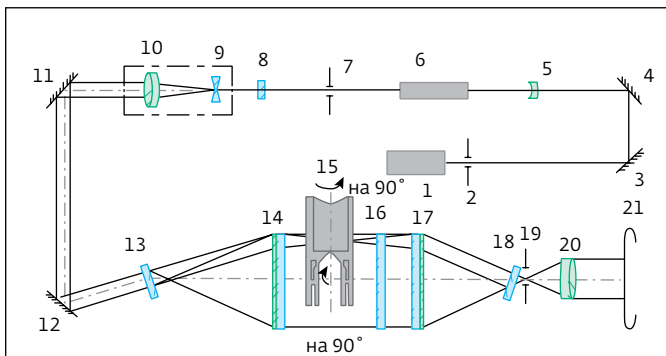


Рис.19. Функциональная оптическая схема интерферометра на основе четырех осевых синтезированных голограммных линз: 1 – лазер; 2, 7, 19 – диафрагмы; 3, 4, 11, 12 – плоские зеркала; 5 – 8 – импульсный лазер; 9, 10 – коллиматор; 13, 18 – светоделительные СГОЭ; 14, 17 – СГОЭ-объективы; 15 – сопловой блок ударной аэродинамической трубы; 16 – защитное стекло; 20 – объектив; 21 – регистрирующая среда

Fig. 19. Functional optical scheme of an interferometer based on 4- on-axis computer-generated hologram lenses: 1 – laser; 2, 7, 19 – diaphragms; 3, 4, 11, 12 – flat mirrors; 5 – 8 – pulse laser; 9, 10 – collimator; 13, 18 – beam splitting CGHOEs; 14, 17 – CGHOE-objectives; 15 – nozzle unit of an impact wind tunnel; 16 – protective glass; 20 – objective; 21 – recording environment

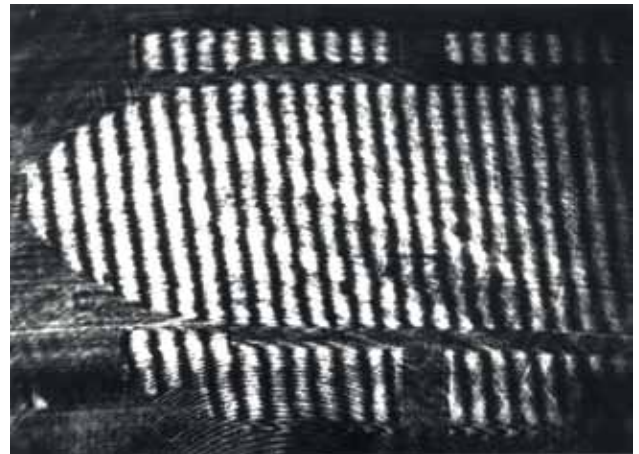


Рис.20. Интерферограмма газового потока в сопле ударной трубы

Fig. 20. Interferogram of gas flow inside of an impact tunnel

Use of multi-level CGHOEs (meaning levels of etching depth of material in which grooves are “ruled”) which have high diffraction efficiency (up to 90% and more) and decreased noise level is possible in case of low frequency (no more than 30 mm^{-1}). That is why, when making interference instruments of this class, it is more appropriate to use dual-component optical systems consisting of a lens objective and an accordingly estimated hologram compensator (Fig.15).

Compactness of optical systems of such instruments allows for a significant reduction of work space necessary for their placement. In some cases it becomes possible to combine two functions in instruments’ objectives: of optical elements and of protective glass.

собой. С этой точки зрения, в осветительной части системы ОФИ целесообразно применять светосильные компактные варианты (рис.13в-д), а в приемной – варианты, обеспечивающие лучшее качество изображения протяженных объектов (рис.13а,б).

На рис.14а приведены частотные характеристики СГОЭ-объективов и голограммно-линзовых

объективов диаметром 230 мм, в которых СГОЭ используются в качестве компенсаторов сферической aberrации. Максимальная частота голограмм-компенсаторов для объективов с относительным отверстием 1:3 и 1:2 не превышает 20 мм^{-1} , в то время как для голограмм-объективов она существенно больше. Расчет выполнен для $\lambda=694 \text{ нм}$ (импульсный лазер на рубине). Аналогичные кривые для объективов диаметром 400 и 800 мм приведены на рис.14б и 14в. Рассмотрены два положения линзового объектива относительно компенсатора: в первом случае выпуклой стороной к компенсатору, во втором – плоской. Проведены расчеты голограммно-линзовых объективов диаметром 230, 400, 800 мм при использовании компенсатора диаметром 100 мм.

Использование многоуровневых СГОЭ (имеются в виду уровни глубины травления материала, в котором "нарезаны" штрихи), обладающих высокой дифракционной эффективностью (до 90 % и выше) и пониженным уровнем фона, возможно при малых частотах (не превышающих 30 мм^{-1}). Поэтому при создании интерференционных приборов этого класса более приемлемо брать двухкомпонентные оптические системы, состоящие из линзового объектива и соответственно рассчитанного голограммного компенсатора (рис.15).

Высокая компактность оптических систем подобных приборов обеспечивает существенное сокращение производственных площадей, необходимых для их размещения. В отдельных случаях оказывается возможным совместить в объективах приборов две функции: оптических элементов и защитных стекол. При этом рельефно-фазовая структура СГОЭ может быть нанесена непосредственно на защитные стекла иллюминаторов газодинамических установок, это позволяет вдвое сократить количество используемых крупногабаритных оптических элементов.

Один из способов создания крупногабаритных объективов систем ОФИ опирается на принцип "обращения волнового фронта". В основе принципа – использование голограммного оптического элемента (ГОЭ) с зарегистрированным волновым фронтом, характеризующим качество корригируемой оптической системы [1], и пропускание восстановленной с ГОЭ световой волны через оптическую систему коллиматора в "обратном ходе" световых лучей. Тогда на выходе за счет взаимной компенсации aberrаций реального прибора и восстановленной с ГОЭ волны достигается "безабберационное" волновое поле.

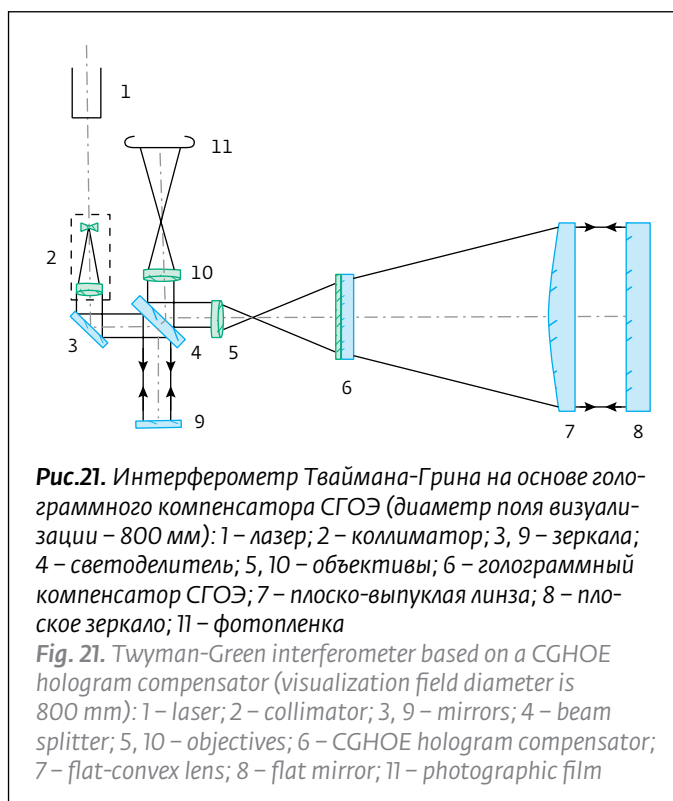


Рис.21. Интерферометр Тваймана-Грина на основе голограммного компенсатора СГОЭ (диаметр поля визуализации – 800 мм): 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3, 9 – зеркала; 4 – светоделитель; 5, 10 – объективы; 6 – голограммный компенсатор СГОЭ; 7 – плоско-выпуклая линза; 8 – плоское зеркало; 11 – фотопленка

Fig. 21. Twyman-Green interferometer based on a CGHOE hologram compensator (visualization field diameter is 800 mm): 1 – laser; 2 – collimator; 3, 9 – mirrors; 4 – beam splitter; 5, 10 – objectives; 6 – CGHOE hologram compensator; 7 – flat-convex lens; 8 – flat mirror; 11 – photographic film

At that, relief phase structure of CGHOEs can be applied directly to protective glass of gas dynamic installations' illuminators, which allows to cut the number of necessary large-dimensional optical elements in half.

One of existing methods of producing large-dimensional objectives' of OPM systems is based on a principle of "wavefront circulation". The basis of the principle is the use of a hologram optical element (HOE) with a registered wavefront which characterizes the quality of the corrected optical system [1], and transmission of a light wave, restored using HOE, through the optical system of the collimator in "counter motion" of light rays. In this case, due to mutual compensation of aberrations of the actual instrument and the wave, restored using HOE, "aberration-free" wave field is achieved at the exit.

Fig.16 shows a scheme of a four-mirror (3, 4, 12, 14) interferometer based on two contrary main objectives with a narrow reference beam. Each objective consists of a flat-convex lens (optical diameter is 400 mm) and a computer-generated compensating CGHOE hologram (optical diameter is 200 mm). Figures 17 and 18 show other variations of this holographical interferometer which have 400 mm diameter visualization fields.

With the help of an interferometer based on 4-axis computer-generated hologram lenses (Fig.19) an interferogram of gas flow inside the nozzle of



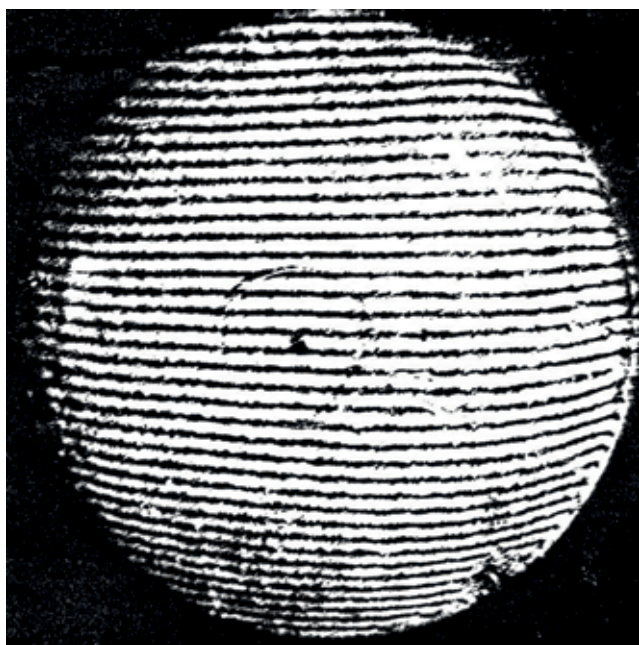


Рис.22. Интерферограмма, характеризующая качество интерферометра с полем наблюдения диаметром 800 мм

Fig. 22. Interferogram which characterizes the quality of the interferometer with a 800 mm diameter observation field

На рис.16 представлена схема четырехзеркального (3, 4, 12, 14) интерферометра на основе двух встречно установленных основных объективов с узким эталонным пучком. Каждый объектив состоит из плоско-выпуклой линзы (световой диаметр 400 мм) и синтезированной голограммы – компенсатора СГОЭ (световой диаметр – 200 мм). На рис.17 и 18 показаны другие варианты этого голографического интерферометра, которые имеют поле визуализации диаметром 400 мм.

С помощью интерферометра на основе четырех осевых синтезированных голограммных линз (рис.19) была получена интерферограмма газового потока в сопле ударной трубы (рис.20). Эту схему использовали в интерференционно-теновом приборе ИАБ-462: поле визуализации 230 мм, остаточные aberrации оптической системы прибора не превышают 5λ , разрешающая способность оптической системы не менее 25 мм^{-1} по всему полю. Подчеркнем, что в конце 1970-х – начале 1980-х годов образцы интерферометров для аэродинамических труб на основе применения голограммных объективов и голограммных компенсаторов с полем визуализации 400 мм были созданы в "НПО "ГИПО" впервые в мировой практике.

На рис.21 представлен интерферометр, собранный по схеме Тваймана-Грина

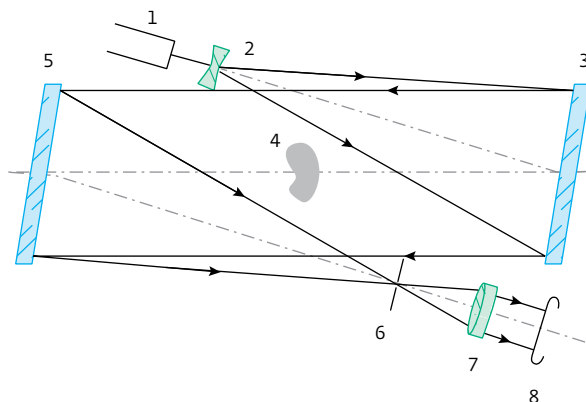


Рис.23. Функциональная оптическая схема теневого прибора на базе ГОЭ, играющих роль голограммных зеркал: 1 – лазер; 2 – линза; 3, 5 – основные объективы в виде ГОЭ; 4 – фазовый объект; 6 – визуализирующая диафрагма; 7 – объектив; 8 – фоторегистрирующая среда

Fig. 23. Functional optical scheme of a shadow instrument based on HOEs which act as hologram mirrors: 1 – laser; 2 – lens; 3, 5 – main objectives in the form of HOEs; 4 – phase object; 6 – visualizing diaphragm; 7 – objective; 8 – photo recording environment

an impact tunnel has been obtained (Fig.20). This scheme was used in a shadow-interference instrument ИАБ-462: visualization field – 230 mm, residual aberrations of the optical system of the instrument do not exceed 5λ , resolution of the optical system – at least 25 мм^{-1} within the whole field. It is worth mentioning that, in late 1970s – early 1980s, models of interferometers for wind tunnels based on the use of hologram objectives and hologram compensators with visualization field of 400 mm were produced by specialists of "NPO GIPO" for the first time in the world practice.

Fig.21 shows an interferometer assembled using Twyman-Green scheme with a hologram lens objective with a visualization field of 800 mm in diameter, a flat-convex lens 7 in an object branch (optical diameter – 800 mm, focal distance – 1506.6 mm) and a hologram compensator СГНОЕ 6 (optical diameter 200 mm). Residual wave aberration of the interferometer makes up about -2λ (Fig.22). It can be substantially compensated using simple holographical aberration correction [4].

Theoretically, diffraction efficiency of physical HOEs, registered in oncoming beams, can reach 100%. It is known [4], that a HOE obtained in oncoming beams with on-axis spherical and off-axis flat wavefronts has same properties as an off-axis parabolic mirror.

с голограммно-линзовым объективом с полем визуализации диаметром 800 мм, в объектной ветви – плоско-выпуклая линза 7 (световой диаметр 800 мм, фокусное расстояние 1506,6 мм) и голограммный компенсатор СГОЭ 6 (световой диаметр 200 мм). Остаточная волновая aberrация интерферометра составляет около 2λ (рис.22). Ее можно существенно скомпенсировать с помощью обычной голографической коррекции aberrаций [4].

Теоретически дифракционная эффективность физических ГОЭ, зарегистрированных во встречных пучках, может достигать 100%. Известно [4], что ГОЭ, полученный во встречных пучках с осевым сферическим и внеосевым плоским волновыми фронтами, обладает теми же свойствами, что и внеосевое параболическое зеркало. Теневая система (рис.23), образованная с помощью таких ГОЭ, играющих роль зеркал, имеет высокое качество.

Для изучения трехмерных (пространственных) газовых потоков используют метод "острой фокусировки" [1]. Известно, что глубина резко изображаемого пространства уменьшается с увеличением апертуры пучка, просвечивающего пространственный фазовый объект. Поэтому в теневом методе "острой фокусировки" добиваются просвечивания фазового объекта набором элементарных пучков,

A shadow system (Fig.23) made using such HOEs acting as mirrors has a high quality.

To study three-dimensional (spatial) gas flows a "sharp focusing" [1] method is used. It is known that the depth of a sharply depicted area decreases with the increase of the aperture of a beam which transmits through a spatial phase object. That is why, in the context of the "sharp focusing" method, transmission of the phase object by a series of elementary beams, which form an aperture angle, is performed. Obtaining of interference images of sections of a spatial gas flow also has a practical interest. To explain the work principle of this method we shall use Fig.24. A coherent light beam W_1 illuminates a disperser 1. Between it and a photographic plate 4 phase objects 2 and 3 are located along Oy axis at the distance of Δ_y from each other. With such illumination method light beams with aperture angles θ_2 и θ_3 pass through objects 2 and 3 accordingly. A portion of rays within the beam with aperture θ_3 passes through a transparent heterogeneity 3. The hologram is obtained using a method of two expositions. The technology of the "sharp focusing" method passed an experimental verification in a gas dynamics experiment: in the wind tunnel of the G.M. Krzhizhanovsky Energy

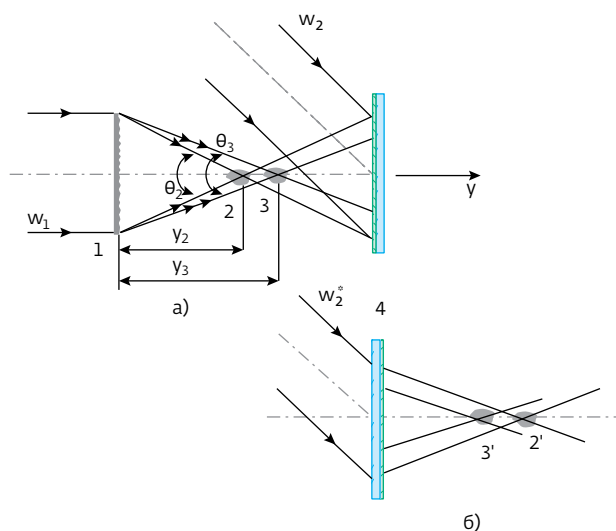


Рис.24. К объяснению голографического метода "острой фокусировки" для получения интерференционных картин: схемы записи (а) и восстановления (б) голограммы при получении интерференционных картин сечений пространственной неоднородности
Fig. 24. In addition to explanation of the "sharp focusing" holographical method for obtaining interference images: hologram record (a) and restoration (b) schemes when obtaining interference images of spatial heterogeneity sections

образующих апертурный угол. Представляет практический интерес и получение интерференционных картин сечений пространственного газового потока. Для объяснения принципа работы этого метода воспользуемся рис.24. Когерентный пучок света W_1 освещает рассеиватель 1. Между ним и фотопластиной 4 вдоль оси Y расположены фазовые объекты 2 и 3, расстояние между которыми - Δy . При таком способе освещения через объекты 2 и 3 проходят световые пучки с апертурными углами θ_2 и θ_3 , соответственно. Часть лучей в пучке с апертурой θ_3 проходит через прозрачную неоднородность 2, а часть - только через прозрачную неоднородность 3. Голограмму получают по методу двух экспозиций. Технология метода "острой фокусировки" прошла экспериментальную проверку в газодинамическом эксперименте: в аэродинамической трубе Энергетического института им. Г.М.Кржижановского и на аэробаллистической трассе Физико-технического института им. А.Ф.Иоффе (рис.25).

Отличия, наблюдаемые между теневыми картинками течения, возникающего около летящих шаров (рис.26) бывают двух видов: первые (а-в) получены с одной голограммы по методу "острой фокусировки", последняя (г) - с помощью обычного теневого метода.

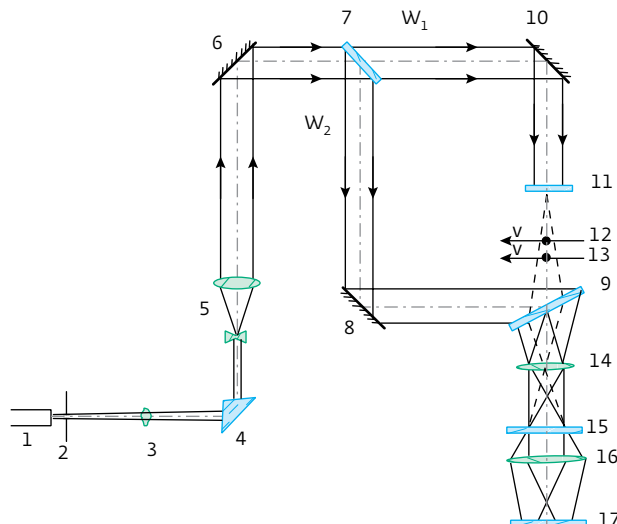


Рис.25. Функциональная оптическая схема голографического устройства для аэробаллистической трассы: 1 - лазер; 2 - диафрагма; 3 - линза; 4 - призма; 5 - коллиматор; 6, 8, 10 - зеркала; 7 - светоделитель; 9 - ГОЭ; 11 - растр; 12, 13 - модели; 14, 16 - объективы; 15 - визуализирующая диафрагма; 17 - фотопленка
Fig. 25. Functional optical scheme of a holographic device for aero-ballistic tracks: 1 - laser; 2 - diaphragm; 3 - lens; 4 - prism; 5 - collimator; 6, 8, 10 - mirrors; 7 - beam splitter; 9 - HOE; 11 - raster; 12, 13 - models; 14, 16 - objectives; 15 - visualization diaphragm; 17 - photographic film

Institute and at the ballistic track of the A.F.Ioffe Physico-Technical Institute (Fig.25).

Differences which can be observed between shadow images of flows which appear near flying balloons, first three of which (a-c) were obtained from a hologram using the "sharp focusing" method and the last one (d) - using a conventional shadow method, are shown on Fig.26.

One of many practical uses of the "sharp focusing" method is research using wind tunnels and plasma units, when impact of protective glass on the end result must be eliminated. Thing is, when observing gas dynamics tests, protective glass undergoes substantial heating, due to that high demands are made concerning its quality. Use of the "sharp focusing" method allows to decrease these demands by 20 and more times which is especially important for reduction of costs of produced OPM systems with increase of visualization field.

Hence, we have shown that in "NPO GIPO" several types of holographical interferometers had been developed based on the use of CGHOEs, which underwent practical experimental verification and have no current analogues. Uniqueness of this equipment is in having a work field with 230 to 1000

Одно из множества практических приложений метода "острой фокусировки" – проведение исследований в аэродинамических трубах и плазменных установках, когда необходимо исключить влияние защитных стекол на полученный результат. Дело в том, что при наблюдении за газодинамическими испытаниями защитные стекла подвергаются значительному нагреву, поэтому к качеству их обработки при изготовлении предъявляют высокие требования. Применение метода "острой фокусировки" позволяет в 20 и более раз снизить эти требования, что особенно важно для удешевления создаваемых систем ОФИ с большими размерами поля визуализации.

Таким образом, мы показали, что в "НПО "ГИПО" на основе использования СГОЭ были созданы прошедшие практическую экспериментальную проверку несколько типов голографических интерферометров, не имеющих аналогов. Уникальность этого оборудования состоит в том, что они обладают рабочим полем с размерами от 230 до 1000 мм, имеют возможность многократно увеличивать объем информации, получаемой в одном газодинамическом эксперименте, с их помощью можно повысить чувствительность измерений и приступить к трехмерным исследованиям газовых потоков.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белозёров А.Ф. Оптические методы визуализации газовых потоков. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2007.
2. Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Миронова Т.А. и др. Синтезированная голограммная оптика. – Оптический журнал, 2002, т.69, № 12, с. 23–32.
3. ГОСТ 24865.1–81. Голография и голографические методы контроля качества. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 1982.
4. Кольер Р., Беркхардт К., Лин Л. Оптическая голография. – М.: Мир, 1973, с. 58–62.

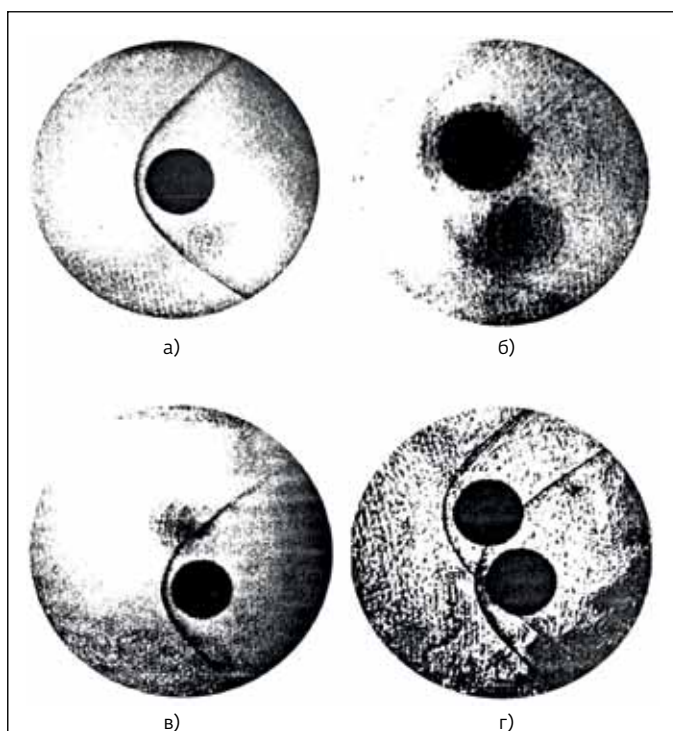


Рис.26. Теневые картины течения около летящих моделей: а, б, в – соответствуют трем плоскостям фокусировки при восстановлении волновых полей с ГОЭ (а – плоскость максимально удалена от голограммы, б – плоскость расположена между моделями, в – плоскость минимально удалена от голограммы); г – теневая картина получена с помощью обычного теневого метода
Fig. 26. Shadow images of flow around flying models: a, b, c – correspond to three focusing planes when restoring wavefields with HOEs (a – plane is at the maximum distance from the hologram, b – plane is located between models, c – plane is at the minimum distance from the hologram); d – shadow image obtained with a conventional shadow method

mm, having the ability to multiply the volume of information obtained from a single gas dynamics experiment, to facilitate measurement sensitivity and the start of three-dimensional gas flows study.