



# ОСЕВЫЕ СИНТЕЗИРОВАННЫЕ ГОЛОГРАММНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ: ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ, ПРИМЕНЕНИЯ

## ЧАСТЬ I

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

Рассмотрены основные этапы развития технологии изготовления осевых синтезированных голограммных оптических элементов и области их применения в оптическом производстве и приборостроении, в частности, для контроля асферических поверхностей, для контроля юстировки центрированных многокомпонентных оптических систем, включая двухзеркальные системы оптических телескопов типа Кассегрена и Ричи-Кретьена. Представлено оборудование для изготовления осевых синтезированных голограммных оптических элементов.

Осевые синтезированные голограммные оптические элементы (СГОЭ) – важная составляющая элементной базы современного оптического и оптико-электронного приборостроения. Они выполняют функции либо образцовых оптических элементов и компенсаторов (контрольно-диагностическая аппаратура), либо силовых оптических элементов (лазерная оптика, корректоры хроматических aberrаций). Применение современной аппаратуры различного назначения, содержащей СГОЭ резко возросло. Это – фото- и видеооптика, контрольно-юстировочные установки, оптические системы записи и считывания цифровой информации, оружейные прицелы. Расширился рабочий спектральный диапазон, увеличились объемы изготовления аппаратуры и ее номенклатура. Оказалось, что использование СГОЭ расширяет горизонты оптико-физических измерений в экспериментальной газодинамике – в области теневых и интерференционных приборов визуализации газовых потоков в аэродинамических трубах

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

## PART II

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

**Main stages of on-axis computer-generated hologram optical elements production technology development and their areas of use in optic industry and instrument making, namely, for control of non-spherical surfaces, adjustment control of centered multi-component optical systems, including two-mirror optical telescope systems of Cassegrain and Ritchey-Chretien types were studied in the current article. Equipment for on-axis computer-generated hologram optical elements is presented herein.**

On-axis computer-generated hologram optical elements (CGHOEs) – is a critical component of the element base of modern optical and optoelectronic instrument making. They serve as, either, standard optical elements and compensators (diagnostic equipment), or force optical elements (laser optics, chromatic aberrations correction). Use of various present-day equipment which contains CGHOEs, like photo and video optics, control and adjustment devices, optical systems of digital information recording and reading, weapon sights, have increased drastically. Working spectrum, production scale and range have widened. It turned out that the use of CGHOEs opens new horizons in terms of opticophysical measurements in experimental gas dynamics – shadow and interference instruments of gas flow visualization in wind tunnels and ballistic tracks in a work-field up to 1000 mm. Use of CGHOEs widens the possibility of creating collimator objectives with 400 to 1000 mm diameter and relative aperture up to 1:2.

When following history of on-axis CGHOEs development, it is possible to split it into three relative stages. During the first stage basic principles of wave fields' transformation with help of on-axis diffracting structures were defined and experimentally verified (A. Fresnel, 1816; D. Rayleigh, 1871; Ch. Soret, 1875).

и баллистических трассах в рабочем поле размером до 1000 мм. Использование СГОЭ открывает новые возможности создания объективов коллиматоров диаметром 400-1000 мм и относительным отверстием до 1:2.

Прослеживая историю развития осевых СГОЭ, можно условно разделить ее на три этапа. В рамках первого этапа были сформулированы и подтверждены экспериментально основополагающие принципы преобразования волновых полей с помощью осевых дифракционных структур (О.Френель, 1816 год; Д.Рэлей, 1871; Ш.Сорэ, 1875).

Второй этап, в целом, связан с пионерскими работами Р.Вуда [1]. Он, фактически, изготовил первую рельефно-фазовую бинарную голограмму с высокой дифракционной эффективностью в тонком прозрачном слое желатины, нанесенном на стеклянную подложку. Толщина слоя (после экспонирования и проявления) обеспечивала сдвиг фазы на величину  $\pi$  между соседними френелевскими зонами.

На третьем этапе были разработаны новые технологии получения СГОЭ. Они обеспечили этим элементам широкое применение на практике в оптической технологии и в оптико-электронном приборостроении. Важнейшими достижениями этапа стали демонстрация возможностей, определение целесообразности и обоснование условий предпочтительного применения осевых СГОЭ. Элементы начали использовать для контроля асферических поверхностей и юстировки центрированных оптических систем, в частности двухзеркальных телескопов, в том числе космического базирования. В первых работах, зарубежных и отечественных, были рассмотрены разнообразные пути синтеза элементов. В работах [2, 3] описаны варианты применения осевых синтезированных голограмм, в [4] – внеосевых, синтезируемых методом Ломана (A.W.Lohmann), в том числе описаны СГОЭ, созданные методом фотолитографии с фотографическим уменьшением расчетного голографического поля, были представлены результаты исследований образцов демонстрационных элементов – киноформов [3]. К пионерским работам, в которых была продемонстрирована возможность и показана целесообразность применения синтезированных голограмм для контроля асферических поверхностей (АП), относятся работы по внеосевой голографии [4] и по осевым голограммам [2, 5–8].

Следует отметить, что расчет внеосевых голограмм занимал значительно (на несколько порядков) больше весьма дорогостоящего в те годы

The second stage is, as a whole, associated with R. Wood's pioneer works [1]. He, actually, made a first relief-phase binary hologram with a high diffraction efficiency in a thin gelatinous layer applied to a glass substrate. Layer's thickness (after its exposing and developing) ensured a skew by  $\pi$  value between adjacent Fresnel zones.

During a third stage new technologies of obtaining CGHOEs were developed. They ensured wide practical use of these elements in optical technologies and optoelectronic instrument making. The most important accomplishment of this stage was the demonstration of possibilities, definition of practicability and justification of preferential use of on-axis CGHOEs. Elements started to get used for non-spherical surfaces control and adjustment of centered optical systems, such as, two-mirror telescopes, including space-based ones. In initial native and foreign works various ways of element synthesis were studied. Works [2, 3] describe variants of application of on-axis computer-generated holograms, work [4] – of off-axis ones, synthesized using the method of A.W. Lohmann, including description of CGHOEs, created using photolithography method with photographic reduction of estimated holographic field and presentation of research results of kinoform demonstration element samples [3]. Pioneer works which demonstrated a possibility and justified the use of computer-generated holograms to control non-spherical surfaces (NSS) include both works on off-axis holography [4] and on on-axis holograms [2, 5–8].

It is worth mentioning that estimation of off-axis holograms took considerably more (by several orders) computing time using electronic computers, which was quite expensive back then, than estimation of according on-axis holograms.

Further development history of diffracting optics confirmed apparent advantages of on-axis CGHOEs, which include simplicity of estimation, production and certification. On-axis CGHOEs proved to be more preferable for practical optical and optoelectronic instrument making. In present time only on-axis CGHOEs are used as standard optical elements and optical compensators.

Estimation of on-axis CGHOEs is based on the idea of a "diffracted" ray. We assume the Malus-Dupin theorem and an inverse theorem of Levi-Civita formulated for reflection and refraction of light are also true for diffracted rays [9]. It is appropriate to summarize both these theorems as: "Any two geometrical wavefronts (any two wave surfaces) can be converted into one another using one reflection, refraction or diffraction". However, non- fulfillment of a tautochronism condition in this case assumes obvious difficulties in



машинного времени на электронно-вычислительных машинах, чем расчет соответствующих осевых голограмм.

Дальнейшая история развития дифракционной оптики подтвердила несомненные преимущества осевых СГОЭ, к которым относятся простота их расчета, изготовления и аттестации. Осевые СГОЭ оказались более предпочтительны для практики оптического и оптико-электронного приборостроения. В настоящее время в качестве образцовых оптических элементов и оптических компенсаторов используются исключительно осевые СГОЭ.

Расчет осевых СГОЭ основан на представлении о "дифрагировавшем" луче. Полагаем, что теорема Малюса-Дюпина и обратная теорема Леви-Чивита, сформулированные для случаев отражения и преломления света, справедливы также и для дифрагированных лучей [9]. В обобщенном виде обе эти теоремы целесообразно изложить в виде: "Два любых геометрических волновых фронта (две любые волновые поверхности) можно перевести друг в друга с помощью одного отражения, преломления или дифрагирования". Однако отсутствие выполнения условия таутохронизма в данном случае предполагает очевидные трудности реализации принципа Гюйгенса-Френеля. Прежде всего, это касается понятия "волновой фронт", который в данном случае следует понимать только как поверхность, ортогональную к дифрагированным лучам ("геометрический" волновой фронт). "Платой" за это являются высокие требования к монохроматичности используемого источника излучения. Задача расчета СГОЭ состоит в том, чтобы определить координаты полос (колец) интерференционной картины, которая образовалась бы в плоскости голограммы в результате суперпозиции объектной и опорной волн, заданных аналитически [9, 10]. Для расчета синтезированных голограмм используется выражение

$$\Delta l_m(\rho) = \lambda(m \pm 1/2Q), \quad (1)$$

где  $\Delta l_m(\rho)$  – разность оптического пути опорной и объектной волн на краях  $m$ -й интерференционной полосы,  $\lambda$  – рабочая длина волны,  $Q$  – скважность (соотношение между периодом повторения и шириной полосы (штриха) отображаемой интерференционной картины). При расчете синтезированной голограммы находят координаты краев  $\rho_m^\pm$  каждой  $m$ -й интерференционной полосы.

В начале 60-х годов XX века в Государственном институте прикладной оптики (ГИПО) – тогда

realizing the principle of Huygens-Fresnel. Primarily, it applies to the "wavefront" definition which, in this case, should be interpreted only as a surface orthogonal to diffracted rays ("geometrical" wavefront). "Payment" for this are high requirements for monochromaticity of the used emanation source. The goal of CGHOEs estimation is determining coordinates of interference figure bands (rings) which would form on a hologram's surface as a result of a superposition of an object and a reference wave which are defined analytically [9, 10]. To estimate computer-generated holograms a following expression is used:

$$\Delta l_m(\rho) = \lambda(m \pm 1/2Q), \quad (1)$$

where  $\Delta l_m(\rho)$  – difference between optical paths of the reference wave and the object wave at the edge of the  $m$ -th interference band,  $\lambda$  – working wavelength,  $Q$  – on-off time ratio (correlation between the period of iteration and the width of the band (groove) of the displayed interference figure). When estimating a computer-generated hologram edge coordinates  $\rho_m^\pm$  of each  $m$ -th interference wave must be determined.

At the early sixties of the XX century the State Institute of Applied Optics (GIPO), at that time being Kazan department of the S.I. Vavilov State Optics Institute, started research supervised by Kamil Sabirovich Mustafin on devising a technology of obtaining CGHOEs. The goal was in solving a problem of non-spherical optics control and a series of tasks on large-dimension optical instruments making based on the research. An important scientific and methodological role in formation and development of this aspect of CGHOEs was played by RAN academician Yuri Nikolayevich Denisyuk.

It should be mentioned that GIPO initially tested two methods of manufacturing of on-axis CGHOEs – using a focused light beam, and using a "cutter". Practical implementation showed that the "cutting tool" method of CGHOEs manufacturing has a number of considerable advantages (in terms of spatial frequency, size etc.). A considerable factor, which positively influenced the method's development was availability of a closed technological cycle of ruled diffraction gratings production in GIPO, with own equipment for diamond cutter sharpening, vacuum sputtering of thin metallic reflecting layers and with experience of operating conventional ruling engines.

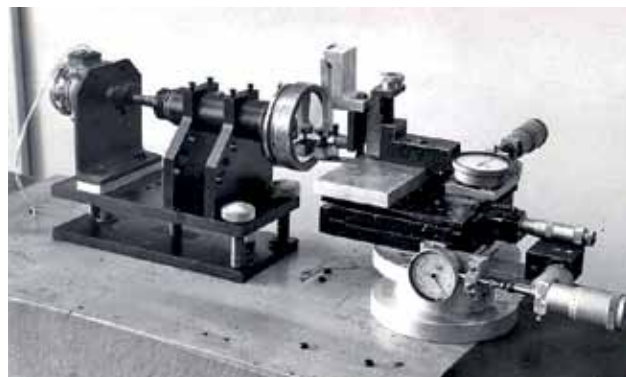
The first computer-generated hologram in GIPO was produced in 1969 on a lathe with a triangular cutting tool made of pobedit [5]. Estimated width of ring-shaped Fresnel zones in this case was ensured by proper "dipping" of the cutting tool into aluminum substrate,

казанском филиале Государственного оптического института им. С.И.Вавилова – под руководством Камиля Сабировича Мустафина были начаты исследования по созданию технологий получения СГОЭ. Целью было решение на основе ее разработки проблемы контроля асферической оптики и ряда задач крупногабаритного оптического приборостроения. Важная научно-методическая роль в становлении и развитии этого направления в ГИПО принадлежит академику РАН Юрию Николаевичу Денисюку.

Особо следует отметить, что в ГИПО изначально были опробованы два метода изготовления осевых СГОЭ – с помощью сфокусированного светового пучка и методом "резца". Практика показала, что метод "резца" в технологии изготовления СГОЭ имеет ряд существенных преимуществ (по пространственной частоте, размерам и др.). Существенным фактором, благоприятно повлиявшим на развитие метода, стало наличие в ГИПО замкнутого технологического цикла изготовления нарезных дифракционных решеток с собственными участками заточки алмазных резцов, вакуумного напыления тонких металлических отражательных слоев и опытом эксплуатации классических делительных машин.

В ГИПО самая первая синтезированная голограмма была изготовлена в 1969 году на токарном станке с помощью победитового резца треугольного профиля [5]. Расчетная ширина кольцевых френелевских зон в данном случае обеспечивалась соответствующим "углублением" резца в подложку из алюминия, плоская рабочая поверхность которой была предварительно сформирована на том же станке. Ее максимальная пространственная частота  $30 \text{ мм}^{-1}$ , дифракционная эффективность  $\sim 3\%$  (амплитудная голограмма). Расчет структуры этой голограммы тогда производился вручную с помощью арифмометра "Мерседес".

Создание основного технологического оборудования для изготовления СГОЭ в ГИПО началось в конце 1960-х годов с разработки макета делительного устройства, основанного на использовании алмазного резца. Макет имел горизонтальную ось вращения шпинделя для крепления подложки СГОЭ (рис.1). Резцедержатель с помощью пластинчатой пружины и электромагнита обеспечивал нанесение кольцевых штрихов на алюминированную рабочую поверхность подложки СГОЭ. В этом макете и в последующих поколениях круговых делительных машин был реализован принцип "несущей" пространственной частоты. То есть каждую расчетную непрозрачную (неотражающую)



**Рис.1.** Первый макет устройства для отображения структуры осевой синтезированной голограммы (ГИПО, 1969)

*Fig. 1. The first prototype of a device for manufacturing of on-axis computer-generated hologram structure (GIPO, 1969)*

flat working surface of which was previously formed using the same lathe. Its maximum spatial frequency was  $30 \text{ mm}^{-1}$ , diffraction efficiency  $\sim 3\%$  (amplitude hologram). Estimation of the hologram's structure was, at the time, performed manually using "Mercedes" calculating machine.

Production of the basic technological equipment for CGHOEs manufacturing in GIPO started in late 1960s with developing of a prototype of a diamond tool-based ruling device. The prototype had a horizontal spindle rotation axis for CGHOE substrate fixing (Fig.1). A cutting tool chuck with help of a plate-like spring and an electromagnet ensured ruling of annular grooves to aluminized work surface of CGHOE substrate. In this prototype and in following generations of circular ruling engines a principle of a "bearing" spatial frequency has been implemented. That is, every estimated non-transparent (non-reflective) zone of a hologram was represented by a group of "elementary" non-transparent zones with a permanent pitch; a "bearing" spatial frequency was created – an equivalent of the "bearing" frequency in radiophysics (Fig.2) [7].

Further development of these technologies ensured the possibility of obtaining relief phased binary CGHOEs with diffraction efficiency up to 40% by removing these "elementary" zones [10].

In mid 1970s GIPO and Leningrad optomechanical association (LOMO) jointly planned and manufactured a circular ruling engine MDA-9 for cutting CGHOEs with up to 230 mm diameter (Fig.3), protected by an Invention Certificate for a "Ruling engine" invention [11]. In MDA-9 device's structure the spindle rotation axis for CGHOE substrate fixation was vertically oriented.

зону голограммы отображала группа "элементарных" непрозрачных зон с постоянным шагом, создавалась "несущая" пространственная частота – эквивалент "несущей" в радиофизике (рис.2) [7].

Дальнейшее развитие названных технологий обеспечило возможность получения рельефно-фазовых бинарных СГОЭ с дифракционной эффективностью до 40 % путем удаления этих "элементарных" зон [10].

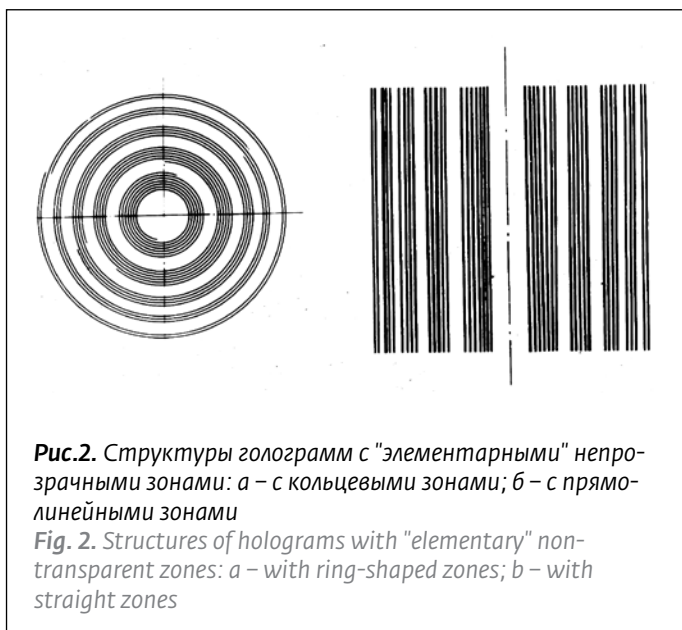
В середине 1970-х годов ГИПО и Ленинградское оптико-механическое объединение (ЛОМО) совместно спроектировали и изготовили круговую делительную машину МДА-9 для нарезания СГОЭ диаметром до 230 мм (рис.3), защищенную авторским свидетельством на изобретение "Делительная машина" [11]. В конструкции машины МДА-9 ось вращения шпинделя для крепления подложки СГОЭ ориентирована вертикально. Круговая делительная машина МДА-9 управлялась логическим электронным блоком со старт-стопным считывающим устройством; носитель информации – бумажная перфокарта с данными о координатах опускания и подъема алмазного резца.

В конце 1990-х годов в ГИПО была создана круговая делительная машина МДА-10 на основе использования пьезоэлектрического привода продольного перемещения делительной каретки (рис.4). Управление процессом нарезания структуры СГОЭ здесь осуществлялось с помощью персонального компьютера. Машина МДА-10 позволяет изготавливать круговые СГОЭ диаметром до 230 мм и пространственной частотой до  $2000 \text{ мм}^{-1}$  на подложках с плоскими и выпуклыми рабочими поверхностями, а также – цилиндрические СГОЭ размерами до  $70 \times 100 \text{ мм}$ . Погрешность формирования заданной волновой поверхности до  $0,05\lambda$ , где длина волны  $\lambda = 633 \text{ нм}$ , при наибольшей пространственной частоте до  $100 \text{ мм}^{-1}$ .

Ранее, в самом начале 1990-х годов, в ГИПО была разработана круговая делительная машина МДГ-500 для нарезания СГОЭ диаметром до 500 мм, два образца которой были изготовлены на заводе "Арсенал" (Киев). Одна из этих машин (рис.5) в 1993 году была поставлена в ГИПО. В настоящее время она модернизируется для изготовления СГОЭ диаметром до 600 мм.

Также были разработаны методы контроля оптического качества осевых СГОЭ [9, 10], основанные на использовании:

- измерительного микроскопа и контрольных колец;

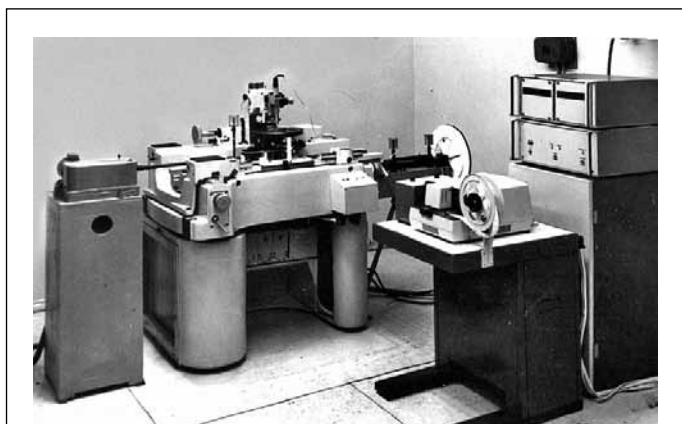


**Рис.2.** Структуры голограмм с "элементарными" непрозрачными зонами: а – с кольцевыми зонами; б – с прямолинейными зонами

**Fig. 2.** Structures of holograms with "elementary" non-transparent zones: a – with ring-shaped zones; b – with straight zones

Circular ruling engine MDA-9 was controlled by an electronic logical unit with a start/stop reader element; paper punched tape with data regarding coordinates of diamond cutter lowering and lifting was used as a data carrier.

In late 1990's a circular ruling engine MDA-10 was created in GIPO based on using a piezoelectric longitudinal blank carriage drive (Fig.4). Control of CGHOE structure cutting process was performed with a PC. MDA-10 device allows manufacturing of circular CGHOEs with up to 230 mm diameter and spatial frequency up to  $2000 \text{ mm}^{-1}$  on substrates with flat and convex work surfaces, and cylindrical CGHOEs



**Рис.3.** Круговая делительная машина МДА-9 (ГИПО, ЛОМО, 1976)

**Fig. 3.** Circular ruling engine MDA-9 (GIPO, LOMO, 1976)



- вспомогательной (аттестующей) синтезированной голограммы с учетом погрешностей подложки и нанесения штриховой структуры.

Необходимо было обеспечить отечественному оптическому производителю возможность создавать оптические детали с асферическими поверхностями. Поэтому в ГИПО на протяжении нескольких десятилетий вели исследования по созданию методов и средств контроля таких поверхностей. Результатом стала разработка на основе использования СГОЭ целого ряда базовых оптических схем для контроля качества оптических асферических поверхностей в процессе их формообразования, а также контроля качества линзовых оптических систем на промежуточных и финишной стадиях их сборки (рис.6).

Некоторые из них использовались для контроля асферических поверхностей на оптических предприятиях отрасли: Казанском оптико-механическом заводе (Казань), Новосибирском приборостроительном заводе (Новосибирск), заводе "Арсенал" (Киев), Лыткаринском заводе оптического стекла (Лыткарино, Московская область), Ленинградском оптико-механическом объединении (Санкт-Петербург), в Научно-исследовательском институте комплексных испытаний оптико-электронных приборов (Сосновый бор, Ленинградская область) и Государственном оптическом институте им. С.И.Вавилова (Санкт-Петербург). Для практической реализации этих схем контроля в ГИПО были разработаны специальные установки – голографические асферометры типа АГ-2, АГ-3, АГ-4 и АСГ, несколько экземпляров были изготовлены и поставлены на ряд предприятий отечественной оптической промышленности. На основе этих установок в Центральном конструкторском бюро "ФОТОН" (Казань) были разработаны для серийного производства приборы ИФК-451 и ИФК-454, которые выполняют функции описанных выше установок типа АГ и АСГ. Голографический асферометр ИФК-451 является переносным и предназначен для бесконтактного контроля с интерферометрической точностью оптических поверхностей второго и высшего порядка с диаметрами до 12000 мм для вогнутых и до 500 мм для выпуклых оптических деталей. Универсальная голографическая установка ИФК-454 является стационарной и предназначена для контроля:

- формы асферических поверхностей любого порядка со световым диаметром до 150 мм, асферичностью до 3000 мкм,



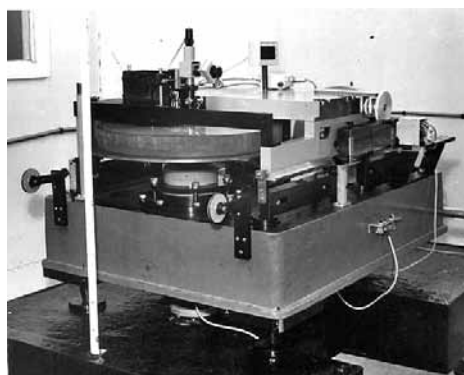
**Рис.4.** Круговая делительная машина МДА-10 (ГИПО, 1997)  
**Fig. 4.** Circular ruling engine MDA -10 (GIPO, 1997)

with dimensions of up to 70×100 mm. Inaccuracy of a specified wave surface forming does not exceed  $0.05\lambda$  where wavelength  $\lambda = 633 \text{ nm}$  with maximum spatial frequency of  $100 \text{ mm}^{-1}$ .

Earlier, at the beginning of the 1990s, a circular ruling engine MDG-500 was developed in GIPO for cutting CGHOEs with up to 500 mm diameter, two units of which were manufactured at "Arsenal" (Kiev) plant. One of these devices (Fig.5) was delivered to GIPO in 1993. It is currently undergoing renovation for CGHOEs manufacturing with diameter up to 600 mm.

Also, methods of optical quality control of on-axis CGHOEs [9, 10] were developed based on the use of:

- measuring microscope and control rings;
- additional (certifying) computer-generated hologram with consideration of substrate and groove structure ruling inaccuracies.



**Рис.5.** Круговая делительная машина МДГ-500 (ГИПО, "Арсенал", 1993)  
**Fig. 5.** Circular ruling engine MDG -500 (GIPO, "Arsenal", 1993)

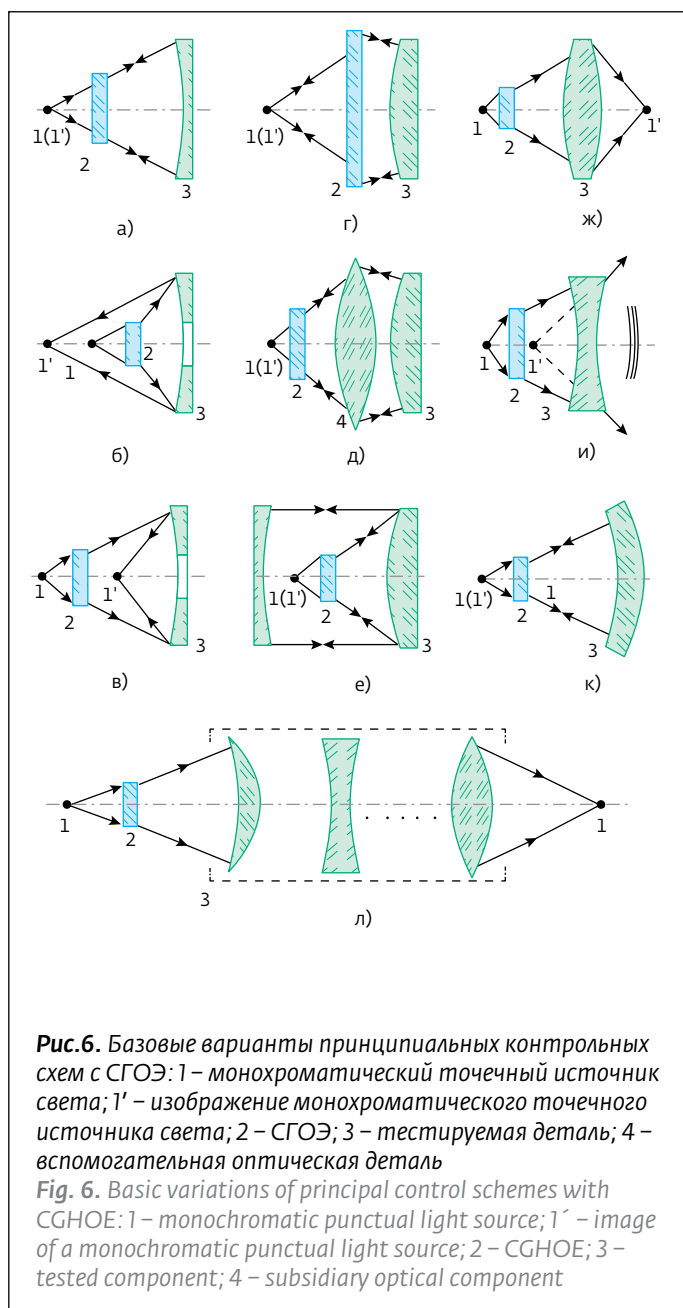
градиентом асферичности до 30 мкм/мм, погрешность контроля 0,03 мкм;

- формы и измерения радиусов кривизны сферических и цилиндрических поверхностей со световым диаметром до 200 мм и диапазоном радиусов кривизны от  $\pm 100$  до  $\pm 100000$  мм.

Практические примеры представлены интерферограммами и элементами СГОЭ с их краткими основными характеристиками (рис.7-9). Тот факт, что в 1981 году на Лыткаринском заводе оптического стекла специалистами ГИПО был проведен контроль вогнутого параболического зеркала диаметром 2,6 м на основе использования осевого СГОЭ разработки ГИПО, подтверждает успех внедрения в производство голограммных оптических элементов. Но эти примеры не ограничивают круг задач, решаемых с помощью осевых СГОЭ. Наряду с ними данный класс голограммных оптических элементов также используется для контроля величины децентрировки линз [10], для измерения радиусов кривизны  $r$  сферических и цилиндрических поверхностей оптических деталей, в виде киноформов, для визуализации газовых потоков в аэродинамических трубах и баллистических трассах, для "расширения" и "сжатия" рабочей спектральной области.

Погрешность контроля величины децентрировки линз не превышает 10 мкм. При контроле с помощью СГОЭ радиусов кривизны сферических поверхностей пробных стекол [12] (диапазон измерений радиусов кривизны  $r$  от  $\pm 250$  до  $\pm 100\,000$  мм) обеспечивается погрешность по 1-му классу точности (ГОСТ 2786-82 "Стекла пробные для проверки радиусов и формы сферических оптических поверхностей. Технические условия"). Это позволяет оценить предельное отклонение радиусов кривизны с величиной  $\pm 0,02\%$  в диапазоне их номинальных значений от 250 до 1000,0 мм (включительно) и с величиной  $(\pm 0,02r/1000)\%$  для радиусов кривизны свыше 1000,0 мм. При измерении радиусов кривизны цилиндрических поверхностей оптических деталей, в частности цилиндрических зеркал, с помощью одномерных СГОЭ [9, 10] диапазон измерений радиусов кривизны и погрешность их измерений аналогичны величинам, характерным при контроле сферических поверхностей.

СГОЭ, выполненные в виде киноформов (с переходом от бинарной формы штрихов с дифракционной эффективностью 35-40% к многоуровневой с дифракционной эффективностью 85-90%, а в пределе - к пилообразной с предельной дифракционной эффективностью более 95% [13]),



**Рис.6.** Базовые варианты принципиальных контрольных схем с СГОЭ: 1 – монохроматический точечный источник света; 1' – изображение монохроматического точечного источника света; 2 – СГОЭ; 3 – тестируемая деталь; 4 – вспомогательная оптическая деталь

**Fig. 6.** Basic variations of principal control schemes with CGHOE: 1 – monochromatic punctual light source; 1' – image of a monochromatic punctual light source; 2 – CGHOE; 3 – tested component; 4 – subsidiary optical component

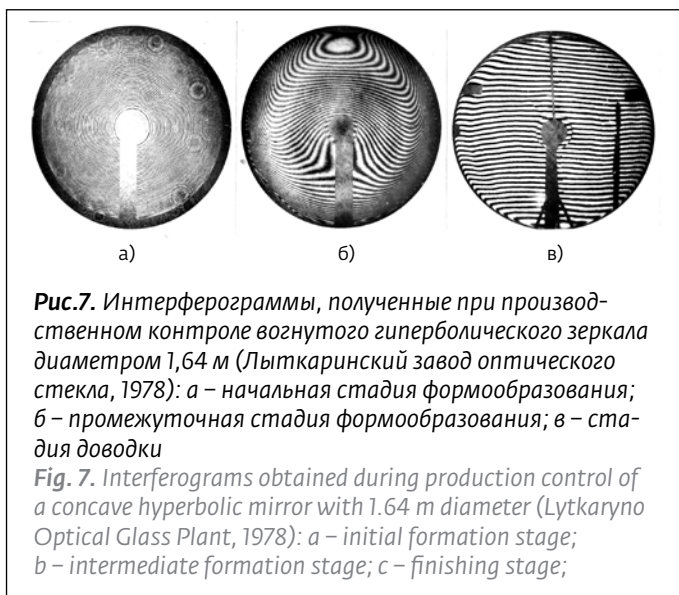
It was necessary to provide local optical manufacturers with possibilities to produce optical components with non-spherical surfaces. Due to that, research was being conducted in GIPO for several decades on creating methods and means of control of such surfaces. As a result, a series of basic optical schemes based on CGHOEs use was developed for quality control of optical non-spherical surfaces during their forming, and, also, quality control of lens-based optical systems on intermediate and final stages of their manufacturing (Fig.6).

Some of them were used for controlling non-spherical surfaces on optic industry enterprises: Kazan

являются альтернативным средством коррекции хроматических aberrаций линзовых центрированных систем (объективов). Это особенно ценно для УФ- и ИК-областей спектра в силу ограниченной номенклатуры оптических материалов, прозрачных в этом диапазоне. Подчеркнем, что впервые (1957 год) на эту уникальную возможность использования дифракционных структур указал и обосновал ее использование Г.Слюсарев [14].

Использование дифракционных структур в качестве основных объективов или компенсаторов в объектной ветви голографических систем интерференционных приборов позволяет визуализировать газовые потоки в аэродинамических трубах и баллистических трассах [15]. Включение голограммных объективов в эти системы придает им новые свойства, улучшая технические параметры современных систем оптико-физических измерений: увеличивая диаметр изучаемого газового потока с 230 до 1000 мм и обеспечивая предельно высокие значения относительного отверстия, достигаемого в объективах коллиматоров (от 1:3,5 до 1:2 и даже до 1:1).

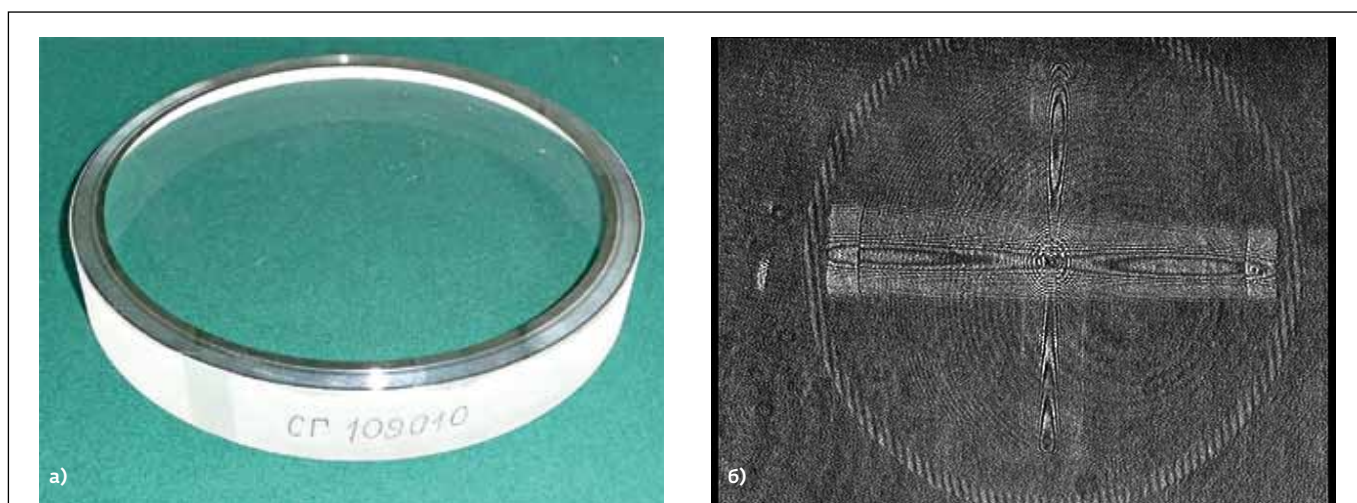
Портативные наборы дифракционных элементов обеспечивают наглядную демонстрацию отдельных aberrаций в учебных целях. Например, учебно-исследовательский набор СГОЭ-реплик [16] содержит "безабберационную" синтезированную голограммную линзу (СГЛ), цилиндрическую СГЛ, СГЛ-тор, синтезированный голограммный имитатор (СГИ) сферических aberrаций 3 и 5-го порядков, СГИ сферических aberrаций 5-го порядка,



**Рис.7.** Интерферограммы, полученные при производственном контроле вогнутого гиперболического зеркала диаметром 1,64 м (Лыткаринский завод оптического стекла, 1978): а – начальная стадия формообразования; б – промежуточная стадия формообразования; в – стадия доводки

**Fig. 7.** Interferograms obtained during production control of a concave hyperbolic mirror with 1.64 m diameter (Lytkaryno Optical Glass Plant, 1978): a – initial formation stage; b – intermediate formation stage; c – finishing stage;

Opto-Mechanical Plant (Kazan), Novosibirsk Instrument Making Plant (Novosibirsk), Arsenal Plant (in Kiev), Lytkaryno Optic Glass Plant (Lytkaryno, Moscow Region), Leningrad optomechanical association (St. Petersburg), Optoelectronic Instruments Complex Testing Research Institute (Sosnovyy Bor, Leningrad Region) and in the S.I.Vavilov's State Optics Institute (St. Petersburg). To practically implement these control schemes special devices were developed in GIPO – holographic aspherometers of AG-2, AG-3, AG-4 and ASC types; several units were manufactured and supplied to various enterprises of local optic industry. Based on these devices, IFK-451 and IFK-454 instruments



**Рис.8.** Контроль вогнутого торического зеркала из бескислородной меди с радиусами кривизны 10,5 м и 21 м (ГИПО, 2009): а – СГОЭ; б – интерферограмма на стадии аттестации торического зеркала

**Fig.8.** Control of concave toric mirror made of oxygen-free copper with curve radii 10.5 m and 21 m. (GIPO, 2009): a – CGHOE; b – interferogram at the certification stage of the toric mirror



СГИ aberrаций синусоидального вида (для всех элементов этого набора световой диаметр 35 мм, рабочая длина волны равна 633 нм и дифракционная эффективность ~40%).

Кратко рассмотрим использование дифракционных элементов для "расширения" и "сжатия" рабочей спектральной области [9, 17]. Суть метода регулирования спектральной селективности рельефно-фазовых СГОЭ (достижения выравнивания зависимости дифракционной эффективности от длины волны в пределах всего рабочего спектрального диапазона) состоит в подборе двух прозрачных материалов с определенными различиями зависимости их показателей преломления от длины волны. Этот метод реализуется за счет:

- применения синусоидальной рельефно-фазовой модуляции, когда голограммный элемент представляет собой две соединенные встречно рабочими поверхностями фазовые голограммы 1 и 2 с противофазными структурами, выполненными в материалах с разными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$  (рис.10а);
- подбора системы двух бинарных голограмм 1 и 2, соединенных прозрачным склеивающим материалом 3 с показателем преломления  $n_3$  (рис.10б);
- использования одиночной голограммы 2, соединенной через прозрачную среду 1 с показателем преломления  $n_1$  с защитной пластинкой 6 с показателем преломления  $n_4$  (рис.10в).

Разность фаз между лучами 4 и 5, проходящими на расстоянии половины периода рельефной структуры друг относительно друга, можно записать в виде

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda)h[n_2(\lambda) - n_1(\lambda)]. \quad (2)$$

Максимальное значение дифракционной эффективности  $\eta(\lambda) = \eta_{\max}$  достигается при разности фаз  $\Delta\phi_{\text{опт}}$ , величина которой зависит от формы микрорельефа. Так, например, в случае синусоидальной формы (рис.10 а)  $\Delta\phi = 1,85$  рад, при этом наибольшая эффективность в 1-м порядке дифракции равна ~34%. Для ступенчатой двухуровневой формы рельефа при скважности, равной 2 (см.рис. 10б, 10в),  $\Delta\phi = 1,57$  рад и  $\eta_{\max} = 40,5\%$ .

Из приведенного соотношения (2) следует: для того, чтобы расширить рабочую область спектра СГОЭ, необходимо ослабить (в идеале – исключить) зависимость разности фаз  $\Delta\phi$  от длины волны  $\lambda$ . Это достигается путем использования



**Рис.9.** Зонная пластина, диаметр 500 мм, фокусное расстояние 12 м для рабочей длины волны 633 нм (изготовлена на делительной машине МДГ-500; ГИПО, 1993)

**Fig. 9.** Zone plate, diameter – 500 mm, focal distance – 12 m for a work wavelength of 633 nm (manufactured on a ruling engine MDG-500; GIPO, 1993)

were developed at "PHOTON" Central Design Office (Kazan) for mass production, which perform functions of aforementioned AG and ASG type devices. IFK-451 holographic aspherometer is transportable and is used for contactless control of second- and top-order optical surfaces with diameters up to 12,000 mm for concave and up to 500 mm for convex optical components with interferometric precision. Universal holographic device IFK-454 is stationary and is designed for control:

- of form of non-spherical surfaces of any order with light diameter up to 150 mm, non-sphericity up to 3000  $\mu\text{m}$ , non-sphericity gradient up to 30  $\mu\text{m}/\text{mm}$ , control inaccuracy 0.03  $\mu\text{m}$ ;
- of form and measurement of curve radius of spherical and cylindrical surfaces with light diameter up to 200 mm and curve radius range of  $\pm 100$  to  $\pm 100,000$  mm.

Practical examples are presented as interferograms and CGHOE components with their summarized specifications (Fig.7-9). The fact that, in 1981 at Lytkaryno Optic Glass Plant GIPO specialists conducted control of concave parabolic mirror with 2.6 m diameter based on on-axis CGHOE developed by GIPO, proves success of holographic optical elements application in production. But these examples do not restrict the range of tasks which can be solved using on-axis CGHOEs. Apart from them this class of holographic optical elements is also used for lens decentralization value control [10], for estimating curve radius  $r$  of spherical and cylindrical surfaces of optical components, as kinoforms for gas flow

такой пары оптических материалов, для которых зависимость (3) разности их показателей преломления от длины волны изменяется пропорционально длине волны в рабочем спектральном диапазоне

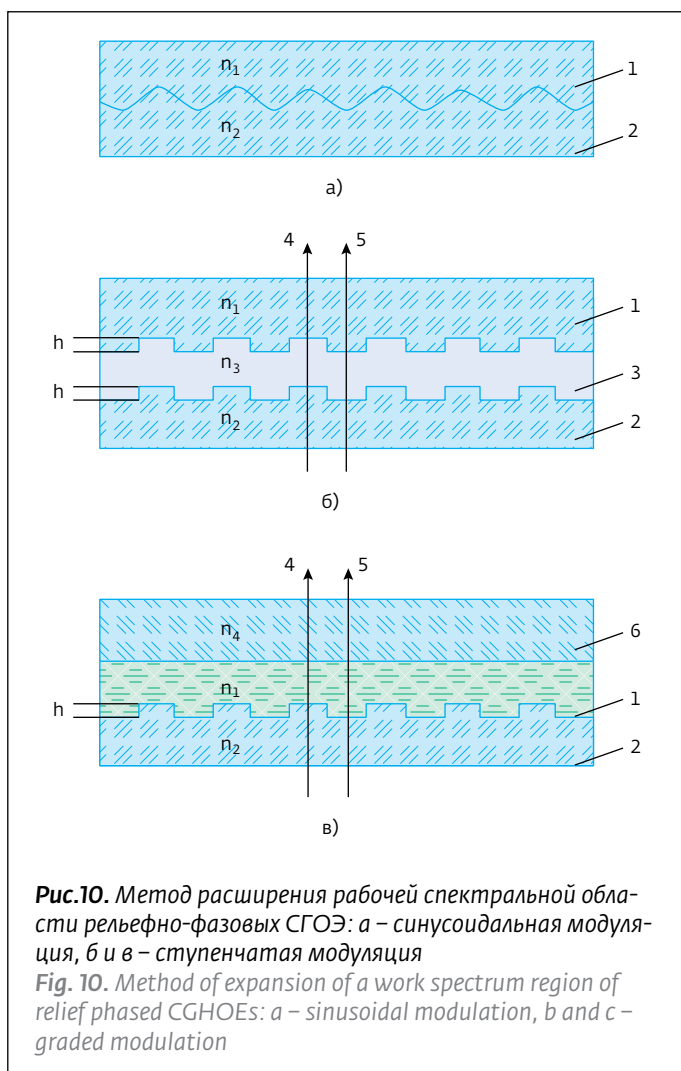
$$n_2(\lambda) - n_1(\lambda) = a_1\lambda + b_1. \quad (3)$$

где  $a_1$  и  $b_1$  – параметры, определяемые оптическими свойствами выбранных материалов, причем желательно, чтобы в рабочей области спектра  $a_1\lambda \gg b_1$ . Высота  $h$  рельефа СГОЭ выбирается из приведенного выше соотношения (2) для  $\Delta\phi(\lambda) = \Delta\phi_{\text{опт}}(\lambda_0)$ , где  $\lambda_0$  – длина волны, при которой достигается  $\eta_{\text{max}}$ .

В том случае, если одна голограмма получена на основе твердотельного материала, вторая может быть выполнена путем заполнения рельефной структуры первой голограммы жидким прозрачным материалом с последующим отверждением, например путем полимеризации. Может быть использован и незатвердевающий материал, тогда он должен быть загерметизирован прозрачной пластиной 6 (рис.10в). Если обе голограммы, образующие СГОЭ, выполнены из твердотельных оптических материалов, они могут быть соединены с помощью прозрачного склеивающего вещества.

Для реализации рассмотренного метода расширения рабочей спектральной области СГОЭ необходимо обеспечить возможность формирования расчетных рельефно-фазовых структур голограмм в различных оптических материалах с широким диапазоном значений показателя преломления и дисперсии.

В качестве примера сравним расчетные нормированные зависимости дифракционной эффективности от длины волны для СГОЭ, выполненного из пары оптических кристаллов "фтористый литий – фтористый барий", и для "контрольного" образца СГОЭ, выполненного только из одного материала – фтористого бария. Эти оптические материалы имеют хорошее пропускание в дальней инфракрасной области спектра. При оптимальной длине волны 4 мкм для составного СГОЭ глубина рельефа равна 18,6 мкм, а для СГОЭ из фтористого бария глубина рельефа – 4,4 мкм. Расчеты показали, что рабочая область спектра составной голограммы простирается в диапазоне 3,1 – 10 мкм; у "одиночного" же СГОЭ она в 7 раз уже: 3,5 – 4,5 мкм. Как видно, происходит существенное расширение рабочей спектральной области СГОЭ, предназначенной для



**Рис.10.** Метод расширения рабочей спектральной области рельефно-фазовых СГОЭ: а – синусоидальная модуляция, б и в – ступенчатая модуляция

**Fig. 10.** Method of expansion of a work spectrum region of relief phased CGHOEs: а – sinusoidal modulation, б and с – graded modulation

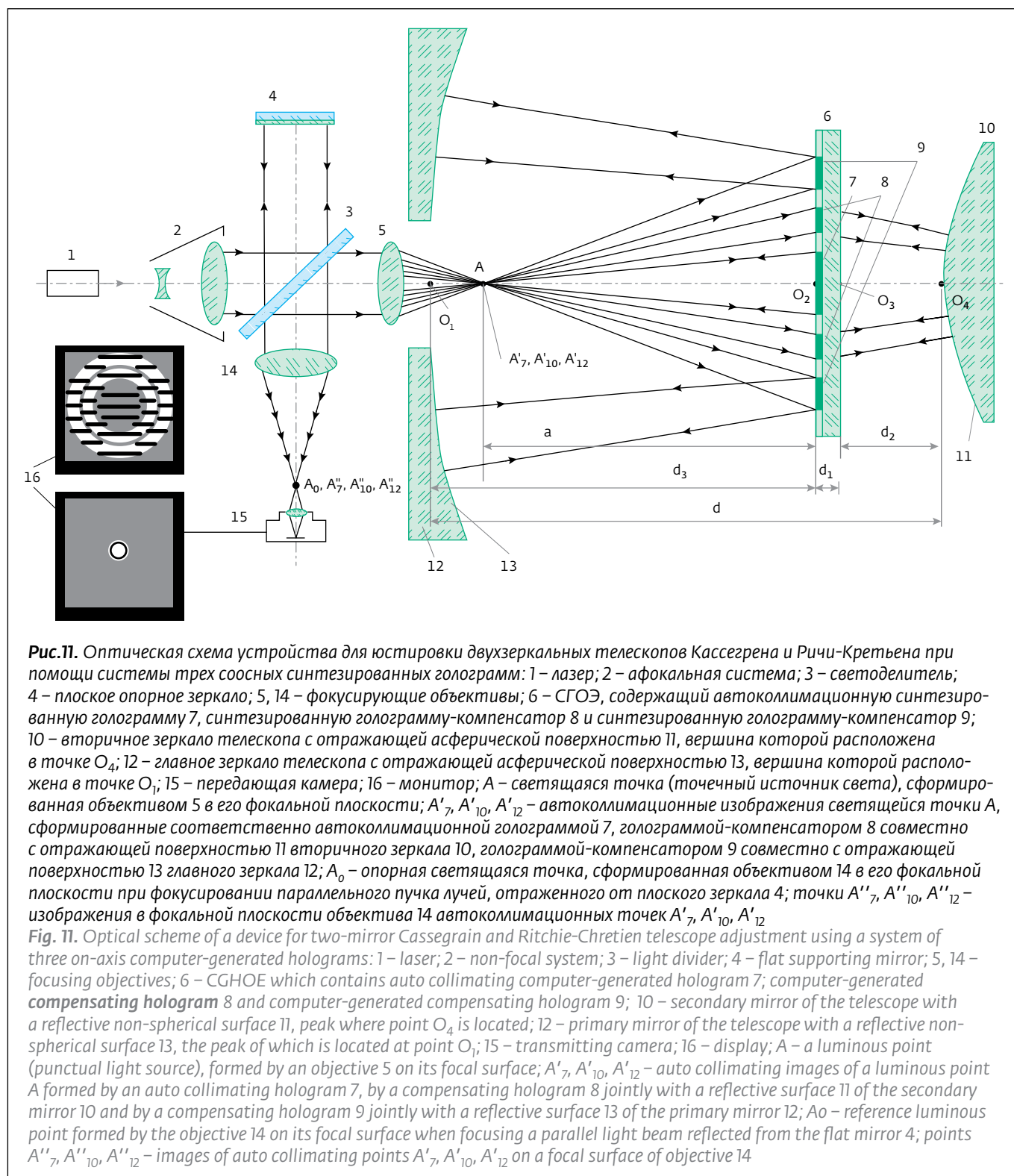
visualizing in wind tunnels and ballistic tracks, for "expansion" and "compression" of a work spectrum region.

Inaccuracy of lens decentralization value control doesn't exceed 10  $\mu\text{m}$ . In case of spherical surface curve control of a sample glass [12] using CGHOE (curve radius measuring range  $r - \pm 250$  to  $\pm 100,000$  mm), allowable inaccuracy is ensured according to precision class 1 (GOST2786-82 "Sample glass for spherical optical surfaces form and radius verification. Technical conditions"). This allows to estimate maximum deviation of curve radii with  $\pm 0.02\%$  value within the range of their rated values of at least 250 to 1000 mm (inclusive) and with the value of  $(\pm 0.02r/1000)\%$  for curve radii larger than 1000 mm. When measuring curve radii of cylindrical surfaces of optical components, namely, of cylindrical mirrors, using one-dimensional CGHOEs [9, 10] the range of curve radii alteration and inaccuracy of their measuring are similar to values which are typical when controlling spherical surfaces.

работы на пропускание, при подходящем подборе пары оптических материалов.

В некоторых случаях высокая спектральная селективность СГОЭ может быть весьма полезно использована. Так, например, в фокусирующих

CGHOEs in form of kinoforms (with transition from binary groove form with diffraction efficiency of 35 to 40% to multi-level form with diffraction efficiency of 85 to 90%, and, within limits, to serrated form with limited diffraction efficiency



системах, работающих в ограниченном спектральном диапазоне в условиях высокого уровня фоновых засветок (в частности, солнечно-"слепые" оптические системы в области длин волн 250–350 нм), это свойство голограмм позволяет существенно увеличить отношение "сигнал-фон" на входе фотоприемного устройства.

"Сжатие" рабочей спектральной области СГОЭ можно осуществить путем [9]:

- подбора пары оптических материалов, у которых разность показателей преломления уменьшается с ростом длины волны; при этом, чем быстрее она уменьшается, тем лучше;
- реализации зависимости дифракционной эффективности ступенчатых СГОЭ от глубины фазовой модуляции путем значительного "дозированного" увеличения глубины микро-рельефа.

Для примера проанализируем семейство спектральных кривых дифракционной эффективности 8-уровневого пропускающего СГОЭ, рассчитанное в диапазоне длин волн от 400 до 900 нм для разных значений глубины фазового рельефа  $H$ : от  $H^* = \lambda_0$  до  $H^* = 33\lambda_0$ , где  $\lambda_0 = 632,8$  нм;  $H^* = H(n-1)$ ;  $n = 1,5146$ . Для этого семейства кривых характерно, что с изменением длины волны дифракционная эффективность проходит через ряд чередующихся вторичных максимумов и минимумов, ширина которых последовательно уменьшается с уменьшением длины волны. Поэтому, если существует возможность формирования достаточно "глубоких" микроструктур, то для заданной длины волны можно достичь многократного уменьшения полноты. В данном примере – приблизительно на порядок. При этом, однако, необходимо обеспечить подавление "паразитных" вторичных максимумов пропускания слева и справа от заданной длины волны. Таким образом, СГОЭ в данном случае способен выполнять одновременно две функции: оптического корректора (или фокусатора) и полосового спектрального фильтра.

Интересно рассмотреть эволюцию терминологии в области осевых СГОЭ: зонная пластинка Френеля (пластинка Сорэ), зонная пластина Рэлея, зонная рельефно-фазовая бинарная пластина Вуда, голограмма Габора, зонные фазовые пластины Слюсарева (пластина имеет пилообразный профиль френелевских зон, расчет которых производится в сочетании с методом построения облегченных составных линз, и позволяет строить единственное изображение предмета в монохроматическом свете [19]) и Тудоровского (пластина – "ступенчатая линза", представляющая собой

of 95% [13]) are an alternative means of correction of chromatic aberrations of lens centered systems (objectives). This is especially valuable for UV and IR spectrums due to a limited list of materials which are transparent within these spectrums.

We must stress that this unique possibility of diffracting structures' use was initially (1957) pointed out and justified by G.Slyusarev [14].

Use of diffracting structures as basic objectives or compensators in the object branch of interference instrument holographic systems allows visualizing of gas flow in wind tunnels and ballistic tracks [15]. Inclusion of holographic objectives into these systems gives them new properties, improves technical parameters of modern opto-physical measurement systems: it increases diameter of studied gas flow from 230 to 100 mm and ensures maximum values of relative apertures reached in collimator objectives (from 1:3,5 to 1:2 and even to 1:1).

Portable diffracting element kits provide visual demonstration of separate aberrations for training purposes. For example, a training and research set of CGHOE-replicas [16] consists of a "non-aberrant" synthesized holographic lens (SHL), cylindrical SHL, SHL-tor, synthesized holographic simulator (SHS) of spherical aberrations of orders 3 and 5, SHS of spherical aberrations of 5-th order, SHS of sinusoidal aberrations (for all elements of this set the light diameter is 35 mm, work wavelength is 633 nm and diffraction efficiency is ~40%).

As a summary of diffracting elements' use for "expansion" and "compression" of a work spectrum region [9, 17] we will remind about its main point. Method of spectral selection regulation of relief phase CGHOEs (alignment of diffraction efficiency relation to wavelength within the whole work spectrum range) is in selecting two transparent materials with certain difference of their refraction's relation to wavelength. This method is implemented with the help of:

- use of sinusoidal relief phase modulation, when a holographic element consists of two phase holograms 1 and 2 with anti-phase structures, which are connected via contrary work surfaces and made using materials with different refraction values  $n_1$  and  $n_2$  (Fig. 10 a);
- selection of a system of two binary holograms 1 and 2, connected using transparent adhesive material 3 with refraction value  $n_3$  (Fig. 10 b);
- use of a single hologram 2, connected using transparent medium 1 with refraction value  $n_1$  to a protective plate 6 with refraction value  $n_4$  (Fig. 10 c).



комбинацию пластины Слюсарева и обычной тонкой линзы с некоторой оптической силой [19]), искусственная голограмма (этот термин предложен специалистами ГИПО [5]; он использовался в научно-технических публикациях до вступления в силу ГОСТ 24865.1-81 "Голография и голографические методы контроля качества. Термины и определения"), машинная голограмма, синтетическая голограмма, цифровая голограмма, компьютерная голограмма, синтезированная голограмма (этот термин также предложен специалистами ГИПО, заменивший с 1981 года термин "искусственная голограмма") и киноформ-голограмма [9, 18, 19]. В настоящее время в отечественной научно-технической литературе утвердился термин "синтезированный голограммный оптический элемент" (СГОЭ), которому соответствует английский аналог - "computer-generated hologram optical element (CGHOE)".

Российские голографические школы: в Ленинграде (Санкт-Петербурге) - Ю.Н. Денисюк и, почти с самого начала, М.А.Ган с сотрудниками, из них прежде всего, А.Ф.Первеев; в Казани - К.С.Мустафин, А.Ф.Белозёров и А.В.Лукин с сотрудниками, прежде всего, Р.А.Рафиков и Н.П.Ларионов; в Куйбышеве (Самаре) - В.А.Сойфер с сотрудниками; в Пензе - Г.И.Грейсук с сотрудниками; в Новосибирске - В.П.Коронкевич и, практически с самого начала, А.Г.Полещук с сотрудниками - выполнили основополагающие работы по принципам расчета, вопросам изготовления, аттестации и практическому применению осевых СГОЭ (киноформов) и продолжают развитие этих направлений в настоящее время в интересах развития различных отраслей науки и техники и сферы образования [9, 10, 15, 18-20].

Особенно следует отметить комплекс научно-технологических работ с широким практическим применением, выполненных в Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН (Новосибирск) В.П.Коронкевичем и А.Г.Полещуком с сотрудниками. Отличительной особенностью этой технологии изготовления СГОЭ является применение компьютерно-управляемого сфокусированного лазерного пучка, формирующего заданную дифракционную структуру в тонкослойных светочувствительных покрытиях [21]. Наибольший диаметр СГОЭ, изготавливаемых по этой технологии, достигает 300 мм.

В настоящее время в ОАО "НПО ГИПО" разрабатываются актуальные для современного телекоммуникационного метода и устройства контроля

Phase difference between two rays 4 and 5, which pass at the distance of a half of a period of a relief structure from each other can be presented as

$$\Delta\phi = (2\pi/\lambda)h[n_2(\lambda) - n_1(\lambda)]. \quad (2)$$

Maximum value of diffraction efficiency  $\eta(\lambda) = \eta_{\max}$  is reached in case of phase difference  $\Delta\phi_{\text{opt}}$ , the value of which depends on the form of a micro relief. Thus, for example, in case of a sinusoidal form (Fig. 10a)  $\Delta\phi = 1.85$  rad, at the same time, maximum effectiveness in the 1-st order of diffraction is ~34%. For a graded bimodal relief type and an on-off ratio of 2 (see Fig. 10b, 10c),  $\Delta\phi = 1.57$  rad and  $\eta_{\max} = 40.5\%$ .

As it results from the proportion presented above (2): to widen the work region of the CGHOE spectrum, it is necessary to weaken (ideally - to eliminate) dependence of phase difference  $\Delta\phi$  from wavelength  $\lambda$ . This is achieved by using such pair of optical materials for which dependence (3) of their refraction value difference from the wavelength changes proportionally to the wavelength in the work spectrum range

$$n_2(\lambda) - n_1(\lambda) = a_1\lambda + b_1. \quad (3)$$

where  $a_1$  and  $b_1$  are parameters defined by optical characteristics of chosen materials, in which connection, it is advisable to have  $a_1\lambda \gg b_1$  within the work region of the spectrum. The height of CGHOE relief  $h$  is chosen from the abovementioned proportion (2)  $\Delta\phi(\lambda) = \Delta\phi_{\text{opt}}(\lambda_0)$ , where  $\lambda_0$  is a wavelength with which  $h_{\max}$  is reached.

In case one hologram is made using solid-state material, the second one can be made by filling the relief structure of the first hologram with a transparent liquid material with subsequent solidification, for example, by polymerization. Non-solidifying material can also be used, in that case it must be sealed by a transparent lamina 6 (Fig.10 c). Both these holograms, which form CGHOE, are made from solid-state optical materials and can be combined using transparent adhesive.

To implement the presented method of CGHOE spectral work region widening it is necessary to provide the possibility of estimated relief phase holographic structure formation in various optical materials with a wide range of refraction and dispersion values.

As an example we will compare estimated normalized dependence of diffraction efficiency from wavelength for a CGHOE made from a pair of optical crystals "fluoric lithium - fluoric barium" and for a "reference" sample of a CGHOE made from only one material - fluoric barium. These optical materials have





юстировки зеркальных центрированных оптических систем. Один из таких методов [22], разработанный на основе использования СГОЭ с тремя осевыми соосными между собой юстировочными синтезированными голограммами, изготовленными на общей подложке, обеспечивает контроль юстировки двухзеркальных телескопов Кассегрена и Ричи-Кретьена. Оптическая схема устройства для проведения этой юстировки изображена на рис. 11, где СГОЭ 6 содержит структуры трех синтезированных голограмм 7, 8 и 9, центром симметрии которых является точка  $O_2$ . При этом голограммы 8 и 9 имеют кольцевые апертуры. Прямая линия, проходящая через точки  $O_2$  и  $O_3$  перпендикулярно к рабочей поверхности СГОЭ 6, является осью симметрии голограмм 7, 8 и 9. Она задает оптическую ось устройства, когда светящаяся точка (точечный источник света)  $A$  выведена на данную ось симметрии. Это осуществляется тогда, когда посредством линейных смещений и угловых поворотов СГОЭ 6 с помощью автоколлимационной голограммы 7 получают автоколлимационное изображение  $A'_7$  светящейся точки  $A$ . В этом случае и СГОЭ 6 будет установлено на заданное расстояние  $a$  относительно монохроматического точечного источника света  $A$ . Синтезированная голограмма 8 является голограммой-компенсатором и служит для контроля установки вторичного зеркала 10 на расстояние  $d_2$  от СГОЭ 6 и юстировки его в этом положении в поперечном направлении к оптической оси, а также по углу к ней. Синтезированная голограмма 9 также является голограммой-компенсатором и служит для контроля установки главного зеркала 12 на расстоянии  $d_3$  от СГОЭ 6 и юстировки его в этом положении в поперечном направлении к оптической оси и по углу к ней. На стадии синтеза голограмм 7, 8 и 9 выбираются отрезки  $a$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$ ; при этом принимается условие, что сумма величин отрезков  $d_1$ ,  $d_2$  и  $d_3$  должна быть равна заданному расстоянию  $d$  между вершинами  $O_2$  и  $O_3$  асферических поверхностей главного и вторичного зеркал телескопа. При проведении процесса юстировки зеркал телескопа необходимо на конечной стадии юстировки получить автоколлимационные изображения  $A'_7$ ,  $A'_{10}$ ;  $A'_{12}$  светящейся точки  $A$ . Контролировать этот процесс можно путем наблюдения на экране монитора 16 изображений этих точек совместно с изображением опорной точки  $A_0$  и затем совмещения их между собой. Контролировать данный процесс можно и по интерференционным картинкам, наблюдаемым также на экране монитора 16. Настройку

a good transmission in far infrared spectrum region. With optimal wavelength of  $4 \mu\text{m}$  for a composite CGHOE, relief depth is  $18.6 \mu\text{m}$  and for fluoric barium CGHOE relief depth is  $4.4 \mu\text{m}$ . Estimations show that spectrum work region of a composite hologram stretches from  $3.1$  to  $10 \mu\text{m}$ ; "single" CGHOE, on the other hand, has this region 7 times narrower - from  $3.5$  to  $4.5 \mu\text{m}$ . It shows that there is a considerable widening of a spectrum work region of a CGHOE, intended for transmission, in case of proper optical material pair selection.

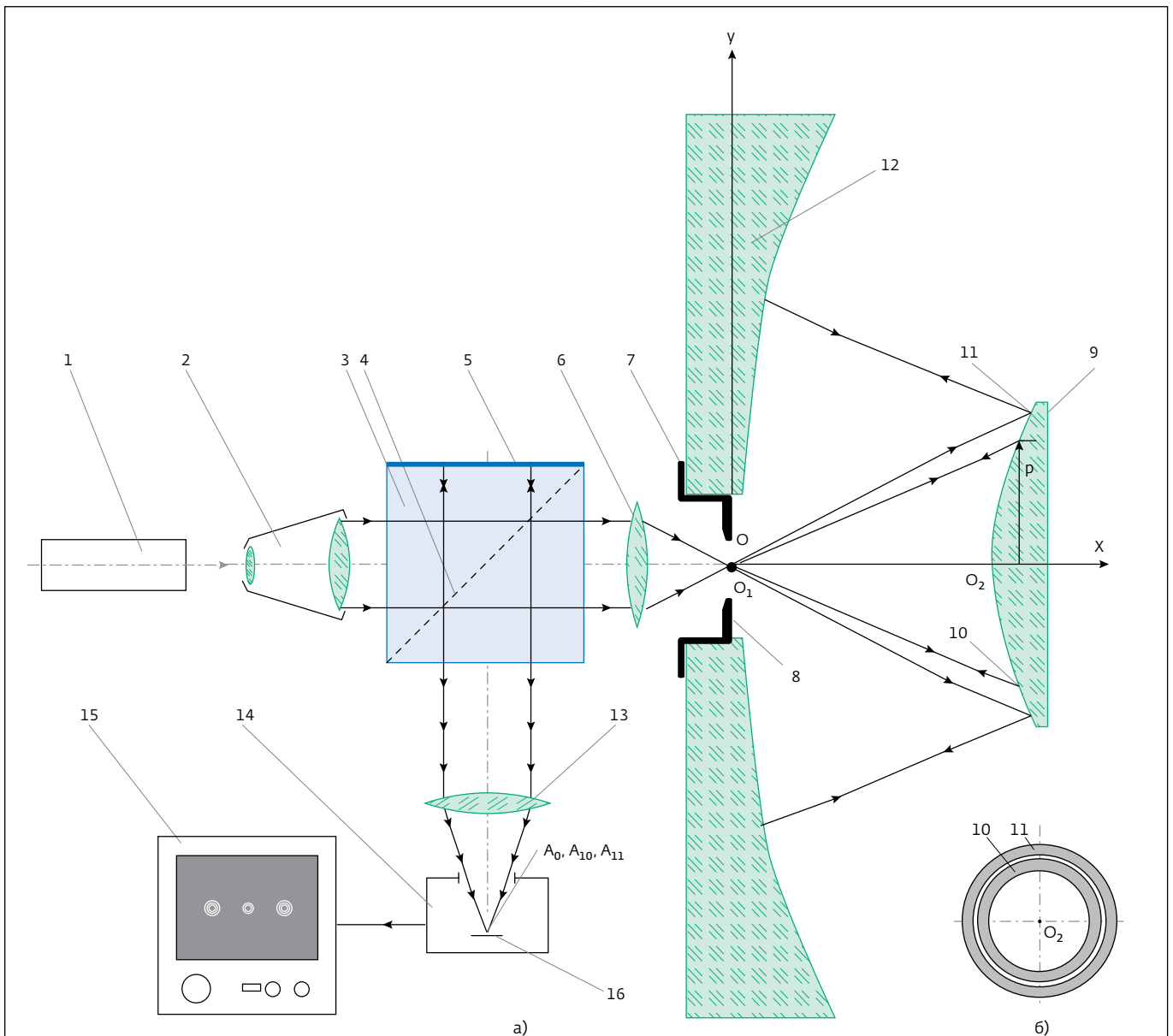
In some cases high spectral selectiveness of CGHOEs can be used quite efficiently. Thus, for example, in focusing systems which work in a limited spectral range in conditions of a high level of background illumination (in particular, solar-blind optical systems in wavelength regions of  $250$ - $350 \text{ nm}$ ), this property of holograms allows for a considerable increase of a "signal/background" ratio at the input of a photo receptor.

"Compression" of a spectrum work region of CGHOEs can be done the following way [9]:

- selection of a pair of optical materials the difference of refraction values of which decreases with wavelength increase; at the same time, the faster it decreases - the better;
- realization of graded CGHOEs diffraction efficiency dependence from the phase modulation depth by means of a considerable "dosed" micro relief depth increase.

For example, we will analyze the flock of spectral curves of diffraction efficiency of a level 8 transmitting CGHOE, estimated within wavelength range from  $400$  to  $900 \text{ nm}$  for different phase relief depth values  $H$ : from  $H^* = \lambda_0$  to  $H^* = 33\lambda_0$ , where  $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$ ;  $H^* = H(n - 1)$ ;  $n = 1.5146$ . This flock of curves is characterized by the fact, that, with wavelength alteration, diffraction efficiency passes a row of alternating maximums and minimums, width of which sequentially decreases with decrease of wavelength. Due to that, if there is a possibility of forming of sufficiently "deep" microstructures, then, for the specified wavelength a multiple half-width decrease can be achieved. In the current example - approximately by an order of magnitude. At the same time, however, it is necessary to ensure suppression of "parasitic" secondary transmission maxima to the left and to the right of the specified wavelength. Thus, the CGHOE in this case can perform two functions at the same time: of an optical corrector (or a focuser) and of a band spectral filter.

It is interesting to study terminology evolution in the area of on-axis CGHOEs: Fresnel zone plate



**Рис.12.** Устройство контроля юстировки зеркал телескопа: а – оптическая схема: 1 – лазер; 2 – коллиматор; 3 – светоделитель в виде призмы-куба; 4 – полупрозрачный слой; 5 – опорное зеркало; 6, 13 – фокусирующие объективы; 7 – диафрагма; 8 – плоскость диафрагмы, совмещенная с задней фокальной плоскостью объектива 6; 9 – вторичное зеркало телескопа; 10 – кольцевая автоколлимационная голограмма; 11 – кольцевая голограмма-компенсатор; 12 – главное зеркало телескопа; 14 – позиционно-чувствительное фотоприемное устройство; 15 – блок отображения и обработки информации; 16 – светочувствительная площадка фотоприемного устройства;  $O_{xy}$  – декартова система координат с началом в вершине  $O_1$  отражающей поверхности главного зеркала;  $O_2$  – вершина отражающей поверхности вторичного зеркала;  $\rho$  – радиус середины  $i$ -й кольцевой зоны в структурах юстировочных синтезированных голограмм 10 и 11; б – вторичное зеркало 9 телескопа с юстировочными синтезированными голограммами 10 и 11 (фронтальный вид)

**Fig. 12.** Adjustment control device for telescope mirrors: a – optical scheme: 1 – laser, 2 – collimator; 3 – light divider in the form of a cubic prism; 4 – semi-transparent layer; 5 – supporting mirror; 6, 13 – focusing objectives; 7 – diaphragm; 8 – diaphragm surface combined with a rear focusing surface of the objective 6; 9 – secondary mirror of the telescope; 10 – ring-shaped auto collimating hologram; 11 – ring-shaped compensating hologram; 12 – primary mirror of the telescope; 14 – position-sensitive photo receptor; 15 – information output and processing unit; 16 – light-sensitive area of the photo receptor;  $O_{xy}$  – Cartesian coordinates system start in  $O_1$  peak of the reflective surface of the primary mirror;  $O_2$  – a peak of the reflective surface of the secondary mirror;  $\rho$  – radius of the middle area of the  $i$ -th ring-shaped zone in structures of computer-generated adjustment holograms 10 and 11; b – secondary mirror 9 of the telescope with computer-generated adjustment holograms 10 and 11 (frontal view)



на экране монитора 16 изображений точек или интерференционных полос осуществляют продольным смещением камеры 15. В работе [22] показано, что данный метод может быть использован и при юстировке телескопа Кассегрена с фокусом Эпса-Шульте.

Второй метод, служащий для контроля юстировки двухзеркальных систем телескопов Кассегрена и Ричи-Кретьена, основан на использовании двух осевых синтезированных голограмм, наносимых на рабочей (выпуклой) поверхности вторичного зеркала телескопа соосно между собой и боковой цилиндрической поверхностью вторичного зеркала [23]. В этом случае ось симметрии синтезированных голограмм совпадает с осью симметрии асферической поверхности вторичного зеркала телескопа (погрешность несовпадения указанных осей симметрии может составлять не более нескольких микрон). Одна из этих голограмм является автоколлимационной и служит для юстировки вторичного зеркала относительно точечного источника света, а другая – является голограммой-компенсатором и служит для юстировки главного зеркала телескопа относительно вторичного зеркала. Обе синтезированные голограммы имеют кольцевые апертуры и могут наноситься в краевой зоне вторичного зеркала вне его светового диаметра.

На рис.12а представлена оптическая схема устройства для реализации метода контроля юстировки двухзеркальных телескопов на основе использования таких голограмм. На рис.12 б изображено вторичное зеркало 9 телескопа с двумя кольцевыми синтезированными голограммами, расположенными в краевой зоне вторичного зеркала. Следует отметить, что юстировочные голограммы 10 и 11 могут наноситься и в центральной зоне светового диаметра вторичного зеркала 9, если их изготавливать для длины волны  $\lambda$ , меньшей коротковолновой границы спектрального диапазона, в котором работает телескоп (например, телескопы для инфракрасной области спектра). Такое расположение юстировочных голограмм открывает возможность контроля юстировки данным методом и космических телескопов в процессе их работы на орбите.

Таким образом, в данной статье показано, что на основе использования осевых СГОЭ разработаны:

- комплекс прецизионных методов и средств для осуществления контроля формы и качества разнообразных видов асферических (в том

(Soret plate), Rayleigh zone plate, Wood relief phase binary zone plate, Gabor hologram, Slyusarev phase zone plates (the plate has a serrated profile of Fresnel zones, estimation of which is performed in combination with light composite lens forming method and allows to create a single image of an object in a monochromatic light [19]) and Tudorovskiy plates (the plate is a "graded lens", a combination of a Slyusarev plate and a conventional thin lens with a certain optical force [19]), artificial hologram (this term has been proposed by GIPO engineers [5]; it was used in scientific and technological works until GOST 24865.1 – 81 "Holography and holographic methods of quality control. Terms and definitions" came into force), machine-made hologram, synthetic hologram, digital hologram, computer hologram, computer-generated hologram (this term, which replaced the term "artificial hologram" in 1981, was also proposed by GIPO engineers) and kinoform hologram [9, 18, 19]. Currently, a term "computer-generated hologram optical element" (CGHOE) gained a foothold in native scientific and technological literature which corresponds to its English counterpart – "computer-generated hologram optical element" (CGHOE).

Russian holographic schools: in Leningrad (St. Petersburg) – Y.N.Denisyuk and, nearly from the start – M.A. Gun with colleagues, primarily – A.F.Perveyev; in Kazan – K.S.Mustafin, A.F.Belozyorov and A.V.Lukin with colleagues, primarily – R.A.Rafikov and N.P.Larionov; in Kuybyshev (Samara) – V.A.Soyfer with colleagues; In Penza – G.I.Greysuch with colleagues; in Novosibirsk – V.P.Koronkevich and, practically from the beginning, A.G.Poleschuk with colleagues, have carried out fundamental works on estimation principles, manufacturing issues, certification and practical use of on-axis CGHOEs (kinoforms) and still continue to develop these schools for the sake of development of various branches of scientific, technological and educational fields [9, 10, 15, 18–20].

It is worth mentioning of a complex of scientific and technological works with a wide practical use carried out in the Institute of Automation and Electrometry of Siberian Branch of RAN (Novosibirsk) by V.P. Koronkevich and A.G. Poleschuk with colleagues. A distinctive feature of this CGHOE manufacturing technology is use of computer-controlled focused laser beam which forms the specified diffracting structure in thin-layered light-sensitive coatings [21]. The biggest CGHOE diameter manufactured using this technology reaches up to 300 mm.

Currently, OJSC "NPO GIPO" develops methods and devices for mirrored centered optical systems

числе цилиндрических, торических) поверхностей оптических деталей;

- методы контроля юстировки центрированных линзовых и зеркальных систем, в том числе двухзеркальных систем телескопов;
- разнообразные приложения для решения практических задач как в оптическом производстве и приборостроении, так и в образовательной сфере.

Осевые СГОЭ являются базовыми элементами для создания перспективных средств контроля юстировки двухзеркальных систем телескопов космического базирования и оптических систем крупногабаритных объективов интерференционных приборов для проведения оптико-физических исследований.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Вуд Р. Физическая оптика /Пер. с англ. под ред. акад. Д.С. Рождественского. – М.: Гл. ред. общетехн. лит-ры, 1936, с. 52–55.
2. А. с. 277269 СССР. Голографический способ контроля оптических поверхностей/Г.Буйнов, А.Лукин, С.Мирумянц., К.Мустафин. – Б.И., 1970.
3. Jordan J.A., Jr., Hirsch P.M., Lesem L.B., Van Rooy D.L. Kinoform lenses. – Applied Optics, 1970, v. 9, № 8, p. 1883–1887.
4. Macgowern A.J., Wyant J.C. Computer generated holograms for testing optical elements. – Applied Optics, 1971, v. 10, № 3, p. 619–624.
5. Буйнов Г.Н., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С., Рафиков Р.А. Голографический интерференционный контроль асферических поверхностей. – Оптико-механическая промышленность, 1971, № 4, с. 6–11.
6. Schwider J., Buroy R. Testing of aspherics by means of rotational-symmetric synthetic holograms. – Optica Applicata, 1976, v. 6, № 1, p. 83–88.
7. Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мустафин К.С. Искусственная голограмма как оптический компенсатор. – Оптика и спектроскопия, 1972, т.32, в.2, с. 396–399.
8. А. с. 371857 СССР. Искусственная голограмма оптической поверхности/ Н.Ларионов, А.Лукин, К.Мустафин. – Б.И., 1978.
9. Лукин А.В. Голограммные оптические элементы. – Оптический журнал, 2007, т.74, № 1, с. 80–87.
10. Агачев А.Р., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Мирнова Т.А. и др. Синтезированная голограммная оптика. – Оптический журнал, 2002, т.69, № 12, с. 23–32.

adjustment of current importance for modern telescope production. One of such methods [22] developed based on use of CGHOEs with three on-axis computer-generated adjusting holograms manufactured on one joint substrate ensure adjustment control of two-mirror Cassegrain and Ritchey-Chretien telescopes. Optical scheme of the adjustment device is shown on Fig. 11, where CGHOE 6 contains structures of three computer-generated holograms 7, 8 and 9 center of symmetry of which is the point  $O_2$ . At that, holograms 8 and 9 have ring-shaped apertures. A straight line which passes through points  $O_2$  and  $O_3$  transversely to CGHOE 6 work surface is a symmetry axis of holograms 7, 8 and 9. It assigns the optical axis of the device when the luminous point (punctual light source) A is brought to this symmetry axis. This is performed when, by the means of linear displacement and angular turns of CGHOE 6 with help of auto collimation hologram 7 automatic collimation image  $A'_7$  of the luminous point A is obtained. In this case CGHOE 6 will also be positioned at the specified distance  $a$  towards the monochromatic light source A. Computer-generated hologram 8 is a compensating hologram and serves to control the secondary mirror assembly 10 located at the distance  $d_2$  from CGHOE 6 and its adjustment in this position transversally to the optical axis and angularly to it. Computer-generated hologram 9 is also a compensating hologram and serves to control the primary mirror assembly 12 at the distance  $d_3$  from CGHOE 6 and its adjustment in this position transversally to the optical axis and angularly to it. During the stage of synthesis of holograms 7, 8 and 9 sections  $a$ ,  $d_1$ ,  $d_2$  and  $d_3$  are selected; at the same time, a condition is accepted that the sum of  $d_1$ ,  $d_2$  and  $d_3$  section lengths must be equal to the specified distance  $d$  between the peaks  $O_2$  and  $O_3$  of non-spherical surfaces of the primary and the secondary mirrors of the telescope. When conducting adjustment process of the telescope mirrors, at the final adjustment stage it is necessary to obtain auto collimating images  $A'_7$ ,  $A'_{10}$ ,  $A'_{12}$  of the luminous point A. This process can be controlled by monitoring 16 images of these points on a display jointly with an image of a control point  $A_0$  and their subsequent connection to one another. Setup of 16 images of points or interference bands on the display is made by longitudinal movement of the camera 15.

Study [22] shows that this method can be used when adjusting Cassegrain telescope with Epps-Shulte focus.

The second method for adjustment control of two-mirror systems of Cassegrain and Ritchey-Chretien

11. А.с. 763070 СССР. Делительная машина/ Г.Гнутова, В.Гунченков, В.Жамов, В.Зверев и др. – Б.И., 1980.
12. А.с. 557621 СССР. Способ контроля радиуса кривизны сферических поверхностей/ В.Казанкова, Н.Ларионов, А.Лукин, Мустафин, Р.Рафиков. – Б.И., 1978.
13. **Damman H.** Spectral characteristic of stepped-phase gratings. – *Optik*, 1979, v. 58, № 5, p. 409-417.
14. **Слюсарев Г.Г.** Оптические системы с фазовыми слоями. – Доклады АН СССР, 1957, т. 113, № 4 с. 780-783.
15. **Белозёров А.Ф.** Оптические методы визуализации газовых потоков. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2007.
16. **Беляков Ю.М., Лукин А.В., Мельников А.Н., Рафиков Р.А., Саттаров Ф.А.** Комплект голограммных оптических элементов "HOLOS" как техническое средство обучения. – Вестник КГТУ им. А.Н. Туполева, 2003, № 3, с. 20-23.
17. Патент РФ на изобретение № 1271240. Голограммный оптический элемент. 1985. А.Лукин, К.Мустафин, Р.Рафиков.
18. **Фролова Н.П.** Дифракционная оптика (обзор). – *Оптико-механическая промышленность*, 1988, № 9, с. 49-56.
19. **Ган М.А.** 50 лет киноформной оптики. Итоги и перспективы развития. – *Оптический журнал*, 2006, т.73, № 7, с. 9-16.
20. **Грейсхух Г.И., Ежов Е.Г., Левин И.А., Степанов С.А.** Расчет высокоапертурных конфокальных дифракционно-линзовых объективов. – *Компьютерная оптика*, 2011, т. 35, № 1, с. 22-28.
21. **Коронкевич В.П., Корольков В.П., Полещук А.Г.** Лазерные технологии в дифракционной оптике. – *Автометрия*, 1998, № 6, с. 5-26.
22. **Иванов В.П., Ларионов Н.П., Лукин А.В., Нюшкин А.А.** Юстировка двухзеркальных центрированных оптических систем с использованием синтезированных голограммных оптических элементов. – *Оптический журнал*, 2010, т.77, № 6, с.14-18.
23. **Балоев В.А., Иванов В.П., Ларионов Н.П., Лукин А.В. и др.** Прецизионный метод контроля юстировки двухзеркальных телескопов на основе использования системы кольцевых синтезированных голограмм. – *Оптический журнал*, 2012, т. 79, № 3, с. 56-64.

telescopes is based on using two on-axis computer-generated holograms applied to a (convex) work surface of a secondary mirror of the telescope on-axis with a side cylindrical surface of the secondary mirror [23]. In this case, a symmetry axis of computer-generated holograms concurs with a symmetry axis of a non-spherical surface of the secondary mirror of the telescope (inaccuracy of non-concurrence of these axes can make up no more than several micrometers). One of such holograms is auto collimating and serves for adjustment of the secondary mirror relatively to a punctual light source, and the second one is a compensating hologram and serves for adjustment of the primary mirror of the telescope relatively to the secondary mirror. Both computer-generated holograms have ring-shaped apertures and can be applied to the edge zone of the secondary mirror outside of its light diameter.

Fig. 12 a shows an optical scheme of a device for implementing of a control method for two-mirror telescope adjustment based on the use of such holograms. Fig. 12 b shows a secondary mirror of the telescope 9 with two ring-shaped computer-generated holograms located at the edge zone of the secondary mirror.

It is worth noting that adjustment holograms 10 and 11 can be also applied to the central zone of the secondary mirror 9 light diameter in case they are manufactured for a wavelength  $\lambda$  which is less than a short-wave border of a spectral range the telescope works in (for example, telescopes for the infrared region of the spectrum). Such positioning of adjustment holograms opens up a possibility to also control adjustment of space-based telescopes during their work on the orbit using this method.

Thus, the current article shows that following methods have been developed, using on-axis CGHOEs:

- a complex of precision methods and means to conduct control of forms and quality of various types of non-spherical (including cylindrical, toric) surfaces of optical components;
- control methods of adjustment of centered lens and mirror systems, including two-mirror telescope systems;
- various applications for solving practical tasks in both optic industry and instrument making, as well as in educational field.

On-axis CGHOEs are basic elements for promising means of adjustment control of two-mirror space-based telescope systems and optical systems of large-dimension objectives of interference instruments for opto-physical research. ■