

УДК 681.7.068

**С.Л. Микерин, В.Д. Угожаев**Институт автоматизации и электрометрии  
Сибирского отделения РАН, Новосибирск, Россия**ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ ДВУХЛУЧЕВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР  
НА ОСНОВЕ КВАРЦЕВОГО СВЕТОДЕЛИТЕЛЬНОГО БЛОКА,  
ОСНАЩЕННЫЙ НЕПОДВИЖНЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ**

Аналитически исследован двухлучевой интерферометр на основе симметричного светоделительного блока из кварцевого стекла с неподвижными зеркалами, оснащенный неподвижным фотоприемником. В интерферометре возможна широкополосная перестройка пространственной частоты записываемой интерференционной картины. Ее положение стабильно в процессе перестройки благодаря взаимному согласованию линейного и углового перемещений исходного светового пучка по входной поверхности блока. Рассчитаны перестроечные характеристики интерферометра с учетом различных факторов виньетирования световых пучков, определена область его конфигурационных параметров, в которой виньетирование отсутствует. Целевым предназначением прибора является быстрое изменение пространственной частоты при записи волоконных брэгговских решеток.

**Ключевые слова:** двухлучевой интерферометр, светоделительный блок, неподвижные зеркала, неподвижный фотоприемник, интерференционная картина, перестраиваемая пространственная частота, виньетирование, волоконная брэгговская решетка.

**S.L. Mikerin, V.D. Ugozhaev**Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch,  
Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation**TUNABLE TWO-BEAM INTERFEROMETER BASED  
ON A QUARTZ BEAM-SPLITTING UNIT EQUIPPED  
WITH A FIXED PHOTODETECTOR**

A two-beam interferometer based on a symmetric quartz glass beam-splitter with fixed mirrors, equipped by a fixed photodetector, is analytically investigated. In the interferometer, broadband tuning of the spatial frequency of the recorded interference pattern is possible. Its position is stable during the tuning due to the mutual matching of the linear and angular displacements of the original light beam along the input surface of the block. The tuning characteristics of the interferometer are calculated taking into account various factors of vignetting of light beams, a domain of its geometric parameters in which there is no vignetting is determined. The purpose of the device is to rapidly change the spatial frequency when recording fiber Bragg gratings.

**Keywords:** two-beam interferometer, beam-splitting unit, fixed mirrors, fixed photodetector, interference pattern, tunable spatial frequency, vignetting, fiber Bragg grating.

Двухлучевые интерферометры с возможностью перестройки пространственной частоты записываемых дифракционных решеток широко востребованы в различных областях голографии и фотоники, например, для исследования свойств фотополимерных материалов и записываемых в них голограмм [1–5], для записи в оптических волокнах массивов распределенных брэгговских решеток (ВБР) в качестве датчиков физического состояния волокна [6] и для других применений. Пространственная частота симметричной пропускающей решетки определяется формулой

$$\Omega = (2 \sin \alpha) / \lambda,$$

откуда следует широко используемый способ управления пространственной частотой путем изменения угла схождения  $2\alpha$  интерферирующих световых пучков. В [7] описан интерферометр на основе светоделительного кубика с двумя неподвижными относительно него зеркалами при неподвижном фотоприемнике; в этом интерферометре при варьировании угла схождения положение интерференционной картины (ИК) стабилизируется благодаря взаимному согласованию линейного и углового перемещений подвижного зеркала, направляющего световой пучок в кубик. Такие интерферометры можно объединять в системы для записи двумерных решеток с независимой установкой пространственной частоты в каждом измерении [8]. Следует отметить, что для записи протяженных ВБР (10–15 мм) потребуется крупногабаритный светоделительный кубик, и более подходящим представляется интерферометр на основе светоделительного блока [9], поскольку длина хода световых пучков в его материале в несколько раз короче, чем в кубике соответствующего размера. Кроме того, плоскопараллельный блок более технологичен по сравнению с ним.

Целью данного исследования является анализ перестройки пространственной частоты в интерферометре на основе симметричного светоделительного блока из кварцевого стекла с неподвижными зеркалами, в котором реализуется стабилизация положения ИК путем согласованных между собой линейного и углового перемещений светового пучка на входе в светоделительный блок, осуществляемых подвижным зеркалом с помощью простого рычажного механизма [7].

## 1. Анализ интерферометра на основе СДБ с неподжным фотоприемником

На рис. 1 представлена оптическая схема интерферометра, предназначенного для записи голографических решеток на неподжном фотоприемнике.

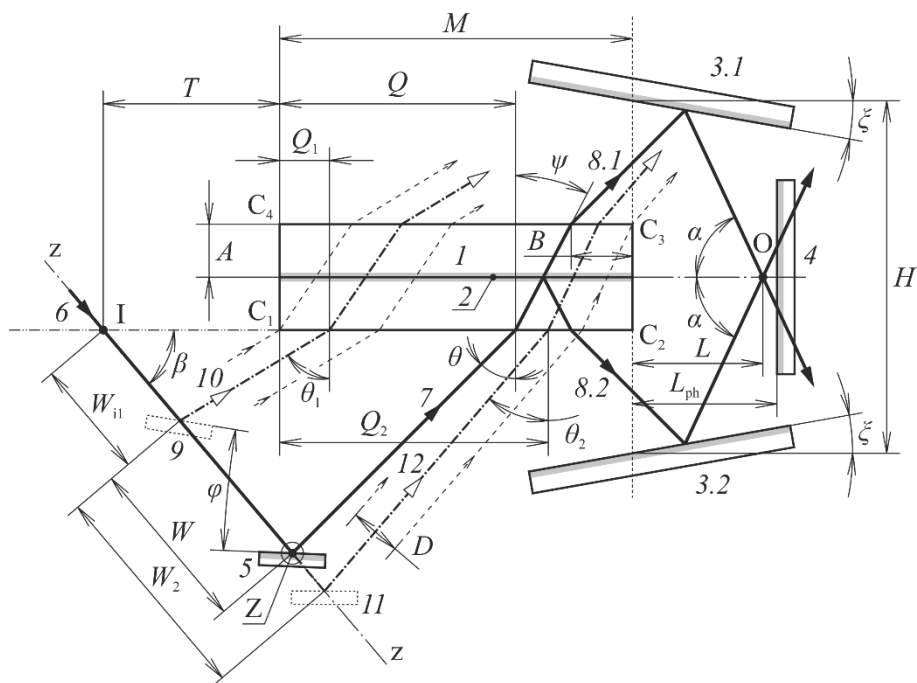


Рис. 1. Оптическая схема интерферометра

Прибор включает в себя оптически связанные светоделительный блок (СДБ) 1 с встроенным в него делительным зеркалом (ДЗ) 2 и два зеркала 3.1 и 3.2, образующие интерферометр, фотоприемник (ФП) 4 и подвижное зеркало (ПЗ) 5, связывающее интерферометр с источником коллимированного светового пучка 6. СДБ состоит из двух идентичных плоскопараллельных кварцевых пластин длиной  $M$  и толщиной  $A = 0,15M^*$ . Зеркала 3.1 и 3.2 устанавливаются неподжно относительно СДБ и симметрично к плоскости ДЗ, являющейся плоскостью симметрии интерферометра, под углом  $\xi$  (на рис. 1  $\xi > 0$ ). Расстояние  $H$

\* Данная толщина близка к нижнему пределу, допускаемому для пластин интерферометров по технологическим нормативам.

между зеркалами отсчитывается в плоскости торца  $C_2C_3$ . На расстоянии  $L_{ph}$  от этого торца размещается ФП, его ориентация соответствует условию записи симметричных пропускающих решеток.

Световые пучки на рис. 1 отображены их осями. Исходный пучок (ИП) 7 диаметром  $D$  образуется из пучка  $b$  при его отражении от ПЗ 5. Текущее положение ИП на входной поверхности определяется расстоянием  $Q$  от края  $C_1$  и углом падения  $\theta$  в плоскости, перпендикулярной краям  $C_1-C_4$ . После входа в СДБ под углом преломления  $\psi$  ИП расщепляется ДЗ на два парциальных пучка (ПП) 8.1 и 8.2. Они выходят из СДБ на расстоянии  $B$  от краев  $C_3$  и  $C_2$  соответственно, направляются друг к другу после отражения от зеркал 3.1 и 3.2 и пересекаются под углом схождения  $2\alpha$  в точке  $O$ , лежащей на плоскости симметрии на расстоянии  $L$  (далее – длина схождения) от торца  $C_2C_3$ . Поскольку ФП неподвижен, центр ИК, совпадающий с точкой  $O$ , должен располагаться в непосредственной близости от ФП:  $L \approx L_{ph}$ . Из соображений общности все линейные размеры:  $A, H, T, L, L_{fix}, L_m, L_{ph}, D, Q, Q_1, Q_2, Q_m, B, W, W_{i1}, W_2, S, R, S, U, V, V_2, G, G_1$  далее даны в относительном представлении при  $M = 1$ :  $a, h, t, l, l_{fix}, l_m, l_{ph}, d, q, q_1, q_2, q_m, b, w, w_{i1}, w_2, r, s, u, v, v_2, g, g_1$  соответственно.

Согласно закону отражения, половинный угол схождения выражается формулой:

$$\alpha = 90^\circ - \theta + 2\xi, \quad (1)$$

указывающей на возможность управлять пространственной частотой, изменением угла падения  $\theta$  на входе в СДБ при неподвижных зеркалах 3.1 и 3.2. Текущие положения световых пучков на входе в СДБ и на выходе из него связаны между собой соотношением:

$$q + b + 2a \operatorname{tg} \psi = 1, \quad (2)$$

где

$$\operatorname{tg} \psi = \sin \theta / \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta} \quad (3)$$

и  $n$  – показатель преломления материала СДБ относительно окружающей его среды (обычно воздуха). Длина схождения, как следует из [9], определяется формулой:

$$l = \left[ h \sin(\theta - \xi) \cos \xi - a \sin \theta - (1 - q - 2a \operatorname{tg} \psi) \cos \theta \right] / \cos(\theta - 2\xi) \quad (4)$$

с учетом (2). Из (4) находится закон движения ИП по входной поверхности  $C_1C_2$ :

$$q = 1 - 2a \operatorname{tg} \psi - \left[ h \sin(\theta - \xi) \cos \xi - a \sin \theta - l_{\text{fix}} \cos(\theta - 2\xi) \right] / \cos \theta, \quad (5)$$

который обуславливает стабилизацию положения ИК по условию:

$$l = l_{\text{fix}} = \text{const}. \quad (6)$$

Формулу (5) можно представить как зависимость  $q(\alpha)$ , используя (1). На рис. 2 показано, что она близка к линейной, причем ее производная

$$q'(\alpha) > 0. \quad (7)$$

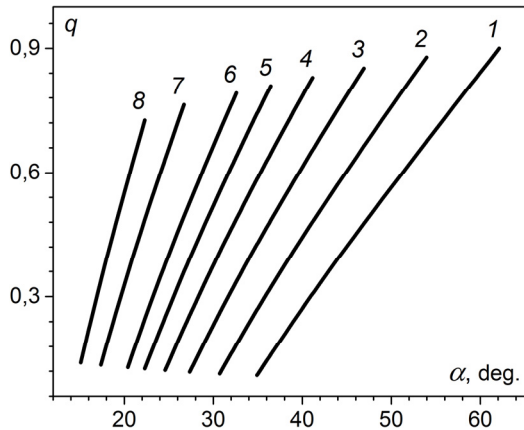


Рис. 2. Зависимость  $q(\alpha)$  для интерферометра с параметрами:  $\xi = -15^\circ$ ;  $h = 1,5$ ;  $n = 1,51$ ;  $l_{\text{fix}} = 0,25; 0,5; 0,75; 1; 1,25; 1,5; 2; 2,5$  — кривые 1–8 соответственно

Крайние точки кривых 1–8 соответствуют нижней ( $\alpha_1$ ) и верхней ( $\alpha_2 > \alpha_1$ ) границам диапазона перестройки половинного угла схождения; ширина диапазона

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1. \quad (8)$$

Этим границам соответствуют нижнее ( $q_1, \theta_1$ ) и верхнее ( $q_2, \theta_2$ ) граничные положения ИП, в пределах которых он может перемещаться. Нижнее граничное положение определяется касанием ИП края  $C_1$ :

$$q_1 = d / (2 \cos \theta_1), \quad (9)$$

а верхнее – одновременным касанием ПП 8.1 и 8.2 краев  $C_3$  и  $C_2$  соответственно:

$$b_2 = d / (2 \cos \theta_2) \quad (10)$$

или с учетом (2):

$$q_2 = 1 - 2a \operatorname{tg} \psi_2 - d / (2 \cos \theta_2). \quad (11)$$

Формула (11) справедлива при условии  $\theta_2 \geq 0$ , которое почти всегда удовлетворяется. Граничные значения угла падения  $\theta_1$  и  $\theta_2$  можно найти, решая уравнения:

$$1 - q_{1,2} - 2a \operatorname{tg} \psi_{1,2} - \left[ h \sin(\theta_{1,2} - \xi) \cos \xi - a \sin \theta_{1,2} - \right. \\ \left. - I_{\text{fix}} \cos(\theta_{1,2} - 2\xi) \right] / \cos \theta_{1,2} = 0, \quad (12)$$

выводящиеся из (5). Выражения (9) и (11) подставляются в качестве  $q_{1,2}$ , а  $\operatorname{tg} \psi_{1,2}$  получается по формуле (3):

$$\operatorname{tg} \psi_{1,2} = \sin \theta_{1,2} / \sqrt{n^2 - \sin^2 \theta_{1,2}}.$$

Из (1) можно получить соотношение

$$\delta \alpha = -\delta \theta, \quad (13)$$

т.е. половинный угол схождения  $\alpha$  растет, когда угол падения  $\theta$  уменьшается. Используя (1) и (8), можно выразить ширину диапазона через граничные значения угла падения:

$$\Delta \alpha = -\Delta \theta = -(\theta_2 - \theta_1). \quad (14)$$

В итоге для поддержания положения ИК по условию (6) при перестройке угла  $\alpha$  от нижнего значения  $\alpha_1$  до верхнего  $\alpha_2$ , вычисляемых по формуле (1), ИП должен перемещаться от нижнего граничного положения  $I\theta$  к верхнему  $I2$  (см. рис. 1); при этом расстояние  $q$  увеличивается согласно (7), а угол падения  $\theta$  уменьшается в соответствии с (13).

## 2. Анализ механизма, приводящего в движение подвижное зеркало

Описанный в предыдущем разделе характер движения ИП можно осуществить, например, с помощью ПЗ, которое совершает два движения: угловое – для изменения угла падения ИП, и линейное – для изме-

нения расстояния  $Q$ . Оба движения должны быть согласованы между собой таким образом, чтобы результирующее движение ИП по входной поверхности соответствовало закону (5).

ПЗ вращается вокруг оси  $Z$ , которая совмещена с его отражающей поверхностью и ориентирована перпендикулярно плоскости падения ИП. Ось  $Z$  перемещается от своего начального положения  $9$  до конечного  $11$ , причем эти положения привязаны к нижнему  $10$  ( $\theta_1, q_1$ ) и верхнему  $12$  ( $\theta_2, q_2$ ) граничным положениям ИП соответственно, их координаты получаются из (12), (9) и (11). Текущее положение  $5$  определяется линейной  $w$  и угловой  $\varphi$  координатами, отсчитываемыми от начального положения  $9$  с координатами  $\varphi_1 = 0$  и  $w_1 = 0$ ; в конечном положении они достигают своих максимальных значений  $\varphi_2$  и  $w_2$ .

Согласно закону отражения, поворот зеркала на некий угол удваивает угол поворота отраженного светового пучка, поэтому с учетом (13)

$$\delta\varphi = \delta\alpha/2 = -\delta\theta/2. \quad (15)$$

Соотношение (15) с привлечением (14) позволяет привязать угловое движение ПЗ к требуемому по условию (6) движению ИП:

$$\varphi = (\theta_1 - \theta)/2, \quad (16)$$

$$\varphi_2 = (\theta_1 - \theta_2)/2 = -\Delta\theta/2 = \Delta\alpha/2. \quad (17)$$

Линейное перемещение ПЗ выполняется вдоль прямой  $z-z$ , которая лежит в плоскости падения ИП и проходит через плоскость входной поверхности  $C_1C_2$  в точке  $I$  на расстоянии  $T$  от края  $C_1$  под углом наклона  $\beta$ . Ось пучка  $b$  совпадает с  $z-z$  и при падении на ПЗ пересекает ось вращения, что позволяет исключить параллакс ИП при перемещении ПЗ. В начальном положении ось  $Z$  находится на расстоянии  $w_{11}$  от точки  $I$ , а ПЗ выставляется так, чтобы отраженный от него пучок совпадал с нижним граничным положением  $10$  ИП. В конечном положении  $11$  отраженный от ПЗ пучок должен совмещаться с верхним граничным положением  $12$ . ИП:ПЗ повернется на угол  $\varphi_2$ , обеспечивая угол падения  $\theta_2$  согласно (17), а ось  $Z$  переместится на расстояние  $w_2$ , выводя отраженный пучок к входной поверхности на расстояние  $Q_2$  от края  $C_1$ .

В промежуточном положении  $5$  пучок  $7$  должен воспроизводить хотя бы приблизительно текущее положение ИП, обусловленное зависимо-





Отражающая поверхность ПЗ, закрепленного на рычаге неподвижно, совмещается с осью вращения. Другой край рычага контактирует без зазора в точке  $K_0$  с прямолинейной направляющей 15 на пересечении ее прямой  $z-z$ . Ось вращения закреплена на платформе 14, перемещающейся поступательно вдоль  $z-z$ . Пучок 6, совпадающий с данной прямой, направляется перпендикулярно биссектрисе угла между граничными положениями 10 и 12 ИП, поэтому она отклонена от нормали к входной поверхности на угол

$$\theta_0 = (\theta_1 + \theta_2)/2; \quad (18)$$

в итоге

$$\beta = \theta_0.$$

При перемещении платформы 14 на расстояние  $w$  рычаг занимает свое текущее положение 16, благодаря чему ПЗ и ось вращения, обозначенная как  $Z$ , оказываются в положении 5. Вместе с этим опорный край рычага, скользя вдоль направляющей, соприкасается с ней в точке  $K$ . Направляющая наклонена к  $z-z$  под углом  $\eta$ , что приводит к совместному повороту рычага и ПЗ вокруг оси  $Z$  на угол  $\varphi$ . Из треугольника  $ZK_0K$ , выделенному на рис. 3, следует кинематическое правило для ПЗ:

$$w = r [1 - \sin(\eta - \varphi) / \sin \eta], \quad (19)$$

где  $r$  – длина плеча рычага ( $ZK_0 \equiv ZK$ ). ПЗ достигает своего конечного положения 11, если платформа 14 перемещается на расстояние

$$w_2 = r \left[ 1 - \frac{\sin(\eta - \Delta\alpha/2)}{\sin \eta} \right], \quad (20)$$

получаемое из (17) и (19). Оно ограничивает дистанцию, в пределах которой может перемещаться ПЗ. Формула (20) в обобщенном виде

$$\frac{\sin(\eta - \Delta\alpha/2)}{\sin \eta} = 1 - \frac{1}{\rho} \quad (21)$$

показывает взаимосвязь угла  $\eta$  и масштабного коэффициента механизма

$$\rho = r/w_2, \quad (22)$$

которые можно варьировать. Дифференцируя (21), можно удостовериться, что параметры  $\eta$  и  $\rho$  изменяются однонаправленно. Если задан масштабный коэффициент  $\rho$ , то угол наклона направляющей

$$\eta = \operatorname{arctg} \frac{\sin(\Delta\alpha/2)}{\cos(\Delta\alpha/2) + 1/\rho - 1}.$$

В отличие от  $\eta$  и  $\rho$  дистанция  $w_2$  однозначно задается набором конфигурационных параметров интерферометра  $\xi$ ,  $h$ ,  $l_{\text{fix}}, t$  и поэтому является базовым параметром для привода ПЗ.

Расстояние  $w_{i1}$ , которое определяет начальное положение ПЗ, можно найти из треугольника, ограниченного плоскостью входной поверхности, прямой  $z-z$  и осью ИП в нижнем граничном положении; с учетом (14) и (18):

$$w_{i1} = [(t + q_1) \cos \theta_1] / \cos(\Delta\alpha/2). \quad (23)$$

Расстояние  $w_2$  находится из аналогичного треугольника, замыкаемого осью ИП в верхнем граничном положении:

$$w_2 = [(t + q_2) \cos \theta_2 - (t + q_1) \cos \theta_1] / \cos(\Delta\alpha/2), \quad (24)$$

при использовании (14), (18) и (23). Текущее значение координаты  $w$  выражается формулой, скомбинированной из (16), (19) и (22):

$$w = \rho w_2 \left\{ 1 - \frac{\sin[\eta - (\theta_1 - \theta)/2]}{\sin \eta} \right\}. \quad (25)$$

Световой пучок 7, отраженный от ПЗ в промежуточном положении 5, не совпадает с соответствующим ИП, обусловленным законом (5), в силу нелинейности как самого закона, так и правила (19) движения ПЗ. Поэтому пучок 7 выводится на входную поверхность под углом падения  $\theta$  на расстоянии  $q_m$ , которое отличается от значения  $q$ , обусловленного условием (6);  $q_m$  находится по аналогии с (24) из треугольника, ограниченного плоскостью входной поверхности, прямой  $z-z$  и осью пучка 7:

$$q_m = \frac{(w + w_{i1}) \cos(\theta - \theta_0)}{\cos \theta} - t. \quad (26)$$

В (26) расстояние  $w$  определяется по формуле (25), а расстояния  $w_{11}$  и  $w_2$  – по (23) и (24) соответственно. Новое положение ИК вычисляется по формуле (4) при подстановке  $q = q_m$ , используя (26):

$$l = [h \sin(\theta - \xi) \cos \xi - a \sin \theta - (1 - q_m - 2a \operatorname{tg} \psi) \cos \theta] / \cos(\theta - 2\xi). \quad (27)$$

В результате  $l$  из (27) отличается от заданного значения  $l_{\text{fix}}$  на величину смещения

$$\delta l = l - l_{\text{fix}}. \quad (28)$$

Качество интерференции – уровень контраста и степень однородности его распределения вдоль вектора ИК – определяется тем, насколько точно ее центр (точка О) совмещается с ФП. Если принять, что  $l_{\text{ph}} = l_{\text{fix}}$ , то в качестве критерия неточности такого совмещения может служить коэффициент смещения:

$$k_s = (2\delta l \sin \alpha) / d, \quad (29)$$

введенный ранее в наших работах (см., например, [7]). Он определяет величину смещения  $\delta l$  из (28) в долях половинной длины  $s$  диагонали ИК, лежащей в плоскости симметрии:

$$s = d / \sin \alpha.$$

Условие высокого качества интерференции:

$$|k_s| \ll 1.$$

Зависимость  $k_s(\alpha)$  представляет собой некую кривую с минимальным  $k_{s \text{ min}}$  и максимальным  $k_{s \text{ max}}$  значениями. Можно оптимизировать положение ФП, установив ФП на расстоянии  $l_{\text{opt}} \neq l_{\text{fix}}$ . Новое значение коэффициента смещения

$$k_{s \text{ opt}} = [2(l - l_{\text{opt}}) \sin \alpha] / d \quad (30)$$

находится численно по условию

$$k_{s \text{ opt}}^{\min} + k_{s \text{ opt}}^{\max} = 0.$$

Такая операция позволяет существенно уменьшить искомый коэффициент по абсолютной величине. Оптимизация упрощается, если

учесть, что новые положения минимума и максимума на оси  $\alpha$  мало отличаются от таковых для  $k_{s \min}$  и  $k_{s \max}$  в зависимости (29).

### 3. Анализ виньетирования световых пучков в интерферометре

В исследуемом интерферометре возможно ограничение диапазона перестройки пространственной частоты вследствие виньетирования световых пучков одним из зеркал и/или самим СДБ. На рис. 4 показана оптическая схема конфигурации интерферометра, в которой оба вида виньетирования ярко выражены вследствие небольших по сравнению с длиной СДБ значений параметров  $h$  и  $l_{\text{fix}}$ .

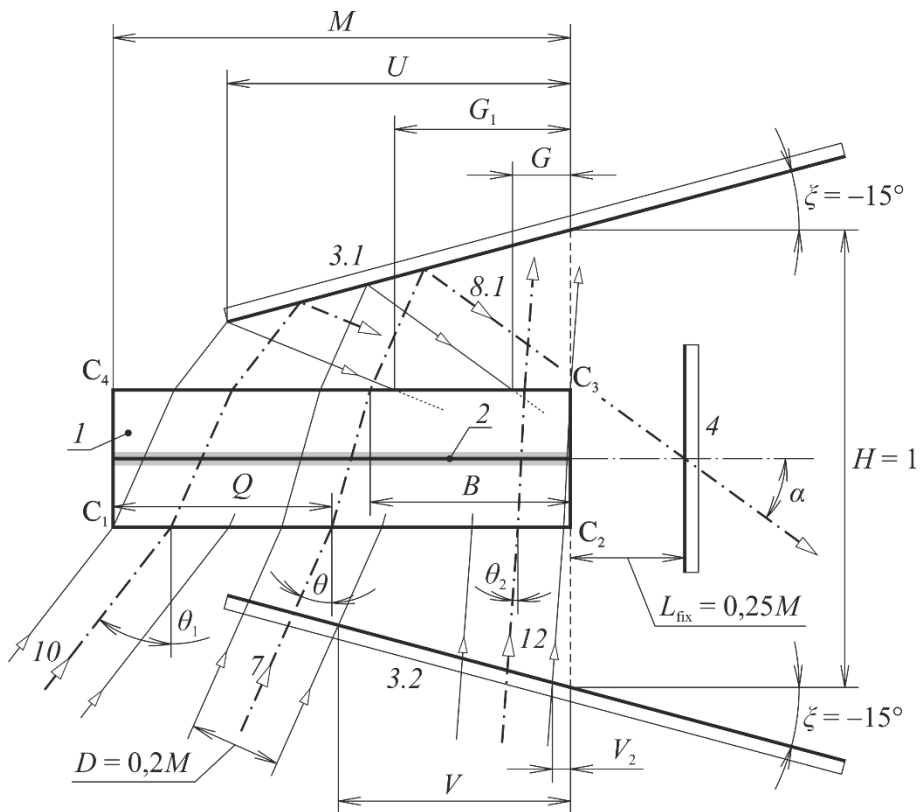


Рис. 4. Виньетирование световых пучков в интерферометре (сохранены обозначения и местоположение элементов, принятые на рис. 1)

Зеркала 3.1 и 3.2 должны располагаться так, чтобы в нижнем граничном положении 10 крайние лучи ПП, образованные от крайнего лу-

ча ИП, касающегося края  $C_1$ , попадали на эти зеркала. Поэтому зеркала надвигаются навстречу ходу световых пучков на расстояние  $u$  от торца  $C_2C_3$  и как-бы «зависают» над СДБ:

$$u = \frac{[(1 - 2a \operatorname{tg} \psi_1) \cos \theta_1 - (h/2 - a) \sin \theta_1] \cos \xi}{\cos(\theta_1 - \xi)}. \quad (31)$$

В результате зеркало 3.2 может перекрывать ИП частично или полностью. В текущем положении 7 оно оценивается по соотношению расстояния  $v$  от точки пересечения плоскости-зеркала 3.2 крайним лучом ИП, ближним к ФП, до плоскости торца  $C_2C_3$ :

$$v = \frac{[(h - 2a) \sin \theta + 2(1 - q) \cos \theta - d] \cos \xi}{2 \cos(\theta + \xi)} \quad (32)$$

с расстоянием  $u$  из (31). Виньетирование зеркалом отсутствует, если выполняется условие

$$v \geq u. \quad (33)$$

Аналогичное расстояние  $v_2$  для верхнего граничного положения 12 определяется из (32) при подстановке  $q = q_2$ , используя (11):

$$v_2 = \frac{[(h/2 - a) \sin \theta_2 + 2a \cos \theta_2 \operatorname{tg} \psi_2] \cos \xi}{\cos(\theta_2 + \xi)}.$$

Если в интерферометре с заданными параметрами  $\xi$ ,  $h$  и  $l_{\text{fix}}$  удовлетворяется условие

$$v_2 \geq u, \quad (34)$$

то виньетирование зеркалом отсутствует во всем диапазоне перестройки угла схождения. Для конфигурации интерферометра, показанной на рис. 4, условия (33) и (34) не выполняются – ИП в положениях 7 и 12 полностью перекрывается зеркалом 3.2.

При другом виде виньетирования оба ИП после отражения от зеркал 3.1 и 3.2 частично или полностью перекрываются рабочими поверхностями СДБ. Степень такого виньетирования для положения 7 оценивается расстоянием  $g$  от точки пересечения крайними лучами ИП со стороны торца  $C_1C_4$  рабочих поверхностей СДБ до плоскости торца  $C_2C_3$ :

$$g = \frac{b \cos \theta + d/2 - (h - 2a) \sin(\theta - \xi) \cos \xi}{\cos(\theta - 2\xi)}. \quad (35)$$

Из (35) можно извлечь условие, при выполнении которого ПП минуют СДБ:

$$g \leq 0. \quad (36)$$

Аналогичное расстояние  $g_1$  для нижнего граничного положения выражается формулой, выводимой из (35) с использованием (2) и (9):

$$g_1 = \frac{(1 - 2a \operatorname{tg} \psi_1) \cos \theta_1 - (h - 2a) \sin(\theta_1 - \xi) \cos \xi}{\cos(\theta_1 - 2\xi)}.$$

Виньетирование рабочими поверхностями СДБ отсутствует во всем диапазоне перестройки угла схождения при выполнении условия:

$$g_1 \leq 0. \quad (37)$$

На рис. 4 оба эти условия (36) и (37) не удовлетворяются.

#### 4. Результаты вычислений

На основе предыдущего анализа был произведен численный расчет перестроечных характеристик исследуемого интерферометра на основе СДБ из кварцевого стекла марки КУ-1 (показатель преломления  $n = 1,51$  при  $\lambda = 244$  нм) неподвижными зеркалами, наклоненными под углом  $\xi = -15^\circ$ . Исследования велись на области, ограниченной значениями конфигурационных параметров  $h = 1 \dots 2,5$  и  $l_{\text{fix}} = 0,25 \dots 2,5$ ; конкретно вычислялись величины  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\Delta\alpha(l_{\text{fix}})$  в массиве пар  $h$ ,  $l_{\text{fix}}$  с шагом сетки 0,25. Были также найдены промежуточные значения  $l_{\text{fix}}$  по условиям (33), (34), (36) и (37) ограничений диапазона перестройки угла  $\alpha$ , создаваемых виньетированием обоих видов.

На рис. 5 показано разграничение исследованного множества параметров  $(h, l_{\text{fix}})$  на три подобласти виньетирования. Ниже кривой  $I$  располагается подобласть  $I$ , в которой не удовлетворяются условия отсутствия виньетирования (33) и (36):  $v < u$  и  $g > 0$  – световые пучки перекрываются частично или полностью во всем диапазоне перестройки, определяемом законом движения (5). Сама кривая  $I$  отображает множество положений ИП, в которых одновременно выполняются в пределе названные условия:  $v = u$  и  $g = 0$ . Это означает, что для любой пары

параметров  $h$ ,  $l_{\text{fix}}$ , принадлежащей данной кривой, такое положение ИП является единственным, в котором световые пучки проходят через интерферометр без перекрытия: ИП касается края зеркала 3.2, а ПП, образованные от данного ИП, касаются краев  $C_3$  и  $C_2$  СДБ. На кривой  $I$   $\alpha_{1\text{раб}} = \alpha_{2\text{раб}}$  и фактическая ширина диапазона перестройки бесконечно мала:  $\Delta\alpha_{\text{раб}} = 0$ .

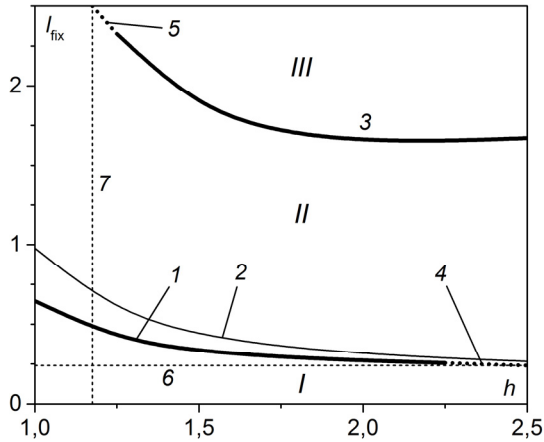


Рис. 5. Три подобласти виньетирования  $I$ ,  $II$  и  $III$ : кривые  $1$  и  $3$  – их границы; прямые  $6$  – метка уровня  $l_{\text{fix}} \approx 0,24$  и  $7$  – метка уровня  $h \approx 1,175$

Обратно, в подобласти  $III$  удовлетворяются оба условия отсутствия виньетирования (34) и (37):  $v_2 > u$  и  $g_1 < 0$ . На ее краю (кривая 3) указанные условия удовлетворяются в их пределе:  $v_2 = u$  и  $g_1 = 0$  – ИП в верхнем граничном положении касается края зеркала 3.2, и ПП в нижнем граничном положении касаются краев  $C_2$  и  $C_3$ . Поэтому в подобласти  $III$  и на кривой 3 диапазон перестройки  $\Delta\alpha$ , обусловленный законом (5), реализуется полностью.

Подобласть  $II$  является промежуточной – в ней диапазон перестройки сужается относительно расчетного либо со сторон верхнего и нижнего значений, либо только со стороны верхнего. В части этой подобласти, лежащей выше кривой 2, на которой выполняется в пределе условие (37)  $g_1 = 0$ , нижнее граничное положение свободно от виньетирования рабочими поверхностями СДБ.

Кривые 4 и 5 показывают экстраполяцию кривых 1 и 3 к краям исследованной области, а прямые 6 и 7 отмечают уровни параметров  $l_{\text{fix}}$  и  $h$ , на которые выходят кривые 4 и 5 соответственно. Продолжая

кривую 5 до оси ординат, можно установить, что при  $h = 1$  виньетирование обоих видов будет исключено, если  $l_{\text{fix}} \geq 2,9$ .

На рис. 6 представлены зависимости  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\Delta\alpha(l_{\text{fix}})$  для трех значений расстояния между зеркалами. Штриховыми и точечной линиями обозначены названные перестроечные параметры, обусловленные законом (5), т.е. без учета виньетирования, жирными – те же параметры, когда виньетирование учтено. Тонкие линии, находящиеся левее прямой 10, отображают границы секторов диапазона перестройки угла  $\alpha$  в подобласти I (см. рис. 5). На этих границах начинается перекрывание пучков зеркалом (кривая 8, см. рис. 6) и рабочими поверхностями СДБ (кривая 7). Данные секторы накладываются друг на друга – между 7 и 8 присутствуют оба вида виньетирования. Как отмечалось выше, в подобласти I прохождение через интерферометр световых пучков без перекрытия невозможно. Кривая 9 показывает угловое расстояние между границами упомянутых секторов.

На рис. 6, а ( $h = 1$ ) продемонстрировано, насколько сильны ограничения из-за виньетирования в случае наименьших в исследованной области значений  $h$  и  $l_{\text{fix}}$ . Если мысленно перемещаться по диаграмме вдоль оси абсцисс в сторону увеличения параметра  $l_{\text{fix}}$ , то выход из подобласти I отмечается прямой 10 ( $l_{\text{fix}} = 0,646$ ), на которой кривые 4 и 5 пересекаются ( $\alpha_{1\text{раб}} = \alpha_{2\text{раб}} = 21,75^\circ$ ). По достижении прямой 11 ( $l_{\text{fix}} = 0,978$ ) виньетирование рабочими поверхностями СДБ исчезает ( $\alpha_{1\text{раб}} = 14,51^\circ$ ), и далее кривая 4 совпадает с кривой 1 – нижнее граничное положение ИП становится доступным. Выход в подобласть III не реализуется до края области на уровне  $l_{\text{fix}} = 2,5$ . В результате рабочая ширина диапазона  $\Delta\alpha_{\text{раб}}$  изменяется в интервале от  $4,62$  до  $3,85^\circ$ , что в 1,7 раз и более меньше ширины без учета виньетирования (от  $33,67$  до  $6,33^\circ$  при изменении  $l_{\text{fix}}$  от  $0,25$  до  $2,5$ ).

На рис. 6, б ( $h = 1,5$ ) перестроечные характеристики пребывают во всех трех подобластях виньетирования: прямая 10 ( $l_{\text{fix}} = 0,330$ ) отмечает выход из подобласти I ( $\alpha_{1\text{раб}} = \alpha_{2\text{раб}} = 40,405^\circ$ ), прямая 11 ( $l_{\text{fix}} = 0,432$ ) – освобождение от виньетирования рабочими поверхностями СДБ ( $\alpha_{1\text{раб}} = 31,77^\circ$ ) и прямая 12 ( $l_{\text{fix}} = 1,855$ ) – выход в подобласть III на неограниченный виньетированием диапазон перестройки ( $\alpha_{1\text{раб}} = 18,16^\circ$ ,  $\alpha_{2\text{раб}} = 28,23^\circ$ ,  $\Delta\alpha_{\text{раб}} = \Delta\alpha = 10,08^\circ$ ).



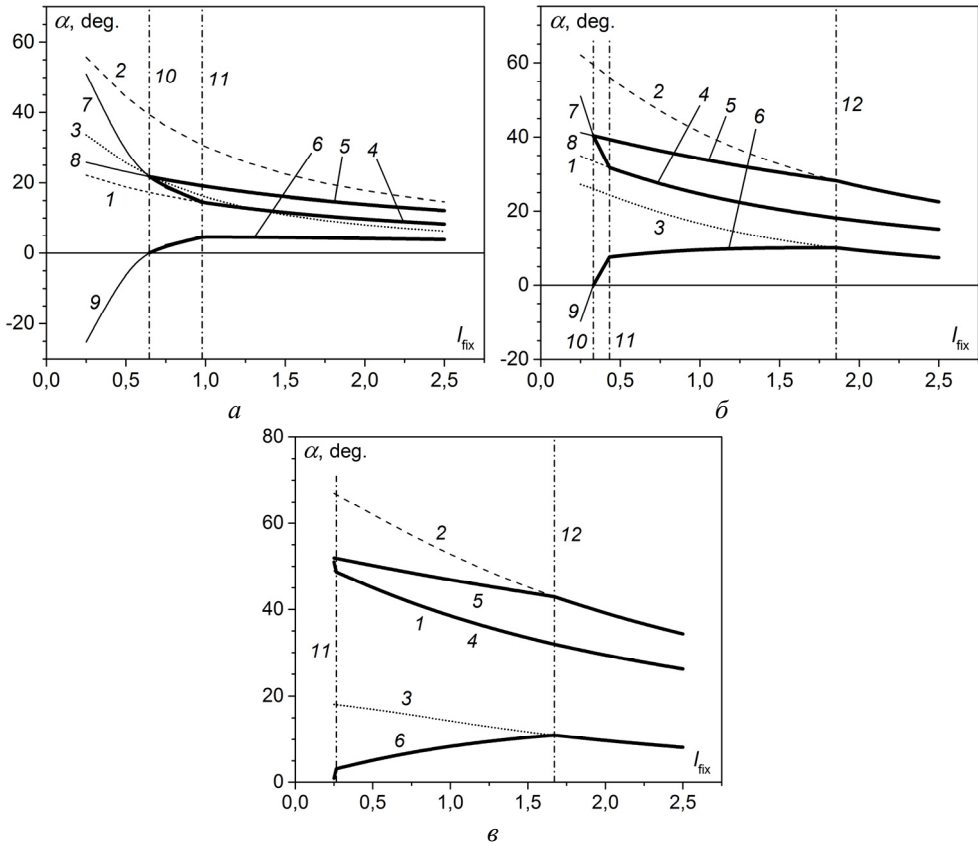


Рис. 6. Перестроечные характеристики интерферометра для трех значений  $h$ : 1 (а), 1,5 (б) и 2,5 (в); на всех диаграммах кривые 1, 2, 3 –  $\alpha_1, \alpha_2, \Delta\alpha$ , полученные из (5); 4, 5, 6 –  $\alpha_{1\text{раб}}, \alpha_{2\text{раб}}, \Delta\alpha_{\text{раб}}$  и 7, 8, 9 –  $\alpha_{1\text{вин}}, \alpha_{2\text{вин}}, \Delta\alpha_{\text{вин}}$ , рассчитанные с учетом виньетирования; 10 – граница между подобластями I и II; 11 – граница по условию  $g_1 = 0$ ; 12 – граница между подобластями II и III

И, наконец, при  $h = 2,5$  (рис. 6, в) подобласть I отсутствует. Кривая 4 совпадает с зависимостью  $\alpha_1(l_{\text{fix}})$ , обусловленной законом (5), (кривая 1) практически во всем интервале значений  $l_{\text{fix}}$ , кроме короткого отрезка кривой 1 левее прямой 11 ( $l_{\text{fix}} = 0,265$ ), который мало заметен на диаграмме из-за большой толщины кривой 4. На уровне прямой 12 ( $l_{\text{fix}} = 1,671$ ) наблюдается освобождение от виньетирования зеркалом с восстановлением неограниченного диапазона ( $\alpha_{1\text{раб}} = 31,92^\circ, \alpha_{2\text{раб}} = 42,93^\circ, \Delta\alpha_{\text{раб}} = \Delta\alpha = 11,01^\circ$ ).

Степень стабилизации положения интерференционной картины, оцениваемая коэффициентом смещения  $k_s$  согласно (30), при управлении движением ИП с помощью ПЗ рассчитывалась в упомянутой выше

области параметров  $h$ ,  $l_{\text{fix}}$  для  $t = 0,5$ ; 1 и 1,5 (см. рис. 1, 3). Если ФП помещается на расстоянии  $l_{\text{ph}} = l_{\text{fix}}$  от СДБ, то экстремальное значение  $|k_s| \leq 0,09$  по всему исследованному множеству данных параметров. Коррекция положения ФП по описанной выше методике (см. (30)) с целью минимизации смещения ИК уменьшает приблизительно вдвое оптимизированное значение  $k_s$  по абсолютной величине. Коэффициент смещения имеет тенденцию увеличения с ростом  $t$ , но эта зависимость слабая, что позволяет устанавливать данное расстояние из конструктивных соображений.

### Заключение

Выполнено аналитическое исследование перестройки пространственной частоты голографической решетки, записываемой в интерферометре на основе симметричного кварцевого светоделительного блока с неподвижными зеркалами, оптически связанного с фотоприемником, неподвижным относительно интерферометра. Коллимированный световой пучок вводится в интерферометр через подвижное зеркало, которое совершает одновременно линейное и угловое перемещения с помощью рычажного механизма. Оба движения согласованы между собой таким образом, что положение интерференционной картины стабилизируется вблизи фотоприемника.

Вычислены перестроечные характеристики (см. рис. 6) интерферометра с зеркалами, наклоненными под углом  $\xi = -15^\circ$  к плоскости делительного зеркала, в широкой области значений двух конфигурационных параметров: расстояния между зеркалами  $h$  и фиксированной длины схождения  $l_{\text{fix}}$ . Было учтено возможное виньетирование световых пучков одним из зеркал интерферометра и/или самим светоделительным блоком (см. рис. 4); выявлены области полного или частичного перекрывания световых пучков, а также область параметров, свободная от виньетирования (см. рис. 5). Рассчитаны коэффициенты смещения центра интерференционной картины от фотоприемника и показано, что во всей исследованной области удовлетворяется критерий малости этого смещения:  $k_s \leq 0,1$ . Данный критерий используется в ряде наших работ как условие обеспечения высокого контраста интерференционной картины на большей части ее ширины. Так, значению  $k_s = 0,1$  соответствует видность  $V \approx 0,9$  (контраст  $K \approx 19$ ).

Полученные результаты имеют, на наш взгляд, важное практическое значение, поскольку указывают на возможность использования исследованного интерферометра, отличающегося простотой конструкции и высокой технологичностью, для записи волоконных брэгговских решеток с варьируемым периодом. В качестве примера ниже приведены перестроечные характеристики трех пар конфигурационных параметров, которые могут быть использованы для известных волоконных лазерных систем:

$h; l_{\text{fix}}$	1,0; 2,0	1,25; 2,5	1,75; 2,5
$\alpha_1 - \alpha_2$ , град.	9,70–13,85	11,83–18,78	18,17–25,93
$\lambda_{B1} - \lambda_{B2}$ , мкм	2,19–1,54	1,80–1,14	1,18–0,84
ВЛС	Ho <sup>3+</sup> , Tm <sup>3+</sup> , Er <sup>3+</sup>	Er <sup>3+</sup> , ВКР	Yb <sup>3+</sup> , Nd <sup>3+</sup>
$\lambda_{\text{ВЛС}}$ , мкм	2,27–1,53	1,8–1,1	1,09–0,92

Авторы выражают благодарность Е.Ф. Пену за плодотворные обсуждения.

Работа выполнена в рамках Проекта «П.10.2.1. Фотоника микро- и наноструктурированных сред», № гос. рег. АААА-А17-117060810014-9.

### Список литературы

1. Динамика импульсной записи голографических дифракционных решеток в фотополимерном материале / В.В. Шелковников, Е.В. Васильев, Т.Н. Герасимова, Е.Ф. Пен, А.И. Плеханов // Опт. и спектр. – 2005. – Т. 99, № 5. – С. 838–847.
2. Голографические нанокompозиты для записи периодических структур полимер-наночастицы. I: Общий подход к выбору компонент нанокompозитов и их голографические свойства / Т.Н. Смирнова, Л.М. Кохтич, О.В. Сахно, И. Штумпе // Опт. и спектр. – 2011. – Т. 110, № 1. – С. 135–142.
3. Голографические нанокompозиты для записи периодических структур полимер-наночастицы. II: Механизм образования объемной периодической структуры полимер-НЧ и влияние параметров формирующего поля на эффективность структуры / Т.Н. Смирнова, Л.М. Кохтич, О.В. Сахно, И. Штумпе // Опт. и спектр. – 2011. – Т. 110, № 1. – С. 143–150.
4. Olivares-Pérez A., Toxqui-López S., Padilla-Velasco A.L. Nopalcactus (*Opuntia Ficus-Indica*) as a holographic material // Materials. – 2012. – Vol. 5. – P. 2383–2402.

5. Zhizhchenko A.Yu., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N. Recording and thermo developing of latent phase holograms in the photosensitive polymer material based on anthracylacetoneboron difluoride // *Opt. Mater.* – 2015. – Vol. 46. – P. 265–269.

6. Flexible femtosecond FBG phase phase-mask writing technique of for distribute distributed sensing robust / J. Habel, T. Boilard, Y. Messadeq, F. Trépanier, M. Bernier // *Advanced Photonics Congress (BGPP, IPR, NP, Networks, NOMA, Sensors, SOF, SPPCom)*. – OSA. – 2010. – BM3A.4.

7. Микерин С.Л., Угожаев В.Д. Двухлучевой интерферометр с неподвижным фотоприемником, перестраиваемый с помощью подвижного зеркала // *Прикладная фотоника*. – 2018. – Т. 5, № 3. – С. 218–237.

8. Микерин С.Л., Угожаев В.Д. Интерферометрическая система для записи двумерных фотонных кристаллов с независимо варьируемыми периодами // *СибОптика-2018: материалы междунар. науч. конф.: в 2 т.* – Новосибирск: Изд-во СГУГиТ, 2018. – Т. 1. – С. 101–107.

9. Угожаев В.Д. Перестраиваемый вращением двухлучевой интерферометр с неподвижным светочувствительным элементом. Ч. II: Интерферометр на основе светоделительного блока // *Автометрия*. – 2018. – Т. 54, № 4. – С. 67–77.

### References

1. Shelkovnikov V.V., Vasil'ev E.V., Gerasimova T.N., Pen E.F., Plekhanov A.I. Dinamika impul'snoi zapisi golograficheskikh difraktsionnykh reshetok v fotopolimernom materiale [Dynamics of pulsed recording of holographic diffraction gratings in a photopolymer material]. *Optika i spektroskopiia*, 2005, vol. 99, no. 5, pp. 838-847.

2. Smirnova T.N., Kokhtich L.M., Sakhno O.V., Shtumpe I. Golograficheskie nanokompozity dlia zapisi periodicheskikh struktur polimer-nanochastitsy. I. Obshchii podkhod k vyboru komponent nanokompozitov i ikh golograficheskie svoistva [Holographic nanocomposites for recording periodic polymer-nanoparticle structures. I. General approach to the selection of components of nano-composites and their holographic properties]. *Optika i spektroskopiia*, 2011, vol. 110, no. 1, pp. 135-142.

3. Smirnova T.N., Kokhtich L.M., Sakhno O.V., Shtumpe I. Golograficheskie nanokompozity dlia zapisi periodicheskikh struktur polimer-nanochastitsy. II. Mekhanizm obrazovaniia ob"emnoi

periodicheskoi struktury polimer-NCh i vliianie parametrov formiruiushchego polia na effektivnost' struktury [Holographic nanocomposites for recording periodic polymer-nanoparticle structures. II. The mechanism of the formation of a bulk periodic structure polymer-NP and the effect of the parameters of the forming field on the efficiency of the structure]. *Optika i spektroskopiia*, 2011, vol. 110, no. 1, pp. 143-150.

4. Olivares-Pérez A., Toxqui-López S., Padilla-Velasco A.L. Nopalcactus (*Opuntia Ficus-Indica*) as a holographic material. *Materials*, 2012, vol. 5, pp. 2383-2402.

5. Zhizhchenko A.Yu., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N. Recording and thermo developing of latent phase holograms in the photosensitive polymer material based on anthracylacetoneboron difluoride. *Opt. Mater.*, 2015, vol. 46, pp. 265-269.

6. Habel J., Boilard T., Messadeq Y., Trépanier F., Bernier M. Flexible femtosecond FBG phase mask writing technique for distributed sensing robust. *Advanced Photonics Congress (BGPP, IPR, NP, Networks, NOMA, Sensors, SOF, SPPCom)*. OSA, 2010, BM3A.4.

7. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. Dvukhluchevoi interferometr s nepodvizhnym fotopriemnikom, prestraivayemyi s pomoshch'iu podvizhnogo zerkala [Two-beam interferometer with a fixed photodetector, tunable with a movable mirror]. *Prikladnaya fotonika*, 2018, vol. 5, no. 3, pp. 218-237.

8. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. Interferometricheskaya sistema dlia zapisi dvumernykh fotonnykh kristallov s nezavisimo var'iruemyimi periodami [Interferometric system for recording two-dimensional photonic crystals with independently variable periods]. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiia "SibOptika-2018". Sbornik trudov*. Novosibirsk: Sibirskii gosudarstvennyi universitet geosistem i tekhnologii, 2018, vol. 1, pp. 101-107.

9. Ugozhaev V.D. Prestraivayemyi vrashcheniem dvukhluchevoi interferometr s nepodvizhnym svetochuvstvitel'nym elementom. Chast' II: Interferometr na osnove svetodelitel'nogo bloka [Rotationally tunable two-beam interferometer with a fixed photosensitive element. Part II: Interferometer based on a beam splitting unit]. *Avtometriia*, 2018, vol. 54, no. 4, pp. 67-77.