

Оптический журнал

Лазерные технологии
Laser technologies

DOI: 10.17586/1023-5086-2023-90-04-92-104

УДК 681.7.068

Анализ оптической схемы перестраиваемого интерферометра с точной фиксацией интерференционной решётки на неподвижном фоточувствительном образце

СЕРГЕЙ ЛЬВОВИЧ МИКЕРИН¹, ВЛАДИМИР ДМИТРИЕВИЧ УГОЖАЕВ^{2✉}

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск, Россия

¹mikerin@iae.nsk.su <https://orcid.org/0000-0001-5049-8570>

²vdu@iae.nsk.su <https://orcid.org/0000-0003-3193-8037>

Аннотация

Предмет исследования. Аналитически исследована голограммическая система на основе светоизлучающего кубика с перестраиваемым углом схождения двух интерферирующих световых пучков, предназначенная для записи дифракционных решёток. Исходный световой пучок вводится в кубик посредством подвижного зеркала, которое совершает совместно линейное и угловое перемещения, благодаря чему осуществляется перестройка угла схождения. Для комбинированного перемещения подвижного зеркала используется рычажный механизм, опирающийся на наклонную направляющую. **Цель работы.** Нахождение такого способа согласования обоих перемещений подвижного зеркала, при котором интерференционная решётка, создаваемая в плоскости полного взаимного перекрытия сходящихся пучков, оказывалась бы неподвижной при перестройке угла схождения. **Метод.** Анализ хода световых пучков в системе проводился в рамках геометрической оптики. **Основные результаты.** Было найдено, что для фиксации пространственного положения интерференционной решётки контактный профиль направляющей должен быть криволинейным. Выведена точная функциональная зависимость огибающей этого профиля, рассчитаны перестроочные характеристики в зависимости от положения фоточувствительного образца относительно светоизлучающего кубика. **Практическая значимость.** Такое исполнение исследованной голограммической системы открывает возможность использовать световые пучки любого диаметра без коррекции системы.

Ключевые слова: двухлучевой интерферометр, светоизлучающий кубик, неподвижные зеркала, неподвижный фоточувствительный образец, интерференционная решётка, перестройка периода, интерференционная литография

Благодарность: работа выполнена за счёт субсидии на финансовое обеспечение выполнения государственного задания ИАиЭ СО РАН (проект № 121031700030-4).

Ссылка для цитирования: Микерин С.Л., Угожаев В.Д. Анализ оптической схемы перестраиваемого интерферометра с точной фиксацией интерференционной решётки на неподвижном фоточувствительном образце // Оптический журнал. 2023. Т. 90. № 4. С. 92–104. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-04-92-104>

Коды OCIS: 080.0080, 080.2740, 080.4035, 120.3180, 120.4570, 120.4640, 220.2740.

Analysis of the optical scheme of a tunable interferometer with exact fixation of the interference grating on a stationary photosensitive sample

SERGEY MIKERIN¹, VLADIMIR UGOZHAEV^{2✉}

Institute of Automation and Electrometry, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russia

¹mikerin@iae.nsk.su <https://orcid.org/0000-0001-5049-8570>

²vdu@iae.nsk.su <https://orcid.org/0000-0003-3193-8037>

Abstract

Subject of study. A holographic system with a tunable convergence angle of two interfering light beams, based on a beam-splitting cube and designed for writing diffraction gratings, is investigated analytically. The initial light beam is introduced into the cube by means of a movable mirror, which performed both linear and angular displacement, due to which the convergence angle is tuned. For the combined movement of the movable mirror, a lever mechanism is used, based on an inclined guide. **Aim of study.** The aim of study is to find such a way of matching of both displacements of the movable mirror, in which the interference grating, created in the plane of complete mutual overlap of converging beams, would turn out to be immobile when the convergence angle is tuned. **Method.** The analysis of the path of light beams in the system was carried out within the framework of geometric optics. **Main results.** It was found that to fix the spatial position of the interference grating, the contact profile of the guide must be curvilinear. The exact functional dependence of the envelope of this profile is derived, and the tuning characteristics are calculated depending on the position of the photosensitive sample relative to the beam-splitting cube. **Practical significance.** Such a design of the studied holographic system opens up the possibility of using light beams of any diameter without system correction.

Keywords: two-beam interferometer, beam-splitting cube, fixed mirrors, fixed photosensitive sample, interference grating, period tuning, interference lithography

Acknowledgment: the work was carried out at the expense of a subsidy for financial support for the implementation of the state task of the Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Project No. 121031700030-4).

For citation: Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. Analysis of the optical scheme of a tunable interferometer with exact fixation of the interference grating on a stationary photosensitive sample [in Russian] // Opticheskii Zhurnal. 2023. V. 90. № 4. P. 92–104. <http://doi.org/10.17586/1023-5086-2023-90-04-92-104>

OCIS codes: 080.0080, 080.2740, 080.4035, 120.3180, 120.4570, 120.4640, 220.2740.

1. ВВЕДЕНИЕ

Двухлучевые интерферометры со сходящимися под углом 2α интерферирующими (далее парциальными) световыми пучками, предназначенные для записи периодических решёток в фоточувствительных материалах, широко востребованы в различных областях голограммии и фотоники. Очень широко исследуются свойства различных фотополимерных материалов и записываемых в них голограмм. Например, идёт разработка подходящих носителей записи, обладающих высокой модуляцией показателя преломления, высокой светочувствительностью и устойчивостью к окружающей среде [1–4], поиск полимерных

композиций [5] для таких приложений, как голограммические оптические элементы, хранение голограммических данных, голограммические защитные технологии и др. Уникальными свойствами обладают фотополимеры, импрегнированные различными наночастицами (нанополимеры) [6, 7]. В частности, периодические структуры в них могут использоваться для создания управляемых светом нелинейно-оптических (наночастицы TiO_2) [8] или люминесцентных (наночастицы LaPO_4 , легированного ионами Ce^{3+} и Tb^{3+}) [9] дифракционных элементов. В тонких плёнках нанополимера с Si можно формировать брэгговские решётки благодаря глубокой модуляции

показателя преломления [10]. Дифракционные элементы с наночастицами SiO_2 позволяют управлять потоками медленных нейтронов [11]. Голографические решётки могут служить в качестве эффективной распределённой обратной связи в полимерных матрицах с коллоидными нанокристаллами CdSe/ZnS в качестве усиливающей среды [7, 12]. Периодические структуры на основе поверхностных плазмон-поляритонов обладают сверхвысокой спектральной дисперсией [13].

При записи наложенных решёток с разными периодами в фоторефрактивных материалах [14], массивов брэгговских решёток в оптическом волокне (ВБР), используемых в качестве датчиков физического состояния волокна [15], наклонных ВБР [16] и в других применениях [1, 2, 4–6, 9–11] выполняется перестройка периода $\Lambda = \lambda/2\sin\alpha$ (λ — длина волны излучения) при переходе от одной решётки к другой. Такая перестройка осуществляется изменением угла схождения 2α парциальных пучков (ПП). На каждой ступени перестройки выполняется целый ряд настроек процедур: юстировка зеркал, направляющих ПП на фоточувствительный образец (ФЧО), изменение положения ФЧО вслед за перемещающейся интерференционной решёткой (ИР), выравнивание оптических длин по осям ПП. В случае большого числа записываемых дифракционных решёток с разными периодами, например, в [14, 15], значительно возрастает трудоёмкость работы и снижается её скорость. Быструю перестройку Λ удавалось реализовать для специальных применений [17]. В этой работе размер ИР ограничивался диаметром фокального пятна микрообъектива (единицы мкм), кроме того, использовалась сложная оптическая система, включающая двухкординатный дефлектор, многопризменный светоделитель и другие оптические элементы.

Предложенная и исследованная в работах [18, 19] концепция вращательной перестройки Λ в двухлучевых интерферометрах позволяет исключить указанные настроочные работы. В системе интерферометр-ФЧО все элементы взаимно неподвижны, угол схождения 2α перестраивается изменением угла падения исходного светового пучка (ИП) посредством вращения системы. Плоскость полного взаимного перекрытия ПП (далее центральное сечение ИР), характеризующаяся максимальным

контрастом ИР по всей её ширине, остаётся вблизи ФЧО во всём диапазоне перестройки. В итоге реализуется непрерывная широкодиапазонная перестройка угла схождения, а система интерферометр-ФЧО представляет собой жёсткий виброустойчивый блок.

В работах [20, 21] была исследована система на основе светоделительного кубика (СДК), в которой зеркала и ФЧО также неподвижны. Излучение от неподвижного источника вводится в СДК с помощью подвижного зеркала (ПЗ), благодаря чему достигается неподвижность самой системы. При этом ПЗ совершает совместно угловое и линейное перемещения, взаимно согласованные так, чтобы движение ИП по входной поверхности имитировало тяковое в случае вращения интерферометра, как в [18, 19]. В [20, 21] рассмотрена реализация такого согласования посредством рычага, ось вращения которого перемещается линейно параллельно входной поверхности, а его плечо опирается на прямолинейную наклонную направляющую. В результате центральное сечение ИР находится в непосредственной близости от ФЧО по аналогии с [18, 19] во всём диапазоне перестройки угла схождения ПП.

Достоинством системы, рассмотренной в [20, 21], является неподвижность элементов интерферометра, ФЧО и источника излучения относительно окружающей среды; в системе действует только одно функциональное движение, реализующее одновременно две степени свободы ПЗ — линейное и угловое перемещения. Последнее придаёт системе высокую виброустойчивость.

Её недостатки обусловлены отмеченными выше отклонениями центрального сечения ИР от ФЧО, что иллюстрирует рис. 1а. На нём показаны парциальные пучки ПП1 и ПП2 диаметром D , сходящиеся под углом 2α ; ромбовидная область их взаимного перекрытия заполнена ИР (выделена тёмно-зелёным цветом). Центральное сечение шириной

$$J = D/\cos\alpha$$

привязано к пересечению осей ПП, где пучки полностью перекрываются, и удалено от СДК на расстояние L . В этом сечении контраст ИР максимальен (видность $V = 1$ в случае равенства интенсивностей обоих ПП) и однороден по всей ширине J . Активная поверхность ФЧО

изображена смещённой от центрального сечения ИР на расстояние

$$\delta L = L - L_{\text{ph}},$$

где L_{ph} — расстояние между ФЧО и СДК. Видно, что полная ширина светового пятна на ФЧО, оставляемого обоими ПП, больше ширины J , зато ширина

$$J_{\text{ph}} = J - 2\delta L \operatorname{tg} \alpha$$

области внутри этого пятна, заполненной интерференцией, меньше J . Вместе с этим контраст ИР в этой области неоднороден: максимальный вблизи её центра, он спадает практически до нуля на краях. Отсюда следует, что смещение δL должно быть весьма малым по сравнению с половиной длины ИР

$$S = D / \sin \alpha$$

вдоль биссектрисы угла схождения, чтобы часть ширины J_{ph} со значимым контрастом ($V \geq 1/3$) не сильно отличалась от J

$$|\delta L| \leq \varepsilon S / 2, \quad \varepsilon \ll 1.$$

Требование малости $|\delta L|$ накладывает ограничение снизу на диаметр D

$$D \geq (2|\delta L|_{\max} \sin \alpha) / \varepsilon,$$

где $|\delta L|_{\max}$ — наибольшее смещение центрального сечения ИР от ФЧО. Это делает проблематичной широкодиапазонную перестройку угла схождения ПП для узких (сфокусированных) пучков.

Предстоящий анализ ставит своей целью скорректировать голографическую систему, исследованную в работах [20, 21], таким образом, чтобы обеспечивалась точная фиксация пространственного положения ИР во всем диапазоне перестройки угла схождения.

2. АНАЛИЗ СИСТЕМЫ С ТОЧНОЙ ФИКСАЦИЕЙ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ РЕШЁТКИ НА ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОМ ОБЪЕКТЕ

Оптическая схема анализируемой системы формирования периодических ИР представлена на рис. 1б. Система включает в себя два функционально независимых узла, оптически связанных между собой. Интерферометрический

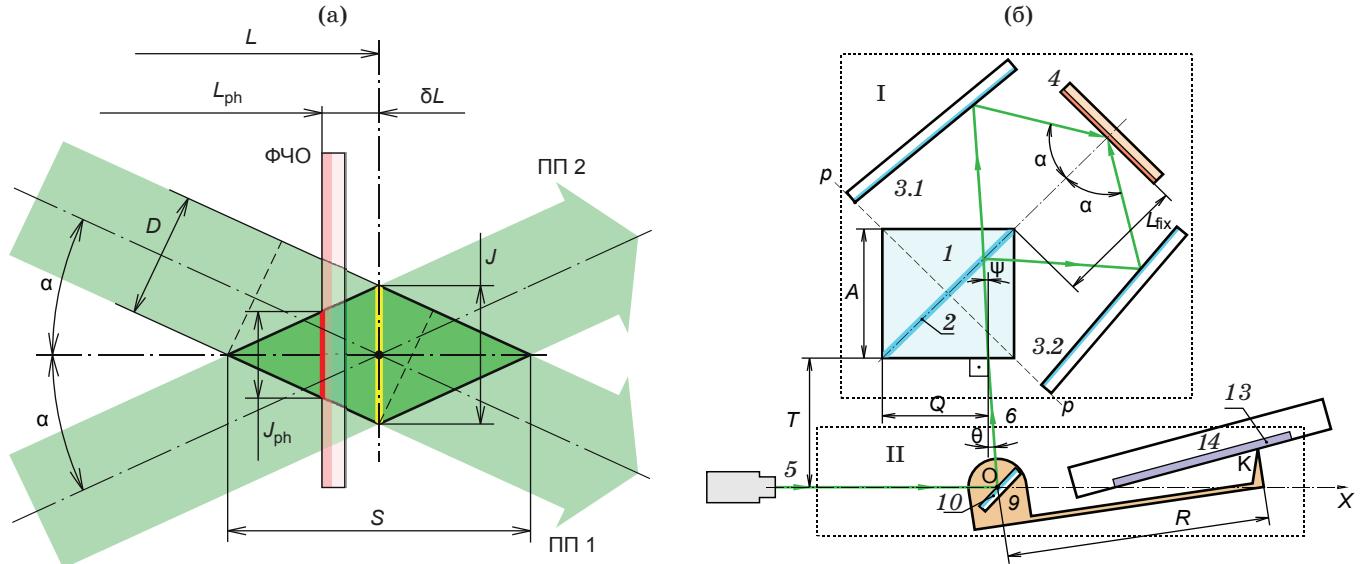


Рис. 1. Диаграммы, характеризующие принцип действия и конфигурацию исследуемой системы. (а) Схема формирования интерференционной решётки в области перекрытия парциальных пучков, (б) упрощённая оптическая схема: I — интерферометрический узел, II — узел перемещения подвижного зеркала

Fig. 1. Diagrams characterizing the principle of operation and the configuration of the system under study. (a) Scheme of the formation of an interference grating in the region of partial beams overlap, (b) simplified optical scheme of the system under study: I — interferometric unit; II — unit for moving the movable mirror

узел I в свою очередь состоит из интерферометра и механически жёстко с ним связанного ФЧО. Узел II перемещения ПЗ обеспечивает управление положением ИП на входе в интерферометр при перестройке угла схождения ПП. Нижеследующий анализ системы выполнен в приближении бесконечно тонких пучков (лучевое представление), что оправдано условием точного совмещения центрального сечения ИР с ФЧО на всём диапазоне перестройки.

2.1. Анализ хода световых пучков в интерференционном узле I

Оптическая схема интерферометрического узла I показана на рис. 2. В состав интерферометра входит СДК 1 размером A со встроенным в него делительным зеркалом (ДЗ) 2 и два направляющие зеркала 3.1 и 3.2, параллельные рёбрам $C_1 - C_4$ СДК. Зеркала расположены симметрично относительно плоскости ДЗ и наклонены к ней под углом ξ (на рис. 2 $\xi > 0$). Расстояние H между зеркалами 3.1 и 3.2 отсчитывается в плоскости р-р. Плоский ФЧО 4 установлен перпендикулярно плоскости ДЗ и параллельно рёбрам $C_1 - C_4$. В итоге плоскость ДЗ является плоскостью симметрии интерферометра в целом, включая ФЧО и совокупность ПП.

Текущая позиция ИП 6 на входной поверхности $C_1 - C_2$ однозначно определяется двумя параметрами: расстоянием Q от ребра C_1 , смежного с ДЗ, и углом падения θ . Плоскость падения перпендикулярна рёбрам $C_1 - C_4$, благодаря чему все световые пучки исследуемой системы лежат в этой плоскости (далее плоскость пучков). Затем ИП входит в тело СДК под углом преломления ψ и на ДЗ преобразуется в два идентичных ПП, которые выходят из СДК через его выходные поверхности $C_3 - C_4$ и $C_3 - C_2$ на равных расстояниях B от ребра C_3 в силу симметрии интерферометра. После отражения от зеркал 3.1 и 3.2 эти пучки направляются друг к другу под углом схождения 2α и пересекаются между собой на расстоянии L (далее длина схождения) от ребра C_3 : в точку пересечения помещается ФЧО. В предстоящем анализе все линейные параметры системы представляются в единицах A : $h = H/A$, $l = L/A$ и т.п.

Половинный угол схождения α и угол падения θ связаны между собой:

$$\alpha = \theta + 2\xi + 45^\circ. \quad (1)$$

Формула (1) соответствует условию однодirectionalности изменения углов α и θ : $\delta\alpha = \delta\theta$.

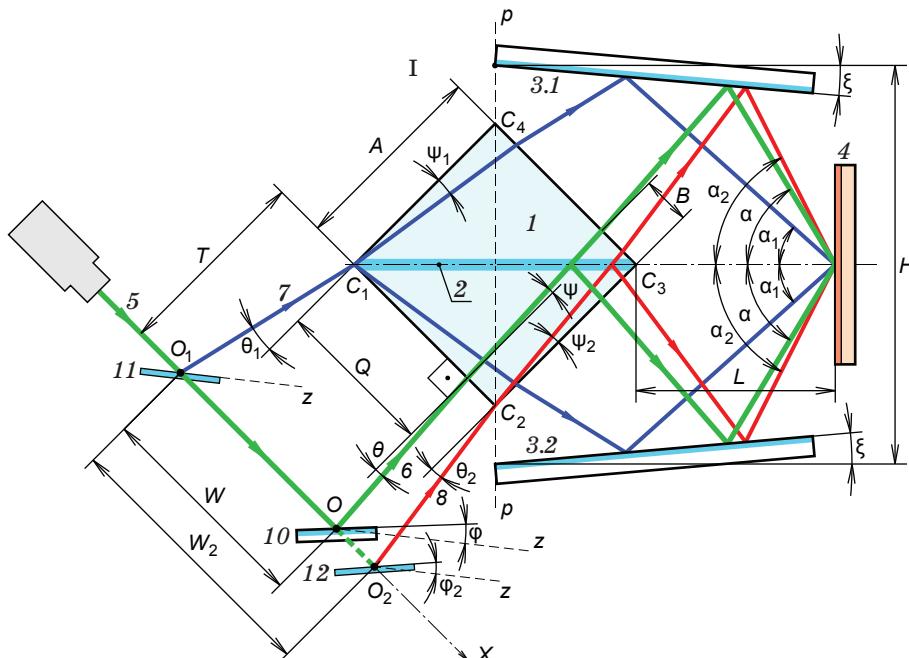


Рис. 2. Оптическая схема интерферометрического узла I

Fig. 2. Optical scheme of the interferometric unit I

Это означает, что угол θ увеличивается ($\delta\theta > 0$) при повороте ИП против часовой стрелки на рис. 2. Положение световых пучков внутри СДК определяется соотношением

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

где $\operatorname{tg} \psi = (\sin \theta) / (n^2 - \sin^2 \theta)^{1/2}$ и n — показатель преломления материала СДК. Линейные параметры в (2) ограничены неравенствами $0 \leq q \leq 1$ и $1 \leq b \leq 0$.

Анализ хода ПП за пределами СДК даёт следующее выражение длины схождения (дetailedный вывод см. в [19]):

$$l = [(h \cos \xi - \sqrt{2} \sin \xi) \cos(\alpha - \xi) - (1 - q + \operatorname{tg} \psi) \cos \theta] / \sin \alpha. \quad (3)$$

Неподвижность центрального сечения ИР в процессе перестройки угла схождения определяется условием $l = l_{\text{fix}} = \text{const}$. При подстановке этого условия в (3) получается точный закон движения ИП $q(\theta)$ по входной поверхности СДК:

$$q = 1 + \operatorname{tg} \psi + [l_{\text{fix}} \sin \alpha - (h \cos \xi - \sqrt{2} \sin \xi) \cos(\alpha - \xi)] / \cos \theta. \quad (4)$$

Можно показать, что первая производная закона (4) q' положительна при любых реализуемых на практике значениях углов θ и ξ . Это означает, что расстояние q и углы θ и α изменяются однократно — увеличение угла схождения α сопровождается поворотом ИП против часовой стрелки и его перемещением от C_1 к C_2 . Следовательно, нижнее граничное положение ИП 7 (θ_1 , q_1 и α_1) позиционируется у ребра C_1 , а верхнее 8 (θ_2 , q_2 и α_2) — у ребра C_2 . Как следует из (4), каждому значению длины l_{fix} соответствуют свои граничные значения.

Граничные углы падения θ_1 и θ_2 могут быть независимо друг от друга как положительными, так и отрицательными. Причём каждому случаю соответствует свой вид уравнения для нахождения искомого граничного значения, а каждому сочетанию θ_1 и θ_2 — своя конфигурация интерферометра. На практике предпочтительна ситуация, когда $\theta_1 < 0$ и $\theta_2 > 0$. В этом случае ИП в нижнем граничном положении

касается ребра C_1 , а в верхнем — ребра C_2 . Подставляя в закон движения (4) соответствующие граничные расстояния $q_1 = 0$ или $q_2 = 1$ и учитывая (1), можно получить уравнения для нахождения θ_1 или θ_2 :

$$l_{\text{fix}} \sin \alpha_1 - (h \cos \xi - \sqrt{2} \sin \xi) \cos(\alpha_1 - \xi) + (1 + \operatorname{tg} \psi_1) \cos \theta_1 = 0, \quad (5)$$

$$l_{\text{fix}} \sin \alpha_2 - (h \cos \xi - \sqrt{2} \sin \xi) \cos(\alpha_2 - \xi) + \operatorname{tg} \psi_2 \cos \theta_2 = 0. \quad (6)$$

Разность граничных значений половинного угла схождения α определяет ширину диапазона его перестройки

$$\Delta \alpha = \alpha_2 - \alpha_1. \quad (7)$$

Подстановкой в (7) выражений для α_2 и α_1 , извлекаемых из (1) при $\theta = \theta_2$ и θ_1 соответственно находится интервал изменения угла падения θ

$$\Delta \theta = \theta_2 - \theta_1 = \Delta \alpha. \quad (8)$$

Непрямолинейность закона движения $q(\theta)$ определяется его отклонением

$$\delta q = q - q_{\text{lin}} \quad (9)$$

от прямой q_{lin} , соединяющей крайние точки с координатами θ_1 , q_1 и θ_2 , q_2

$$q_{\text{lin}} = q_1 + (q_2 - q_1)(\theta - \theta_1) / (\theta_2 - \theta_1). \quad (10)$$

2.2. Анализ механизма перемещения подвижного зеркала

Узел перемещения II, показанный на рис. 3, взаимно согласует линейное и угловое перемещения ПЗ 10 таким образом, чтобы отражаемый от него ИП 6 точно воспроизводил закон движения (4). Сам ИП формируется из коллимированного светового пучка (КСП) 5, излучаемого неподвижным относительно исследуемой системы источником. КСП направляется параллельно входной поверхности СДК на расстоянии T от неё по координатной оси X , лежащей в плоскости пучков.

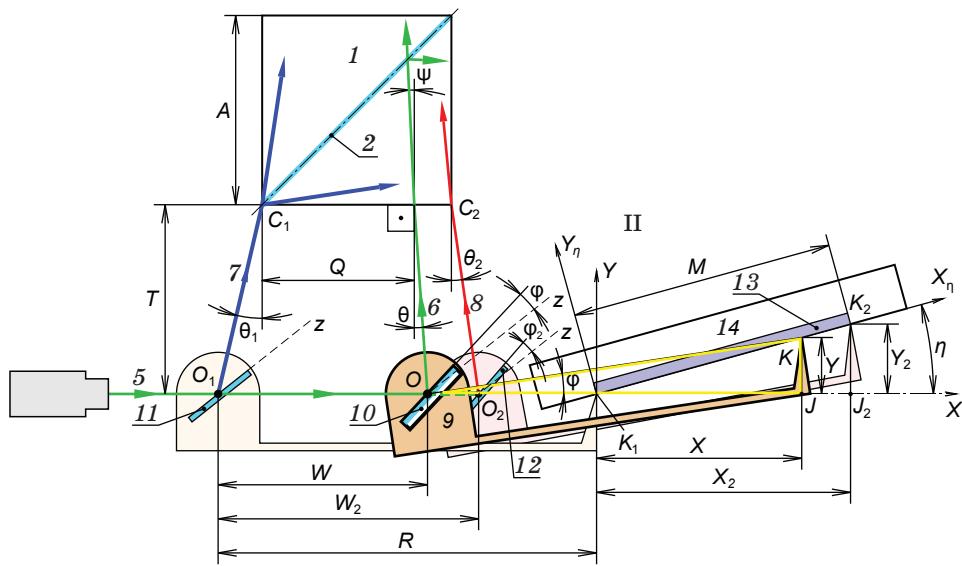


Рис. 3. Оптическая схема узла II перемещения подвижного зеркала

Fig. 3. Optical scheme of unit II of the movement of the movable mirror

Совмещение двух движений реализуется посредством рычажного механизма 9 (далее рычаг) с длиной плеча R . Рычаг вращается вокруг оси O , перпендикулярной координатной оси X и пересекающейся с ней, а его плечо касается без зазора в точке K контактного профиля 13 наклонной направляющей 14. Это касание обеспечивается посредством какого-либо упругого элемента (на рис. 3 не показан). Отражающая поверхность ПЗ, установленного на рычаге 9, совмещается с осью O , благодаря чему удаётся исключить эффекты параллакса.

Транслятор (на рис. 3 не показан) перемещает закреплённую на нём ось вращения O вдоль координатной оси X от начального положения O_1 до конечного O_2 . Вместе с осью O перемещается и ПЗ от своего начального 11 до конечного 12 положений. Одновременно плечо рычага 9 скользит по контактному профилю 13 от точки K_1 , лежащей на оси X , до точки K_2 , благодаря чему линейное перемещение ПЗ сопровождается поворотом рычага вокруг оси O . Точки K_1 и K_2 ограничивают контактный профиль, и поиск функциональной связи его огибающей с законом движения (4) конкретизирует цель настоящего анализа.

Положение оси вращения O , являющейся также начальной точкой ИП, на координатной оси X определяется координатой w , отсчитываемой от начального положения O_1 ($w_1 = 0$). К положительному O_1 оси O привязано

нижнее граничное положение 7 ИП (θ_1, q_1). Текущая координата w и текущее положение ИП (θ, q) связаны между собой соотношением

$$w = q - q_1 + t(\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\theta_1), \quad (11)$$

в котором закон движения (4) представлен переменной q . Конечная координата w_2 , привязанная к верхнему граничному положению ИП (θ_2, q_2):

$$w_2 = q_2 - q_1 + t(\operatorname{tg}\theta_2 - \operatorname{tg}\theta_1), \quad (12)$$

получается из (11) подстановкой $\theta = \theta_2$ и $q = q_2$. Формула (12) определяет одновременно и полную длину дистанции, по которой транслятор перемещает ось O .

Угловое перемещение ПЗ определяется углом поворота φ , отсчитываемого от оси Z , лежащей на отражающей плоскости в начальном положении 11. Согласно закону зеркального отражения $\delta\theta = 2\varphi$. Поворот ПЗ от начального значения $\varphi_1 = 0$ до текущего φ сопровождается изменением угла падения от θ_1 до θ , поэтому

$$\varphi = (\theta - \theta_1)/2. \quad (13)$$

При подстановке в (13) $\varphi = \varphi_2$ и $\theta = \theta_2$ и с учётом (8) получается конечное значение угла φ

$$\varphi_2 = (\theta_2 - \theta_1)/2 = \Delta\alpha/2, \quad (14)$$

соответствующее верхнему граничному положению ИП. В формулах (11)–(14) граничные значения θ_1 и θ_2 находятся из уравнений (5) и (6). В итоге выражения (11) и (13) полностью отображают процесс управления движением ИП по входной поверхности СДК.

Опорный край K рычага 9 перемещается в координатной системе X, Y с началом в точке $K_1 (x_1 = 0, y_1 = 0)$, соответствующей начальному положению O_1 оси O . Текущие координаты x, y точки K на контактном профиле 13 находятся из треугольника OKJ с учётом (11), (13)

$$\begin{aligned} x &= q - q_1 + t(\operatorname{tg}\theta - \operatorname{tg}\theta_1) - \\ &- r\{1 - \cos[(\theta - \theta_1)/2]\}, \end{aligned} \quad (15)$$

$$y = r \sin[(\theta - \theta_1)/2]. \quad (16)$$

Координаты x_2, y_2 крайней точки K_2 , соответствующей конечному положению O_2 оси O , получаются из (15), (16) и (8) подстановкой $\theta = \theta_2$:

$$\begin{aligned} x_2 &= q_2 - q_1 + t(\operatorname{tg}\theta_2 - \operatorname{tg}\theta_1) - \\ &- r(1 - \cos\Delta\alpha/2), \end{aligned} \quad (17)$$

$$y_2 = r \sin \Delta\alpha/2. \quad (18)$$

Формулы (15) и (16) показывают, что координаты x, y отображают огибающую контактного профиля 13 как функцию параметров ИП θ и q , предписываемых законом движения (4). Следовательно, скольжение плеча рычага 9 по этому профилю от точки K_1 до точки K_2 обеспечивает точное выполнение этого закона при движении ИП по входной поверхности СДК от своего нижнего (θ_1, q_1) до верхнего (θ_2, q_2) граничных положений.

Функцию $x(y)$ контактного профиля удобно выразить в координатной системе X_η, Y_η , повёрнутой относительно системы X, Y вокруг начала координат так, чтобы ось X_η проходила через точки K_1 и K_2 . Отрезок этой оси K_1K_2 является длиной m контактного профиля

$$m = \sqrt{x_2^2 + y_2^2}, \quad (19)$$

а угол поворота η системы X_η, Y_η извлекается из треугольника $K_1K_2J_2$

$$\eta = \operatorname{arctg}(y_2/x_2). \quad (20)$$

Текущие координаты x_η, y_η контактного профиля в системе X_η, Y_η определяются через координаты x, y , извлекаемые из формул (15) и (16), по правилам преобразования координат

$$\begin{aligned} x_\eta &= x \cos \eta + y \sin \eta \\ \text{и } y_\eta &= -x \sin \eta + y \cos \eta, \end{aligned} \quad (21)$$

где угол η вычисляется по формуле (20). Выражая функции $\sin \eta$ и $\cos \eta$ как отношения сторон треугольника $K_1K_2J_2$: катетов x_2, y_2 согласно (17), (18) и гипотенузы m согласно (19)

$$\cos \eta = x_2/m, \quad \sin \eta = y_2/m \quad (22)$$

и подставляя (22) в соотношения (21), можно получить окончательные формулы для x_η, y_η

$$\begin{aligned} x_\eta &= (x_2 x + y_2 y)/m, \\ y_\eta &= (-y_2 x + x_2 y)/m. \end{aligned} \quad (23)$$

Координата y_η является по сути отклонением огибающей контактного профиля 13 от прямой, соединяющей её краевые точки K_1 и K_2 , т.е. от прямолинейного контактного профиля в системе, представленной работами [20, 21].

3. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЁТА

Для примера рассчитаны характеристики исследуемой системы со следующими параметрами: $h = 2$, $\xi = 5^\circ$, $l_{\text{fix}} = 1$, $t = 1$, $r = 2$.

3.1. Перестроочные характеристики интерферометра с неподвижной ИР

На рис. 4а представлены граничные значения α_1 (кривая 2) и α_2 (кривая 1), а также соответствующие им значения θ_1 (кривая 5) и θ_2 (кривая 4) в зависимости от фиксированной длины схождения l_{fix} . Кривая 3 отображает зависимость ширины диапазона $\Delta\alpha(l_{\text{fix}})$. Все граничные параметры убывают с ростом l_{fix} , что указывает на возможность осуществлять перестройку в очень широком диапазоне, совмешая разные поддиапазоны на одном устройстве по аналогии с [19]. На кривых 5 и 4 отмечены три зоны возможных сочетаний знаков граничных значений θ_1 и θ_2 : а) $\theta_1 > 0$ и $\theta_2 > 0$; б) $\theta_1 < 0$ и $\theta_2 > 0$ и в) $\theta_1 < 0$, $\theta_2 < 0$.

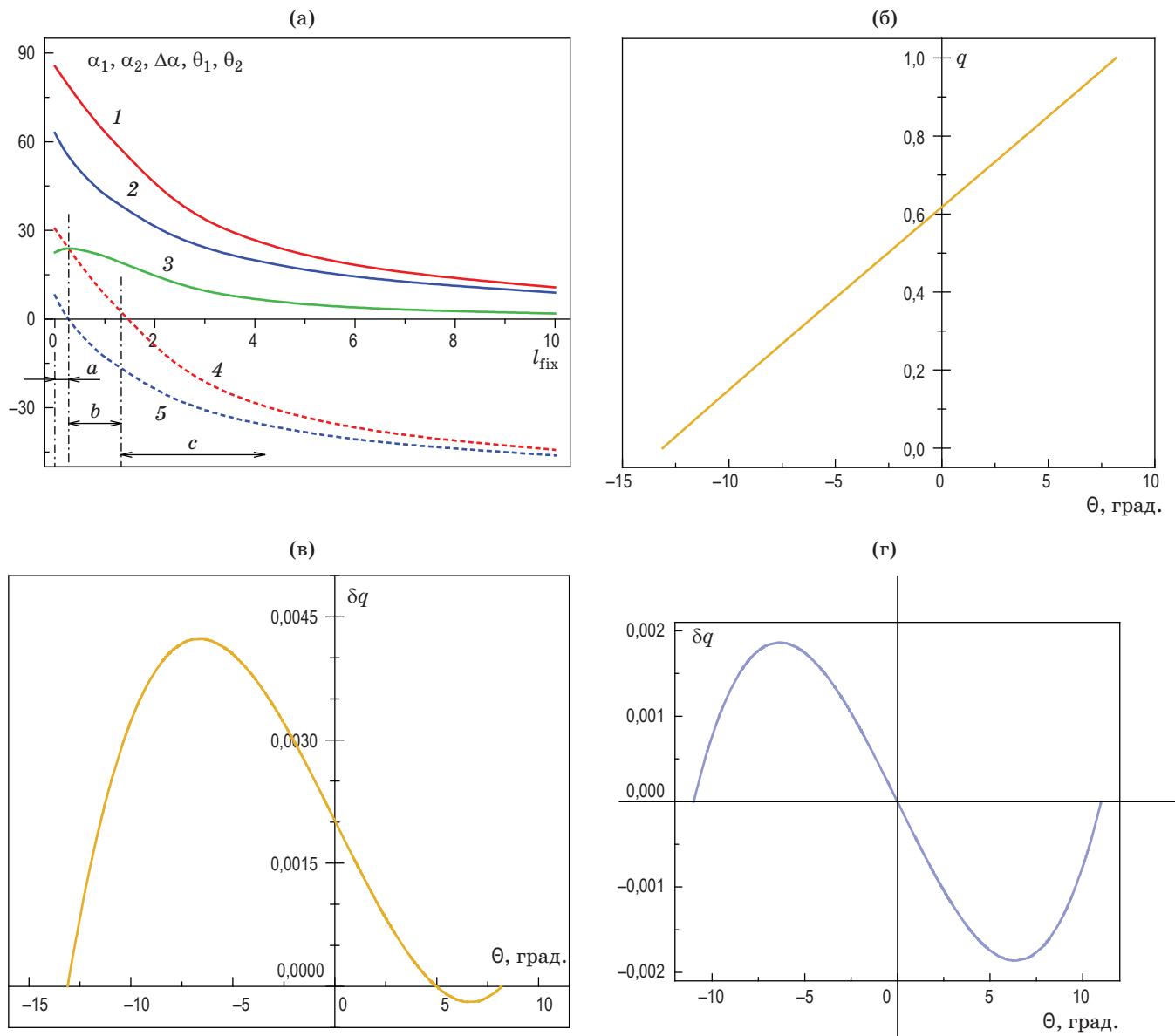


Рис. 4. Перестроочные характеристики интерферометрического узла с параметрами $h = 2$, $\xi = 5^\circ$: (а) 1 — α_2 , 2 — α_1 , 3 — $\Delta\alpha$, 4 — θ_2 , 5 — θ_1 ; (б) и (в) зависимости $q(\theta)$ и $\delta q(\theta)$ соответственно при $l_{\text{fix}} = 1$; (г) зависимость $\delta q(\theta)$ при $l_{\text{fix}} = 0,856$

Fig. 4. Tuning characteristics of the interferometric unit with parameters $h = 2$, $\xi = 5^\circ$: (a) 1 — α_2 , 2 — α_1 , 3 — $\Delta\alpha$, 4 — θ_2 , 5 — θ_1 ; (б) and (в) dependences $q(\theta)$ and $\delta q(\theta)$, respectively, at $l_{\text{fix}} = 1$; (г) dependence $\delta q(\theta)$ at $l_{\text{fix}} = 0,856$

Набор параметров в обсуждаемом примере соответствует интервалу « b » ($0,246 < l_{\text{fix}} < 1,467$), когда эти знаки различны: $\theta_1 < 0$ и $\theta_2 > 0$, поэтому данные для построения этих кривых в интервале « b » находились из уравнений (5) и (6). Максимум на зависимости $\Delta\alpha(l_{\text{fix}})$ (кривая 3) обусловлен изменением вида уравнения, связанным с разницей в знаке θ_1 по обе стороны от точки $l_{\text{fix}} = 0,246$ на оси абсцисс.

Зависимость $q(\theta)$ закона движения (4) при $l_{\text{fix}} = 1$ показана на рис. 4б, а её отклонение $\delta q(\theta)$ от прямой линии, проведённой через её крайние точки, согласно (9) и (10) — на рис. 4в. Видно, что кривая $\delta q(\theta)$ асимметрична относительно оси θ и имеет максимум $\delta q_{\max} = 0,00423$ при $\theta_{\max} = -6,917^\circ$. При $l_{\text{fix}} = 0,856$ реализуется симметричная зависимость $\delta q(\theta)$, показанная на рис. 4г: её отклонение δq минимально

по сравнению с таковыми при $l_{\text{fix}} \neq 0,856$. В этом случае возможна уникальная позиция ИП с параметрами $q = 0,5$ и $\theta = 0$.

3.2. Форма огибающей контактного профиля в механизме перемещения подвижного зеркала

Кривая 1 на рис. 5 показывает форму огибающей $y_\eta(x_\eta)$ криволинейного контактного профиля 13 (рис. 3) в координатной системе X_η, Y_η , которая рассчитана по формулам (23) с использованием формул (15), (16) и (4) для различных значений θ в интервале от θ_1 до θ_2 . Видно, что для выбранной конфигурации интерферометра эта функция не меняет знака. Кривая 1 имеет экстремум с координатами $x_\eta = 0,5105$, $y_\eta = -0,00307$; соответствующие параметры ИП: $\theta_{\text{ext}} = -5,508^\circ$, $q_{\text{ext}} = 0,361$. Отрезок оси x_η длиной $m = 1,392$, соединяющей концы кривой 1, является образом прямолинейного контактного профиля в голограммической системе, описанной в [20, 21]. Поэтому кривая 1 показывает, как нужно скорректировать форму прямолинейного профиля, чтобы ИР оставалась неподвижной в процессе перестройки. Интересно соопоставить форму огибающей контактного профиля $y_\eta(x_\eta)$ с зависимостью $\delta q(x_\eta)$ (кривая 2), отражающей закон движения (4). Эта кривая получена пересчётом соответствующей зависи-

мости $\delta q(\theta)$, характеризующей непрямолинейность закона движения — см. рис. 4в. Кривые 1 и 2 близки по форме и амплитуде и противостоят другу относительно оси абсцисс.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе аналитически исследована голограммическая система с перестраиваемым углом схождения парциальных световых пучков, предназначенная для записи дифракционных решёток разного типа. Система включает в себя интерферометр на основе СДК с двумя направляющими зеркалами и ФЧО, образующие совместно механически жёсткий узел, а также рычажный механизм комбинированного (линейного и углового) перемещения подвижного зеркала, посредством которого исходный световой пучок вводится в интерферометр. Найдено решение задачи о строгой фиксации пространственного положения центрального сечения интерференционной решётки, формируемой в области пересечения парциальных пучков, во всем диапазоне перестройки её периода. Для этого наклонный контактный профиль, по которому скользит плечо рычага для обеспечения углового перемещения подвижного зеркала, непрямолинеен. Выведено функциональное выражение для огибающей контактного профиля.

Фиксация положения ИР снимает ограничение снизу на поперечный размер интерферирующих пучков, которое присуще системе с прямолинейным контактным профилем (работы [20, 21]) из-за наличия в ней малых смещений центрального сечения ИР относительно ФЧО при перестройке угла схождения. Таким образом открывается возможность на одном устройстве использовать как сфокусированные пучки, так и очень широкие, не производя дополнительных настроек.

Следует отметить, что в исследованной голограммической системе легко достижима полная автоматизация её функционирования, поскольку управление периодом записываемых дифракционных решёток осуществляется единственным движущимся элементом — приводом подвижного зеркала. Это может иметь большое значение для массового производства и промышленного применения массивов ВБР в квазираспределённых оптоволоконных сенсорных сетях, фазовых масок и других дифракционных оптических элементов.

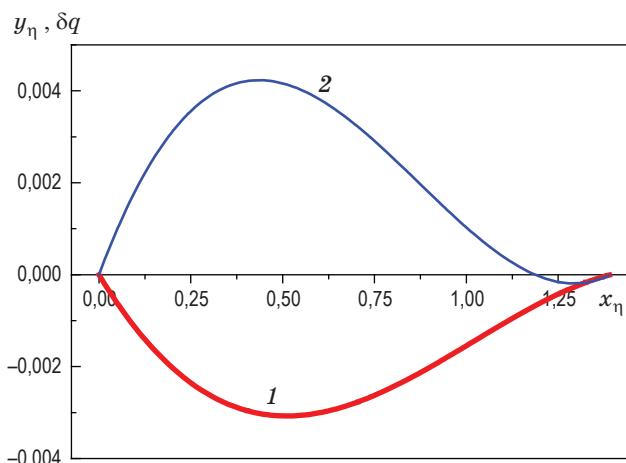


Рис. 5. Огибающая контактного профиля рычажного механизма (кривая 1) для системы с параметрами $h = 2$, $\xi = 5^\circ$, $l_{\text{fix}} = 1$, $t = 1$, $r = 2$ и соответствующая зависимость $\delta q(x_\eta)$ (кривая 2)

Fig. 5. Envelope of the contact profile of the lever mechanism (curve 1) for a system with parameters $h = 2$, $\xi = 5^\circ$, $l_{\text{fix}} = 1$, $t = 1$, $r = 2$ and the corresponding dependence $\delta q(x_\eta)$ (curve 2)

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Gleeson M.R., Sheridan J.T., Bruder F.-K., Rölle T., Berneth H., Weiser M.-S., Fäcke T. Comparison of a new self-developing photopolymer with AA/PVA based photopolymer utilizing the NPDD model // Optics Express. 2011. V. 19. № 27. P. 26325. <https://doi.org/10.1364/OE.19.026325>
2. Olivares-Pérez A., Toxqui-López S., Padilla-Velasco A.L. Nopal cactus (*Opuncia Ficus-Indica*) as a holographic material // Materials. 2012. V. 5. № 11. P. 2383–2402. <https://doi.org/10.3390/ma5112383>
3. Nimmi K.P., Pramitha V., Sreekumar K., Kartha C.S., Joseph R.J. Effect of concentration of DYE on the storage life of plane wave gratings on photopolymer film // J. of Applied Polymer Science. 2012. V. 125. № 2. P. 1238–1243. <https://doi.org/10.1002/app.34963>
4. Zhzhchenko A.Yu., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N. Recording and thermo developing of latentphase holograms in the photosensitive polymer material based on anthracylacetonatoboron difluoride // Optical Materials. 2015. V. 46. P. 265–269. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.04.030>
5. Matusevich V., Tolstik E., Kowarschik R., Egorova E., Matusevich Yu.I., Krul L. New holographic polymeric composition based on plexiglass, polyvinyl butyral, and phenanthrenquinone // Optics Communications. 2013. V. 295. P. 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.01.016>
6. Смирнова Т.Н., Кохтич Л.М., Сахно О.В., Штумпе И. Голографические нанокомпозиты для записи периодических структур полимернаночастицы. I. Общий подход к выбору компонент нанокомпозитов и их голографические свойства // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110. № 1. С. 135–142.
7. Смирнова Т.Н., Кохтич Л.М., Сахно О.В., Штумпе И. Голографические нанокомпозиты для записи периодических структур полимернаночастицы. II. Механизм образования объемной периодической структуры полимер-НЧ и влияние параметров формирующего поля на эффективность структуры // Оптика и спектроскопия. 2011. Т. 110. № 1. С. 143–150.
8. Smirnova T.N., Sakhno O.V., Bezrodnyi V.I., Stumpe J.J. Nonlinear diffraction in gratings based on polymer-dispersed TiO₂ nanoparticles // Applied Physics B. 2005. V. 80. № 8. P. 947–951. <https://doi.org/10.1007/s00340-005-1873-7>
9. Sakhno O.V., Smirnova T.N., Goldenberg L.M., Stumpe J. Holographic patterning of luminescent photopolymer nanocomposites // Material Science Engineering C. 2008. V. 28. № 1. P. 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.03.002>
10. Назаров М.М., Хайдуков К.В., Соколов В.И., Хайдуков Е.В. Лазерное формирование брэгговских решёток в нанокомпозитных поли-

REFERENCES

1. Gleeson M.R., Sheridan J.T., Bruder F.-K., Rölle T., Berneth H., Weiser M.-S., Fäcke T. Comparison of a new self-developing photopolymer with AA/PVA based photopolymer utilizing the NPDD model // Optics Express. 2011. V. 19. № 27. P. 26325. <https://doi.org/10.1364/OE.19.026325>
2. Olivares-Pérez A., Toxqui-López S., Padilla-Velasco A.L. Nopal cactus (*Opuncia Ficus-Indica*) as a holographic material // Materials. 2012. V. 5. № 11. P. 2383–2402. <https://doi.org/10.3390/ma5112383>
3. Nimmi K.P., Pramitha V., Sreekumar K., Kartha C.S., Joseph R.J. Effect of concentration of DYE on the storage life of plane wave gratings on photopolymer film // J. of Applied Polymer Science. 2012. V. 125. № 2. P. 1238–1243. <https://doi.org/10.1002/app.34963>
4. Zhzhchenko A.Yu., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N. Recording and thermo developing of latentphase holograms in the photosensitive polymer material based on anthracylacetonatoboron difluoride // Optical Materials. 2015. V. 46. P. 265–269. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2015.04.030>
5. Matusevich V., Tolstik E., Kowarschik R., Egorova E., Matusevich Yu.I., Krul L. New holographic polymeric composition based on plexiglass, polyvinyl butyral, and phenanthrenquinone // Optics Communications. 2013. V. 295. P. 79–83. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2013.01.016>
6. Smirnova T.N., Kokhtich L.M., Sakhno O.V., Stumpe J. Holographic nanocomposites for recording polymer-nanoparticle periodic structures: I. General approach to choice of components of nanocomposites and their holographic properties // Optics and Spectroscopy. 2011. V. 110. № 1. P. 129–136. <https://doi.org/10.1134/S0030400X11010206>
7. Smirnova T.N., Kokhtich L.M., Sakhno O.V., Stumpe J. Holographic nanocomposites for recording polymer-nanoparticle periodic structures: II. Mechanism of formation of polymer-nanoparticle bulk periodic structure and effect of parameters of forming field on structure efficiency // Optics and Spectroscopy. 2011. V. 110. № 1. P. 137–144. <https://doi.org/10.1134/S0030400X11010218>
8. Smirnova T.N., Sakhno O.V., Bezrodnyi V.I., Stumpe J.J. Nonlinear diffraction in gratings based on polymer-dispersed TiO₂ nanoparticles // Applied Physics B. 2005. V. 80. № 8. P. 947–951. <https://doi.org/10.1007/s00340-005-1873-7>
9. Sakhno O.V., Smirnova T.N., Goldenberg L.M., Stumpe J. Holographic patterning of luminescent photopolymer nanocomposites // Material Science Engineering C. 2008. V. 28. № 1. P. 28–35. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2007.03.002>
10. Nazarov M.M., Khaydukov K.V., Sokolov V.I., Khaydukov E.V. Laser formation of Bragg gratings in polymer nanocomposite materials // Quantum

- мерных материалах // Квантовая электроника. 2016. Т. 46. № 1. С. 29–32.
11. Klepp J., Pruner C., Tomita Y., Plonka-Spehr C., Geltenbort P., Ivanov S., Manzin G., Andersen K.H., Kohlbrecher J., Ellabban M.A., Fally M. Diffraction of slow neutrons by holographic SiO₂ nanoparticle-polymer composite gratings // Physical Review A. 2011. V. 84. № 1. P. 013621. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.84.013621>
 12. Smirnova T.N., Sakhno O.V., Yezhov P.V., Kokhtych L., Goldenberg L.M., Stumpe J. Amplified spontaneous emission in polymer-CdSe/ZnS-nanocrystal DFB structures produced by the holographic method // Nanotechnology. 2009. V. 20. № 25. P. 245707. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/24/245707>
 13. Mikhailov V., Elliott J., Wurtz G., Bayvel P., Zayats A.V. Dispersing light with surface plasmon polaritonic crystals // Physical Review Letters. 2007. V. 99. № 8. P. 083901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.083901>
 14. Ангервакс А.Е., Гороховский К.С., Грановский В.А., Doan Van Bac, Иванов С.А., Окунь Р.А., Никоноров Н.В., Рыскин А.И. Голографическая призма на фототермо-рефрактивном стекле: Требования и возможности // Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 123. № 6. С. 963–969.
 15. Zhang Z., Xu B., He J., Hou M., Bao W., Wang Y. High-efficiency inscription of fiber Bragg grating array with high-energy nanosecond-pulsed laser talbot interferometer // Sensors. 2020. V. 20. P. 4307. <https://doi.org/10.3390/s20154307>
 16. Konnov K.A., Varzhel S.V., Gribaev A.I., Cherepanov A.D., Doubenskaia M.A., Meshkovskiy I.K. Inscription of superimposed tilted fiber Bragg gratings // Optical and Quantum Electronics. 2020. V. 52. P. 169. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02291-y>
 17. Полещук А.Г., Кутанов А.А., Бессмелтьцев В.П., Корольков В. П., Шиманский Р.В., Малышев А.И., Маточкин А.Е., Голошевский Н.В., Макаров К.В., Макаров В.П., Снимщиков И.А., Сыдык уулу Н. Микроstructuring оптических поверхностей: технология и устройство прямой лазерной записи дифракционных структур // Автометрия. 2010. Т. 46. № 2. С. 86–96.
 18. Микерин С.Л., Угожаев В.Д. Перестраиваемый голографический интерферометр с неподвижными зеркалами на основе светоделительного кубика // Автометрия. 2012. Т. 48. № 4. С. 20–32.
 19. Угожаев В.Д. Перестраиваемый вращением двухлучевой интерферометр с неподвижным фоточувствительным элементом. Ч. I. Интерферометр на основе светоделительного кубика // Electronics. 2016. V. 46. № 1. P. 29–32. <https://doi.org/10.1070/QE2016v04n01ABEH015920>
 11. Klepp J., Pruner C., Tomita Y., Plonka-Spehr C., Geltenbort P., Ivanov S., Manzin G., Andersen K.H., Kohlbrecher J., Ellabban M.A., Fally M. Diffraction of slow neutrons by holographic SiO₂ nanoparticle-polymer composite gratings // Physical Review A. 2011. V. 84. № 1. P. 013621. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.84.013621>
 12. Smirnova T.N., Sakhno O.V., Yezhov P.V., Kokhtych L., Goldenberg L.M., Stumpe J. Amplified spontaneous emission in polymer-CdSe/ZnS-nanocrystal DFB structures produced by the holographic method // Nanotechnology. 2009. V. 20. № 25. P. 245707. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/20/24/245707>
 13. Mikhailov V., Elliott J., Wurtz G., Bayvel P., Zayats A.V. Dispersing light with surface plasmon polaritonic crystals // Physical Review Letters. 2007. V. 99. № 8. P. 083901. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.99.083901>
 14. Angervaks A.E., Van Bac D., Ivanov S.A., Okun R.A., Nikonorov N.V., Ryskin A.I., Gorokhovskii K.S., Granovskii V.A. A holographic prism based on photo-thermo-refractive glass: requirements and possibilities // Optics and Spectroscopy. 2017. V. 123. № 6. P. 970–976. <https://doi.org/10.1134/S0030400X17120025>
 15. Zhang Z., Xu B., He J., Hou M., Bao W., Wang Y. High-efficiency inscription of fiber Bragg grating array with high-energy nanosecond-pulsed laser talbot interferometer // Sensors. 2020. V. 20. P. 4307. <https://doi.org/10.3390/s20154307>
 16. Konnov K.A., Varzhel S.V., Gribaev A.I., Cherepanov A.D., Doubenskaia M.A., Meshkovskiy I.K. Inscription of superimposed tilted fiber Bragg gratings // Optical and Quantum Electronics. 2020. V. 52. P. 169. <https://doi.org/10.1007/s11082-020-02291-y>
 17. Poleshchuk, A.G., Kutanov, A.A., Bessmeltsev, V.P., Korolkov V.P., Shimanskii R.V., Malyshev A.I., Matochkin A.E., Goloshevskii N.V., Makarov K.V., Makarov V.P., Snimshchikov I.A., Sydyk Uulu N. Microstructuring of optical surfaces: Technology and device for direct laser writing of diffractive structures // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2010. V. 46. № 2. P. 171–180. <https://doi.org/10.3103/S8756699010020093>
 18. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. Reconfigurable holographic interferometer with fixed mirrors // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2012. V. 48. № 4. P. 341–350. <https://doi.org/10.3103/S8756699012040036>
 19. Ugozhaev V.D. Rotationally tunable two-beam interferometer with a fixed photosensitive element. Part I. Interferometer based on a beamsplitter

- Автометрия. 2016. Т. 52. № 2. С. 57–65. <https://doi.org/10.15372/AUT20160207>
20. 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. <https://doi.org/10.15593/2411-4367/2018.3.07>
21. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. A two-beam interferometer with the tuning of the interference pattern period by simulating its rotation // Precision Engineering. 2022. V. 78. P. 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.07.004>
- cube // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2016. V. 52. № 2. P. 153–160. <https://doi.org/10.3103/S8756699016020072>
20. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. Two-beam interferometer with a fixed photodetector tuned by a mobile mirror [in Russian] // Applied photonics. 2018. V. 5. № 3. P. 218–237. <https://doi.org/10.15593/2411-4367/2018.3.07>
21. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. A two-beam interferometer with the tuning of the interference pattern period by simulating its rotation // Precision Engineering. 2022. V. 78. P. 40–46. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2022.07.004>

АВТОРЫ

Сергей Львович Микерин — канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией, старший научный сотрудник, Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 55966899500, <http://orcid.org/0000-0001-5049-8570>, mikerin@iae.nsk.su

Владимир Дмитриевич Угожаев — ведущий инженер-конструктор, Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН, 630090, Новосибирск, Россия; Scopus ID: 6508105051, <http://orcid.org/0000-0003-3193-8037>, vdu@iae.nsk.su

Статья поступила в редакцию 08.11.2022
Одобрена после рецензирования 26.01.2023
Принята к печати 27.02.2023

AUTHORS

Sergey L. Mikerin — PhD in Physics and Mathematics, Lab Head, Senior Researcher, Institute of Automation and Electrometry of Siberian branch of RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 55966899500, <http://orcid.org/0000-0001-5049-8570>, mikerin@iae.nsk.su

Vladimir D. Ugozhaev — Leading Design Engineer, Institute of Automation and Electrometry of Siberian branch of RAS, 630090, Novosibirsk, Russia; Scopus ID: 6508105051, <http://orcid.org/0000-0003-3193-8037>, vdu@iae.nsk.su

*The article was submitted to the editorial office 08.11.2022
Approved after review 26.01.2023
Accepted for publication 27.02.2023*