

УДК 681.7.

С.Л. Микерин, В.Д. Угожаев

Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения РАН
(ИАиЭ СО РАН), Новосибирск, Россия

ДВУХЛУЧЕВОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР С НЕПОДВИЖНЫМ ФОТОПРИЕМНИКОМ, ПЕРЕСТРАИВАЕМЫЙ С ПОМОЩЬЮ ПОДВИЖНОГО ЗЕРКАЛА

Проведен анализ характеристик двухлучевого интерферометра с неподвижными зеркалами и фотоприемником с перестройкой периода записываемой интерференционной картины посредством механизма имитации вращения. Выведены формулы для расчета такого интерферометра, с применением которых рассчитана его конкретная конфигурация, положенная в основу действующего образца. Сообщается о создании двухканальной системы для записи двумерных периодических структур на базе пары разработанных интерферометров, работающих независимо друг от друга.

Ключевые слова: двухлучевой интерферометр, светоделительный кубик, неподвижные зеркала, неподвижный фотоприемник, интерференционная картина, голографическая решетка, вращательная перестройка периода, имитация вращения.

S.L. Mikerin, V.D. Ugozhaev

Institute of Automation and Electrometry of the Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences (IA&E SB RAS),
Novosibirsk, Russian Federation

TWO-BEAM INTERFEROMETER WITH A FIXED PHOTODETECTOR TUNED BY A MOBILE MIRROR

An analysis is made of the characteristics of a stationary two-beam interferometer with tuning the period of the recorded interference pattern by means of a rotation simulation mechanism. Formulae are derived for calculating such an interferometer, with the use of which its specific configuration, which is the basis of the acting sample, is calculated. It is reported on the creation of a two-channel system based on a pair of developed interferometers working independently of each other. The system is intended to record two-dimensional periodic structures.

Keywords: dual-beam interferometer, beam-splitting cube, fixed mirrors, fixed photodetector, interference pattern, holographic grating, period rotational rearrangement, rotation imitation.

Введение

Двухлучевые интерферометры со сходящимися световыми пучками широко применяются для создания высокоэффективных дифракционных структур: голографических решеток (ГР), фотонных кристаллов (ФК) с высоким оптическим качеством. Кроме того, специфические свойства таких структур (нелинейно-оптические, люминесцентные, лазерные) могут использоваться для создания управляемых светом нелинейных дифракционных элементов [1], дифракционных оптических элементов (ДОЭ) со сверхвысокой спектральной дисперсией [2], лазеров с распределенной обратной связью [3], в голографических защитных технологиях [4] и др.

Такие интерферометры чрезвычайно широко применяются для исследования регистрирующих сред на основе различных полимерных композиций. Так, фотополимеры, сенсibilизированные молекулами красителей, представляют большой интерес благодаря возможности регистрировать и восстанавливать голограммы в реальном времени с рекордно высокой разрешающей способностью и дифракционной эффективностью (ДЭ), что делает эти среды пригодными для создания устройств оптической памяти. В то же время вариации пространственной частоты ГР существенно влияют на процесс записи. Поэтому важным аспектом таких исследований является необходимость изменять период записываемых структур.

Например, для изучения спектрального разрешения в фотополимеризующихся композициях поливиниловый спирт (ПВС)/акриламид ГР регистрировались при разных углах между интерферирующими пучками в диапазоне $30\text{--}80^\circ$ (соответствующий интервал пространственной частоты $\Omega = 818\text{...}2032 \text{ мм}^{-1}$ – 5 позиций). Установлено, что максимальная ДЭ 75 % достигается при $\Omega = 1080 \text{ мм}^{-1}$ [5].

Фоточувствительные пленки на основе акрилатной композиции BMS (фирма Байер, Германия), исследованные в диапазоне пространственных частот $500 \leq \Omega \leq 3000 \text{ мм}^{-1}$ (6 позиций), показали более высокую светочувствительность, в три раза большее фотоиндуцированное изменение показателя преломления n_1 и более высокую разрешающую способность на высоких пространственных частотах по сравнению с ПВС/акриламидными композициями [6].

Для увеличения показателя преломления полимерной матрицы разрабатываются композиции, содержащие наночастицы различного типа. Механизм фотополимеризации состоит в перемещении наночастиц из облученных в необлученные участки ГР под действием градиента интенсивности света. В результате в толстых фазовых решетках можно получать высокую ДЭ – вплоть до 99 %. В работе [7] были использованы наночастицы Si размерами 10–20 нм. Угол между интерферирующими пучками 2α изменялся в диапазоне 1–15° (записывались тонкие ГР с $\Lambda = 2...50$ мкм). Создаваемая в процессе фотополимеризации модуляция показателя преломления обеспечивается за счет изменения концентрации наночастиц на 20 % между освещенными и темновыми участками ИК, при этом формировались нити из наночастиц толщиной приблизительно 1 мкм. Максимальная ДЭ около 10 % достигалась на длине волны $\lambda = 977$ нм.

Работы [8, 9] были направлены на создание фотополимеризующихся акрилатных композиций на основе двух мономеров и наночастиц SiO₂, TiO₂ и ZrO₂. В таких средах были получены ГР с периодом 0,38–2,1 мкм (12 позиций) и амплитудой модуляции показателя преломления $n_1 = 0,006...0,024$ при ДЭ до 80 %.

В фотополимеризующейся регистрирующей среде, содержащей наночастицы SiO₂ размером 13 нм, были изготовлены ГР, которые успешно использовались для исследования дифракции медленных нейтронов. Различные решетки, отличающиеся, в частности, периодом $\Lambda = 0,5$ или 1 мкм, были испытаны на длинах волн нейтронов в диапазоне от 1,7 до 3,76 нм. Благодаря наклону решеток определенной толщины вокруг оси, параллельной вектору решетки, удалось увеличить отражательную способность нейтронов с длиной волны 3,76 нм до 83 % [10].

Вместе с тем фотополимерные среды имеют низкую светочувствительность, им свойственна также усадка толщины материала, искажающая голограммы; последнее обстоятельство особенно важно при изготовлении ДОЭ. Эти недостатки удаётся в значительной степени устранить, используя светочувствительные полимеры, в которых регистрация голограмм осуществляется за счет введения в твердую полимерную матрицу, например ПММА, светочувствительных соединений, испытывающих фотохимические превращения и химически связывающихся с полимерными молекулами. Эти среды усиливают записы-

ваемую голограмму за счет диффузии непрореагировавших молекул и обеспечивают фотохимическую фиксацию голограмм. Например, в полимерных средах, содержащих фенантренхинон (ФХ), можно записывать высокостабильные дифракционные и волноводные структуры с почти 100%-ной эффективностью, используя излучение в видимом диапазоне.

В однородной смеси поливинилбутираля (ПВБ) со светочувствительной смесью ПХ-ПММА впервые была проведена серия экспериментов по регистрации ГР с разными периодами (от 0,5 до 4 мкм). В слое такой смеси с оптимальным соотношением компонентов ПММА и ПВБ была достигнута максимальная ДЭ 14 % при $\Lambda = 3$ мкм. Была также продемонстрирована временная устойчивость решеток [11].

При замене ПХ дифторидом антрацилацетоборана, который при облучении испытывает фотохимическую димеризацию, строились частотно-контрастные характеристики $n_1(\Omega)$, измеренные сразу после записи набора ГР с различными пространственными частотами: $\Omega = 5 \dots 4000 \text{ мм}^{-1}$ (13 позиций). Благодаря оптимальной термической обработке образцов ДЭ низкочастотных ГР возростала с 8 до 70 % [12].

В статье [13] исследован экзотический голографический светочувствительный материал, содержащий примесь ферментированного кактуса опунция – недорогого и нетоксичного красителя. В этом материале регистрировались пропускающие ГР с ДЭ до 32 %. Измерения проводились в 11 положениях интерферирующих пучков, соответствующих пространственным частотам в интервале 650–1675 мм^{-1} .

Общим для данных работ [5–13] является использование традиционной схемы двухлучевого интерферометра, включающего в себя светоделительный кубик (СДК) и два зеркала, направляющих пучки к месту интерференции на исследуемом образце. Перестройка угла схождения интерферирующих пучков в таком интерферометре, повторяемая многократно в процессе исследования, достаточно трудоемка и включает в себя, во-первых, взаимно независимую юстировку каждого из двух зеркал, во-вторых, измерительные работы, направленные на выравнивание оптических длин этих пучков, в-третьих, совмещение образца с новой ИК. В результате перестройка носит, как правило, дискретный нерегулярный характер. Еще более трудоемкой оказывается настройка качественной ИК, если требуется записать многомерную периодическую структуру. Например, в работе [14] представлено изго-

товление двумерного ФК с периодами 7,88 и 8,2 мкм и глубиной рельефа 2,0 и 2,4 мкм соответственно в акриловой фотополимеризующейся среде, содержащей наночастицы SiO_2 и Au. Исходный пучок света диаметром около 80 мм равномерно освещал четырехзеркальную систему. Все зеркала устанавливались на общем двухкоординатном микрометрическом устройстве перемещения, и каждое из четырех зеркал прикреплялось к отдельному микрометрическому транслятору. Таким образом, имелись четыре независимо управляемых пучка диаметром 10 мм (по размерам зеркал), совмещающихся на образце. Настройка проводилась методом непрерывных приближений с целью достижения минимальной разности хода интерферирующих пучков. По-видимому, угловые положения зеркал были выставлены заранее, что увеличивало объем юстировочных работ. Интерференционная картина (ИК) контролировалась с помощью оптического микроскопа; процесс завершился, если наблюдалась качественная периодическая структура.

Предложенная и исследованная в работах [15–18] концепция вращательной перестройки периода ИК в двухлучевых интерферометрах позволяет исключить юстировочные и измерительные работы при переходе от одного периода к другому. Это достигается тем, что, во-первых, зеркала устанавливаются неподвижно относительно светоделительного элемента. Во-вторых, вращение интерферометра совместно с образцом вокруг оси, перпендикулярной плоскости интерферирующих пучков, сопровождается изменением угла падения исходного светового пучка на входную поверхность светоделительного элемента, что, в свою очередь, приводит к изменению угла схождения 2α интерферирующих пучков и самого периода ИК: $\Lambda = \lambda/2\sin\alpha$ (λ – длина волны излучения). В-третьих, придание интерферометру зеркальной симметрии относительно делительного зеркала, встроенного в светоделительный элемент, обеспечивает нулевую разность хода интерферирующих пучков по их осям при любом угле схождения. В итоге реализуется непрерывная широкодиапазонная перестройка периода.

Дальнейшее развитие данной концепции, состоящее в стабилизации положения ИК относительно светоделительного элемента, осуществлено в работах [19–22]. Такая стабилизация достигается благодаря должному выбору положения оси вращения и позволяет зафиксировать положение светочувствительного образца. В результате интерферометр вместе с образцом представляют собой механически жесткую оп-

тическую систему, обладающую высокой виброустойчивостью. Весь процесс перестройки периода ИК сводится к установке требуемого значения на каком-либо отсчетном устройстве. В таком интерферометре можно быстро и точно записывать ГР с любым значением периода в пределах допустимого диапазона. Вместе с тем при записи многомерных структур типа ФК весьма затруднительно объединить несколько интерферометров в единую систему, поскольку интерферометры должны быть неподвижными относительно друг друга.

Настоящая работа представляет характеристики интерферометра, в который встроен механизм имитации вращения, позволяющий перестраивать период при взаимно неподвижных интерферометре, фоточувствительном образце и источнике излучения, что сделало возможным совмещать на одном образце несколько независимо варьируемых ИК. Целью работы является нахождение соотношения параметров исходного светового пучка на входе в СДК, обеспечивающего стабилизацию положения ИК вблизи фоточувствительного образца в пределах допустимого диапазона перестройки, вывод формул, описывающих характеристики имитационного механизма, а также расчет перестроенных характеристик конкретной конфигурации анализируемого интерферометра.

1. Анализ интерферометра с имитацией вращения

На рис. 1 показана схема исследуемого двухлучевого интерферометра, световые пучки на ней отображаются их осевыми лучами. Интерферометр включает в себя светоделительный элемент 1 в виде СДК со встроенным в него делительным зеркалом 2 (диагональная поверхность C_1C_3) и два неподвижных относительно СДК зеркала 3.1 и 3.2. Зеркала расположены симметрично к делительному зеркалу 2 на расстоянии H друг от друга, отсчитываемого в плоскости ребер C_2C_4 , и наклонены к плоскости этого зеркала (далее плоскость симметрии) под углом ξ (на рис. 1 $\xi > 0$). Фотоприемник 4 также закреплен неподвижно и ориентирован для записи симметричных пропускающих ГР. Имитация вращения осуществляется через подвижное зеркало 5 (другая возможная реализация этого метода будет рассмотрена ниже). Подвижное зеркало оснащено осью вращения Z , лежащей в его плоскости отражения и параллельной ребрам C_1C_4 , она удалена на расстояние T от поверхности C_1C_4 (далее входная поверхность).

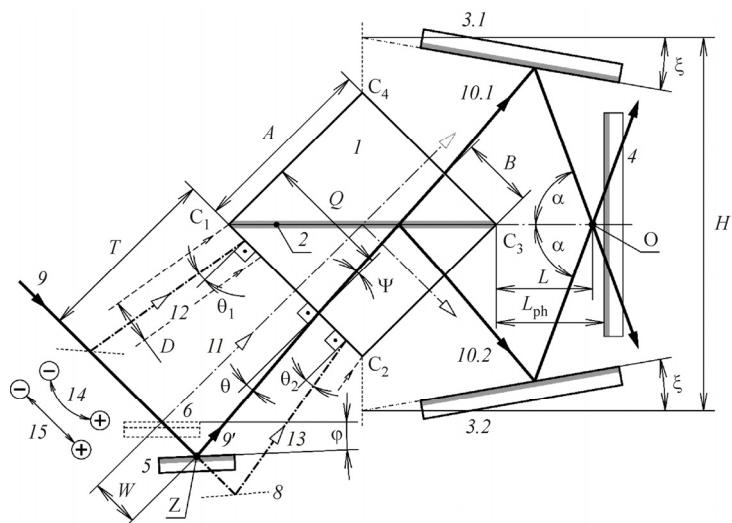


Рис. 1. Оптическая схема двухлучевого интерферометра с имитацией вращения

Коллимированный исходный световой пучок 9 диаметром D ориентируется параллельно входной поверхности так, чтобы его осевой луч пересекался с осью вращения Z поворотного зеркала 5. Отраженный от него пучок $9'$ падает на входную поверхность под углом θ в плоскости, перпендикулярной ребрам C_1 – C_4 , на расстоянии Q от края C_1 делительного зеркала и входит в СДК под углом преломления ψ (на рис. 1 углы θ и ψ положительны). Далее этот пучок расщепляется делительным зеркалом 2 на два парциальных пучка 10.1 и 10.2, которые покидают СДК через выходные поверхности C_3C_4 и C_2C_3 на расстоянии B от края C_3 делительного зеркала и отражаются неподвижными зеркалами 3.1 и 3.2 соответственно по направлению друг к другу под углом схождения 2α . В области взаимного перекрытия парциальных пучков формируется периодическая ИК, точка O пересечения их осей лежит в плоскости симметрии на расстоянии L от края C_3 делительного зеркала (далее длина схождения). Благодаря зеркальной симметрии системы парциальных пучков разность хода по их осям равна нулю, а точка O является центром симметрии самой ИК и характеризуется нулевым порядком интерференции. Вблизи нее на расстоянии L_{ph} от ребра C_3 располагается светочувствительная поверхность фотоприемника 4; $L_{ph} \approx L$, однако в общем случае $L_{ph} \neq L$.

В процессе перестройки угла схождения подвижное зеркало 5 совершает два взаимно согласованных перемещения: угловое, измеряе-

мое углом поворота φ , и линейное, определяемое смещением W и направленное по ходу исходного пучка $\mathcal{9}$ (знаки этих величин показаны у соответствующих стрелок 14 и 15). Оба эти параметра – φ и W – отсчитываются от начального положения 6 поворотного зеркала, в котором $\varphi = \varphi_0 = 0$ и $W = W_0 = 0$. Начальный пучок 11 направлен в центр входной поверхности, где $Q = Q_0 = A/2$. Подвижное зеркало может перемещаться в промежутке между первым крайним положением 7 , определяемым нижними значениями параметров $\varphi = \varphi_1$ и $W = W_1$, и вторым крайним положением 8 с верхними значениями параметров $\varphi = \varphi_2$ и $W = W_2$. Соответствующие крайние (далее граничные) положения 12 и 13 исходного пучка, отраженного от поворотного зеркала в положениях 7 и 8 , обусловлены его касанием краев C_1 и C_2 входной поверхности СДК. Положения 12 и 13 характеризуются нижними θ_1 , Q_1 и верхними θ_2 , Q_2 граничными значениями параметров θ и Q .

Из соображений общности все линейные параметры интерферометра: $H, D, T, Q, Q_0, Q_1, Q_2, B, L, L_{ph}, W, W_1, W_2$ представлены в единицах длины ребра A : $h, d, t, q, q_0, q_1, q_2, b, l, l_{ph}, w, w_1, w_2$ соответственно; в этой системе измерений $A = 1$. Все формулы выведены с учетом правила присвоения знаков, изложенного выше.

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

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

Взаимозависимость позиции q оси исходного пучка $\mathcal{9}$ на входе в СДК и позиций b осей парциальных пучков 10.1 и 10.2 на выходе из него определяется формулой:

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

где

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

и n – показатель преломления материала, из которого изготовлен СДК. Длина схождения l в общем случае выражается следующим образом:

$$l = \frac{(h \cos \xi - \sqrt{2} \sin \xi) [\cos(\theta + \xi) - \sin(\theta + \xi)] - \sqrt{2} b \cos \theta}{\sin(\theta + 2\xi) + \cos(\theta + 2\xi)}. \quad (4)$$

Из формулы (4) с использованием (2) можно получить соотношение взаимного согласования входных параметров θ и q исходного пучка

ка, которое нужно поддерживать в процессе перестройки периода ИК, чтобы обеспечить ее стабильное положение при изменении угла схождения парциальных пучков, для чего нужно выполнить условие $l = \text{const}$:

$$q = 1 + \text{tg } \psi + \left\{ l \left[\sin(\theta + 2\xi) + \cos(\theta + 2\xi) \right] - \left(h \cos \xi - \sqrt{2} \sin \xi \right) \left[\cos(\theta + \xi) - \sin(\theta + \xi) \right] \right\} / \sqrt{2} \cos \theta. \quad (5)$$

На рис. 2 показано отклонение $\delta q = q(\theta) - q_{\text{lin}}(\theta)$ функции $q(\theta)$, рассчитанной по формуле (5), от линейной зависимости $q_{\text{lin}}(\theta)$:

$$q_{\text{lin}} = q_{\text{min}} + \frac{(q_{\text{max}} - q_{\text{min}})}{(\theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}})} (\theta - \theta_{\text{min}}), \quad (6)$$

привязанной к крайним точкам $q_{\text{min}} = 0$ и $q_{\text{max}} = 1$ функции $q(\theta)$ по условию лучевого касания краев входной поверхности (т.е., когда диаметр пучка $d \rightarrow 0$). При подстановке значений q_{min} и q_{max} формула (6) упрощается к виду:

$$q_{\text{lin}} = (\theta - \theta_{\text{min}}) / \Delta\theta_{\text{lin}}, \quad (7)$$

где $\Delta\theta_{\text{lin}} = \theta_{\text{max}} - \theta_{\text{min}}$. При расчете были приняты значения $h = 1,456$; $\xi = -15^\circ$ и $l = 4$, которые будут использоваться ниже. Крайние значения

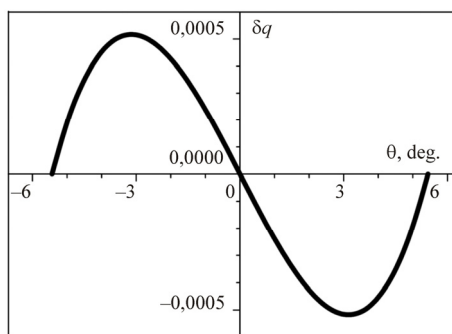


Рис. 2. Зависимость $\delta q(\theta)$

угла падения θ_{min} и θ_{max} находились численным решением уравнений, получающихся из (5) путем подстановки $q = 0$ и 1 соответственно. Видно, что отклонения $q(\theta)$ от прямой линии малы и по абсолютному значению не превышают 0,05 % от длины ребра A . Последнее обстоятельство указывает на возможность реализации с высокой точностью требуемого соотношения согласования (5), используя механизм имитации

вращения, обеспечивающий близкую к линейной связь параметров углового φ и линейного W перемещений подвижного зеркала.

Точный закон линейного перемещения выглядит следующим образом:

$$w = w_0 + q - q_0 + t \operatorname{tg}(\theta - \theta_0), \quad (8)$$

где w и q – текущие значения положения оси вращения Z и позиции исходного пучка \mathcal{S}' на входной поверхности СДК, соответствующие значению угла падения θ в процессе его изменения; w_0 , q_0 и θ_0 – соответствующие значения параметров начального положения исходного пучка. С учетом принятых значений этих параметров $q_0 = 1/2$, $w_0 = 0$ и $\theta_0 = 0$ закон (8) приобретает вид:

$$w = q + t \operatorname{tg} \theta - 1/2. \quad (9)$$

Поскольку функции $q(\theta)$ и $\operatorname{tg} \theta$, входящие в (9), нелинейны, то и сама зависимость $w(\theta)$ нелинейна. Ее строгое исполнение возможно при программном управлении механизмом имитации вращения. Однако если угол падения мал ($\theta \ll 1$), закон (9) оказывается близким к линейному благодаря тому, что обе указанные выше зависимости почти линейны. Действительно, если угол θ мал, то $\theta_{\max} \cong -\theta_{\min} \cong \Delta\theta_{\text{lin}}/2$, что подтверждается расчетом, и первую функцию можно выразить из (7) следующим образом:

$$q_{\text{lin}} \approx \frac{1}{2} + \frac{\theta}{\Delta\theta_{\text{lin}}}, \quad (10)$$

а вторую так:

$$\operatorname{tg} \theta \approx \theta. \quad (11)$$

При подстановке (10) и (11) в (9) можно получить линеаризованную форму закона движения подвижного зеркала в лучевом представлении:

$$w = \theta(t + 1/\Delta\theta_{\text{lin}}). \quad (12)$$

Для исходного пучка \mathcal{S}' диаметром d граничные значения θ_1 , q_1 и θ_2 , q_2 (см. рис. 1) связаны между собой формулами:

$$q_1 = d/2 \cos \theta_1, \quad (13)$$

и

$$q_2 = 1 - d/2 \cos \theta_2, \quad (14)$$

причем граничные значения угла падения θ_1 и θ_2 находятся аналогично крайним значениям θ_{\min} и θ_{\max} путем численного решения уравнений,

получающихся из (5) подстановкой $q = q_1$ и $q = q_2$ согласно (13) и (14) при $\theta = \theta_1$ и θ_2 соответственно. Длина схождения l находится по формуле (4) для начального положения l_1 . В этом случае линейаризация зависимости $q(\theta)$ получается из формулы (6) заменой индексов \min и \max на 1 и 2 соответственно:

$$q = q_1 + \frac{(q_2 - q_1)}{(\theta_2 - \theta_1)}(\theta - \theta_1). \quad (15)$$

Граничным значениям угла падения θ_1 и θ_2 соответствуют граничные значения половинного угла схождения α_1 и α_2 , получаемые из формулы (1), согласно которой разность в знаменателе формулы (15)

$$\theta_2 - \theta_1 = \Delta\alpha, \quad (16)$$

где $\Delta\alpha$ – интервал изменения половинного угла схождения, $\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1$, определяющий диапазон перестройки периода ИК. Учитывая (16), а также малость граничных значений угла падения θ_1 , θ_2 и приблизительное равенство их абсолютных величин: $\theta_1 \approx \theta_2 \approx \Delta\alpha/2$, можно получить приближенное выражение для $q(\theta)$:

$$q = \frac{1}{2} + \frac{(1-d)\theta}{\Delta\alpha}. \quad (17)$$

Наконец, подстановкой (11) и (17) в (9) выводится линейаризованная форма закона движения исходного пучка диаметром d :

$$w = \left(t + \frac{1-d}{\Delta\alpha} \right) \theta. \quad (18)$$

Из формулы (18) определяются граничные положения w_1 и w_2 оси вращения Z подвижного зеркала:

$$w_{1,2} = \left(t + \frac{1-d}{\Delta\alpha} \right) \theta_{1,2}, \quad (19)$$

разность которых $w_2 - w_1$ задает длину дистанции, в пределах которой совершается перемещение этой оси:

$$w_\Sigma = w_2 - w_1 = 1 + t\Delta\alpha - d, \quad (20)$$

что задает короткую формулу линейаризованного закона движения:

$$w = w_{\Sigma} \theta / \Delta \alpha. \quad (21)$$

2. Анализ механизма, имитирующего вращение

Предыдущий анализ показал, что, по крайней мере, для малых углов падения θ можно использовать механизм, в котором выполняется линейная или близкая к линейной взаимозависимость линейного w и углового φ перемещений подвижного зеркала. На рис. 3 представлена схема конструктивно простого и компактного рычажного механизма. Возможны два варианта его реализации. На рис. 1 и 3 исполнительным элементом является подвижное зеркало, при этом источник исходного пучка δ (см. рис. 3) неподвижен. Во втором варианте подвижное зеркало заменяется самим источником, что удобно в случае его малых габаритов (на схемах такой вариант не показан).

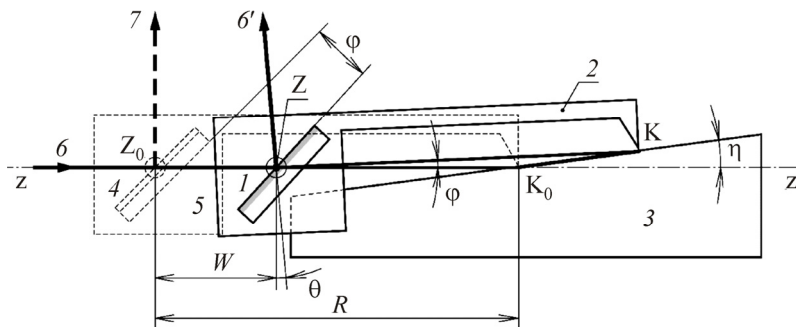


Рис. 3. Схема механизма, имитирующего вращение

В первом варианте подвижное зеркало 1 жестко крепится на рычаге 2 с длиной плеча R , который имеет возможность вращаться вокруг оси Z . В случае изображенного на рис. 3 точечного контакта опорная точка K рычага посредством какого-либо упругого элемента плотно соприкасается с направляющей поверхностью 3 , наклоненной под углом η к базовой оси $z-z$. Вдоль этой оси ориентируется исходный пучок δ , который перенаправляется подвижным зеркалом к входной поверхности СДК как пучок δ' . Вдоль $z-z$ также выполняется линейное перемещение рычага совместно с подвижным зеркалом, которое сопровождается угловым перемещением φ благодаря скольжению края K по наклонной поверхности.

В начальном положении 5 опорная точка рычага занимает позицию K_0 , а пучок 7 , отраженный от подвижного зеркала в его начальном

положении 4, является начальным пучком с параметрами $q_0 = 1/2$ и $\theta_0 = 0$. Когда рычаг претерпевает смещение W относительно своего начального положения, его опорный край перемещается в позицию К, а сам рычаг совершает угловое перемещение φ . В результате исходный пучок b' поворачивается на угол θ . Согласно закону отражения

$$\delta\theta = 2\delta\varphi, \quad (22)$$

и с учетом начального значения $\varphi_0 = 0$ из (22) выводится формула, связывающая угловое перемещение исходного пучка на входе в интерферометр и кинематику исследуемого механизма:

$$\theta = 2\varphi. \quad (23)$$

Из треугольника ZK_0K , в котором: ZK – плечо рычага R и ZK_0 – разность $R-W$:

$$w = r \left(\frac{\sin \varphi}{\operatorname{tg} \eta} + 1 - \cos \varphi \right), \quad (24)$$

где $w = W/A$ и $r = R/A$. В приближении малых углов φ и η формула (24) упрощается до линейной зависимости $w(\varphi)$ для рычажного механизма с точечным контактом:

$$\varphi = w\eta/r. \quad (25)$$

Совместное угловое перемещение подвижного зеркала и рычага при их линейном перемещении в пределах дистанции w_Σ совершается в интервале:

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = w_\Sigma\eta/r, \quad (26)$$

где φ_1, φ_2 – крайние значения угла поворота рычага, соответствующие граничным значениям угла падения θ_1, θ_2 .

Формула (26) задает соотношение геометрических параметров рычажного механизма с точечным контактом, которое в развернутом виде имеет вид:

$$r = (1 - d + t\Delta\alpha) \frac{\eta}{\Delta\varphi}. \quad (27)$$

Используя (23), чтобы получить соотношение угловых интервалов $\Delta\varphi = \Delta\alpha/2$, можно преобразовать (27) применительно к рассматри-

ваемому выше варианту механизма имитации вращения с подвижным зеркалом:

$$r_m = 2 \left(t + \frac{1-d}{\Delta\alpha} \right) \eta. \quad (28)$$

В формуле (28) индекс m (от слова *mirror*) означает ее привязку к подвижному зеркалу.

Во втором варианте исполнения исследуемого механизма источник исходного пучка крепится к рычагу вместо подвижного зеркала и ориентируется так, чтобы ось исходного пучка пересекалась с осью вращения Z , а сам исходный пучок занимал положение начального пучка в начальном положении 4 рычага (рис. 3). Тогда

$$\theta = \varphi, \quad (29)$$

если начальное значение угла поворота рычага, как и в предыдущем варианте, $\varphi_0 = 0$. В результате формула (27) с учетом (29) приобретает вид соотношения геометрических параметров механизма имитации вращения по второму варианту с движущимся источником исходного пучка:

$$r_b = \left(t + \frac{1-d}{\Delta\alpha} \right) \eta. \quad (30)$$

Индекс b (от слова *beam*) означает привязку выражения (30) к движущемуся источнику исходного пучка. Сопоставляя (28) и (30), можно видеть, что

$$r_b = r_m / 2. \quad (31)$$

Таким образом, при прочих равных условиях механизм с движущимся источником требует вдвое меньшее плечо рычага и, следовательно, может быть более компактным по сравнению с механизмом, использующим подвижное зеркало. Окончательный выбор геометрических параметров производится на основе конструктивных соображений.

Поскольку от взаимного положения светочувствительной поверхности фотоприемника с ИК зависит ее видность (другим словом, контраст), вариации длины схождения в процессе вращательной перестройки удобно привязать к размерам ИК. На рис. 4 (в нем обозначения элементов и размеров заимствованы из рис. 1) область перекрытия

парциальных пучков 10.1 и 10.2, в которой формируется ИК, выделена рамкой. Ее центр симметрии O смещен от светочувствительной поверхности фотоприемника 4 на расстояние $\delta L = L - L_{ph}$. В принятых относительных единицах

$$\delta l = l - l_{ph}. \quad (32)$$

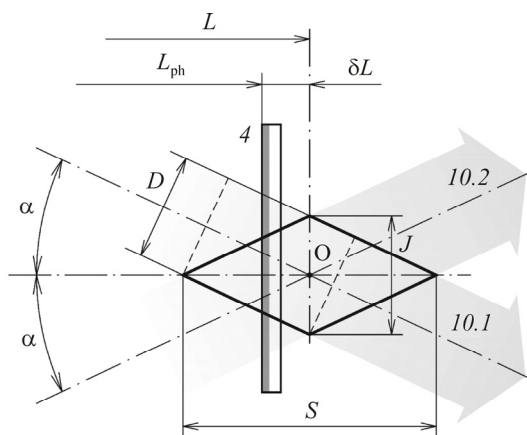


Рис. 4. Интерференционная картина

Длина ИК вдоль плоскости симметрии $s = S/A$ задается диаметром парциальных пучков и их углом схождения:

$$s = d/\sin \alpha. \quad (33)$$

Если смещение $\delta l = s/2$, то ИК полностью уходит с фотоприемника, поэтому целесообразно сопоставлять величину смещения с половиной продольной длины ИК. Исходя из этого условия, вводится коэффициент смещения k_s , получаемый комбинацией формул (32) и (33):

$$k_s = (2\delta l \sin \alpha)/d. \quad (34)$$

С одной стороны, очевидно, что запись периодической структуры возможна при выполнении неравенства $|k_s| \leq 1$. С другой стороны, качественная высококонтрастная ИК реализуется при выполнении условия $|k_s| \ll 1$.

3. Обсуждение результатов

В качестве примера приведены результаты расчета характеристик исследуемого интерферометра, построенного на основе СДК с длиной

ребра $A = 20$ мм, неподвижные зеркала которого наклонены под углом $\xi = -15^\circ$. Фотоприемник установлен на расстоянии от СДК $L_{ph} = 80$ мм, равном длине схождения L_0 в начальном положении исходного пучка. Расстояние между зеркалами $H = 29,1$ мм однозначно определяется по выбранному значению L_0 . В этом положении половинный угол схождения $\alpha_0 = 15^\circ$. Базовая ось z - z механизма имитации вращения удалена от входной поверхности СДК на расстояние $T = 35$ мм, чем задается требуемая дистанция линейного перемещения подвижного зеркала $W_\Sigma = 19,83$ мм при диаметре пучка $D = 5$ мм. Плечо рычага имеет длину $R = 40$ мм, если угол наклона направляющей поверхности $\eta = 8^\circ$. Для расчета вариаций длины схождения в процессе перестройки периода ИК с помощью механизма имитации вращения использовалась формула (4). Учет действия механизма осуществлялся через параметр $B = bA$, а параметр b , в свою очередь, вычислялся путем комбинирования формул (2) и (17).

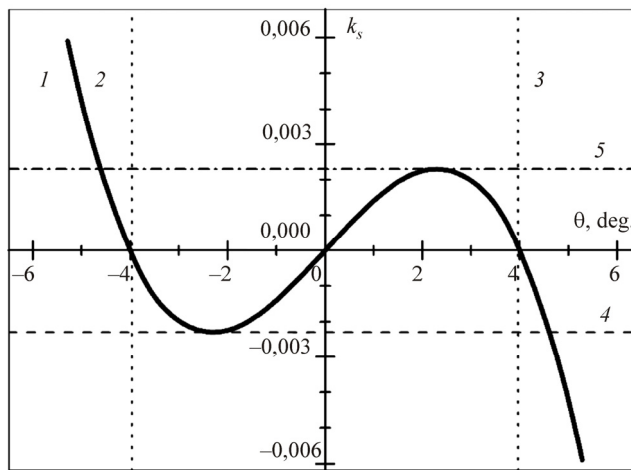


Рис. 5. Зависимость коэффициента смещения k_s от угла падения θ :
 кривая 1 – $k_s(\theta)$; 2 – метка $\theta_1 = -3,96^\circ$; 3 – метка $\theta_2 = 3,96^\circ$;
 4 – уровень $k_s = -0,0023$ и 5 – уровень $k_s = 0,0023$

На рис. 5 отображена зависимость коэффициента смещения k_s от угла падения θ исходного пучка 2 на входную поверхность СДК. На нем отмечено, что угол падения изменяется в интервале от $-3,96^\circ$ до $3,96^\circ$. Соответствующие интервал изменения половинного угла схождения $-11,04^\circ - 18,96^\circ$, и ширина этого интервала $\Delta\alpha = 7,92^\circ$. В результате относительный диапазон перестройки пространственной частоты

$\Omega = \Lambda^{-1}$ составляет величину $\Omega_2/\Omega_1 = 1,7$. При столь широком диапазоне перестройки коэффициент смещения k_s достаточно мал и заключается в интервале от $-0,0023$ до $0,0023$. Это означает, что смещение δL не выходит за пределы отрезка, ограниченного значениями $-0,15 - 0,15$ мм для выбранного размера СДК. Столь малые смещения практически не влияют на контраст интерференционной картины.

Заключение

В работе проведен анализ двухлучевого интерферометра на базе светоделительного кубика с неподвижными зеркалами и неподвижным фотоприемником, в котором осуществляется перестройка периода формируемой в нем ИК посредством механизма имитации вращательного движения. При этом ИК с высокой точностью позиционируется на фотоприемнике, обеспечивая ее высокий контраст во всем диапазоне перестройки. Изложенное означает, что в процессе перестройки интерферометр остается неподвижным относительно основания, на котором он размещается, чем обеспечивается возможность объединять несколько независимо перестраиваемых интерферометров в систему для одноэкспозиционной записи многомерных периодических структур произвольной конфигурации. Имитация вращения с помощью подвижного зеркала позволяет использовать один источник записывающего излучения для всех интерферометров, входящих в систему. Это может иметь существенное значение, если используется громоздкий и дорогой источник. При наличии компактных генераторов излучения, возможно, удобнее использовать имитацию вращения с подвижным источником.

На основе данного анализа был разработан и создан перестраиваемый интерферометр с имитацией вращения посредством подвижного зеркала, характеристики которого представлены в подразделе 3. Создана также двухканальная система, объединяющая два идентичных интерферометра. Система предназначена для записи прямоугольных двумерных структур в жидких и гелеобразных фотополимеризующихся средах с взаимно независимой перестройкой периода в каждом измерении.

Работа выполнена в рамках проекта «И.10.2.1. Фотоника микро- и наноструктурированных сред», № 0319–2016–0001 (№ гос. регистрации АААА–А17–117060810014–9).

Список литературы

1. Smirnova T.N., Sakhno O.V., Bezrodnyi V.I., Stumpe J.J. // *Appl. Phys. B.* – 2005. – 80. – 947.
2. Mikhailov V., Elliott J., Wurtz G., Bayvel P., Zayats A.V. // *Phys. Rev. Lett.* – 2007. – 99. – 083901.
3. Smirnova T.N., Sakhno O.V., Yezhov P.V., Kokhtych L., Goldenberg L. M., Stumpe J. // *Nanotechnology.* – 2009. – 20. – 245707.
4. Sakhno O.V., Smirnova T.N., Goldenberg L.M., Stumpe J. // *Mater. Sci. Engin. C.* – 2008. – 28. – 28.
5. Nimmi K.P., Pramitha V., Sreekumar K., Kartha C.S., Joseph R.J. // *Appl. Polym. Sci.* – 2012. – 125. – 1238.
6. Gleeson M.R., Sheridan J.T., Bruder F.-K., Rölle T., Berneth H., Weiser M.-S., Fäcke T. // *Opt. Express.* – 2011. – 19. – 26325.
7. Назаров М.М., Хайдуков К.В., Соколов В.И., Хайдуков Е.В. // *Квантовая электроника.* – 2016. – 46. – 29.
8. Смирнова Т.Н., Кохтич Л.М., Сахно О.В., Штумпе И. // *Оптика и спектроскопия.* – 2011. – 110. – 135.
9. Смирнова Т.Н., Кохтич Л.М., Сахно О.В., Штумпе И. // *Оптика и спектроскопия.* – 2011. – 110. – 143.
10. Klepp J., Pruner C., Tomita Y., Plonka-Spehr C., Geltenbort P., Ivanov S., Manzin G., Andersen K.H., Kohlbrecher J., Ellabban M.A., Faluy M. // *Phys. Rev. A* 84. – 2011. – 013621-1.
11. Matusевич V., Tolstik E., Kowarschik R., Egorova E., Matusевич Yu.I., Krul L. // *Opt. Comm.* – 2013. – 295. – 79.
12. Zhizhchenko A.Yu., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N. // *Opt. Mater.* – 2015. – 46. – 265.
13. Olivares-Pérez A., Toxqui-López S., Padilla-Velasco A.L. // *Materials.* – 2012. – 5. – 2383.
14. Zhuk D.I., Burunkova J.A., Denisyuk I.Y u., Miroshnichenko G.P., Csarnovics I., Toth D., Bonyar A., Veres M., Kokenyesi S. // *Polymer.* – 2017. – 112. – 136.
15. Микерин С.Л., Угожаев В.Д. // *Оптика и спектроскопия.* – 2011. – 111. – 1019.
16. Микерин С.Л., Угожаев В.Д. // *Автометрия.* – 2012. – 48. – 20.
17. Микерин С.Л., Угожаев В.Д. // *Автометрия.* – 2014. – 50. – № 2. – С. 110.

18. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. // *Interferometers: Fundamentals, Methods and Applications* / K. Harmon Eds. – Hauppauge, New York: Nova Science Publishers, 2015. – P. 173–210.
19. Угожаев В.Д. // *Автометрия*. – 2016. – 52. – 57.
20. Угожаев В.Д. // *Автометрия*. – 2016. – 52. – 118.
21. Двухлучевой интерферометр: пат. Рос. Федерация / В.Д. Угожаев // *Изобретения. Полезные модели на изобретение № 2626062*. 2017. – № 21.
22. Угожаев В.Д. // *Автометрия*. – 2018. – 54. – 67.

References

1. Smirnova T.N., Sakhno O.V., Bezrodnyi V.I., Stumpe J.J. *Appl. Phys. B*, 2005, 80, 947.
2. Mikhailov V., Elliott J., Wurtz G., Bayvel P., Zayats A.V. *Phys. Rev. Lett.*, 2007, 99, 083901.
3. Smirnova T.N., Sakhno O.V., Yezhov P.V., Kokhtych L., Goldenberg L.M., Stumpe J. *Nanotechnology*, 2009, 20, 245707.
4. Sakhno O.V., Smirnova T.N., Goldenberg L.M., Stumpe J. *Mater. Sci. Engin. C.*, 2008, 28, 28.
5. Nimmi K.P., Pramitha V., Sreekumar K., Kartha C.S., Joseph R.J. *Appl. Polym. Sci.*, 2012, 125, 1238.
6. Gleeson M.R., Sheridan J.T., Bruder F.-K., Rölle T., Berneth H., Weiser M.-S., Fäcke T. *Opt. Express*, 2011, 19, 26325.
7. Nazarov M.M., Khaydukov K.V., Sokolov V.I., Khaydukov E.V. *Kvantovaya elektronika*, 2016, 46, 29.
8. Smirnova T.N., Kokhtich L.M., Sakhno O.V., Shtumpe I. *Optika i spektroskopiya*, 2011, 110, 135.
9. Smirnova T.N., Kokhtich L.M., Sakhno O.V., Shtumpe I. *Optika i spektroskopiya*, 2011, 110, 143.
10. 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. *Phys. Rev. A*, 2011, 84, 013621-1.
11. Matusevich V., Tolstik E., Kowarschik R., Egorova E., Matusevich Yu.I., Krul L. *Opt. Comm.*, 2013, 295, 79.
12. Zhizhchenko A.Yu., Vitrik O.B., Kulchin Yu.N. *Opt. Mater.*, 2015, 46, 265.

13. Olivares-Pérez A., Toxqui-López S., Padilla-Velasco A.L. *Materials*, 2012, 5, 2383.
14. Zhuk D.I., Burunkova J.A., Denisyuk I.Yu., Miroshnichenko G.P., Csarnovics I., Toth D., Bonyar A., Veres M., Kokenyesi S. *Polymer*, 2017, 112, 136.
15. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. *Optika i spektroskopiya*, 2011, 111, 1019.
16. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. *Avtometriya*, 2012, 48, 20.
17. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. *Avtometriya*, 2014, 50, no. 2, pp. 110.
18. Mikerin S.L., Ugozhaev V.D. *Interferometers: fundamentals, methods and applications*. Ed. K. Harmon. Hauppauge, New York, Nova Science Publishers, 2015, pp. 173-210.
19. Ugozhaev V.D. *Avtometriya*, 2016, 52, 57.
20. Ugozhaev V.D. *Avtometriya*, 2016, 52, 118.
21. Ugozhaev V.D. Dvukhluchevoy interferometr [Two-beam interferometer]. Patent Russian Federation no. 2626062. *Izobreteniya. Poleznye modeli*, 2017, no. 21.
22. Ugozhaev V.D. *Avtometriya*, 2018, 54, 67.

Получено 23.09.2018