

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ В БИОЛОГИИ И МЕДИЦИНЕ

УДК 535.8

РАСЧЕТ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГОЛОГРАФИЧЕСКОГО МОДУЛЯ НА ОСНОВЕ ДВУХЛИНЗОВОГО ИНТЕРФЕРОМЕТРА ОБЩЕГО ПУТИ¹

© 2021 г. В. И. Батшев^{a, b, *}, А. Г. Власова^a, О. В. Польшикова^a,
А. С. Мачихин^a, В. Э. Пожар^{a, b}

^a Научно-технологический центр уникального приборостроения РАН,
ул. Бутлерова, 15, Москва, 117342 Российская Федерация

^b Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1, Москва, 105005 Российская Федерация

*E-mail: batshev@bmstu.ru

Поступила в редакцию 21.04.2021 г.

После доработки 16.05.2021 г.

Принята к публикации 01.06.2021 г.

Рассмотрена проблема создания компактных модулей для цифровой голографии, совместимых с оптическими микроскопами, а также особенности и преимущества использования для этих целей двухкомпонентного интерферометра, построенного по схеме “линза в линзе”. Проведен габаритный и абберационный расчет параметров оптической системы такого интерферометра, выполненного в виде компактного модуля. Подобный модуль может быть использован в системах анализа микрообъектов с гладким распределением вносимой ими фазовой задержки в биомедицине и промышленности.

DOI: 10.31857/S0033849421100053

ВВЕДЕНИЕ

Методы цифровой голографии (ЦГ) в настоящее время широко используют для исследования фазовой структуры объектов, измерения микрорельефа, выявления внутренних напряжений и решения многих других задач анализа в биомедицине и промышленности [1–3]. Цифровая голограмма представляет собой цифровое изображение, которое зарегистрировано матричным приемником излучения и содержит информацию о трехмерном распределении оптического поля, образованного суперпозицией объектной волны с известной опорной волной. Цифровая обработка такой голограммы позволяет получить информацию как об амплитуде объектной волны, так и о ее фазе в каждом пикселе [4].

Особый интерес представляют системы ЦГ в виде модуля, который присоединяется к работающим “на просвет” оптическим микроскопам и расширяет их функции, так как дает возможность измерить пространственное распределение фазовой задержки, вносимой исследуемым объектом. Для технической реализации таких модулей наилучшим образом подходят интерферометры с совмещенными ветвями, в которых опорный пучок

формируется из объектного, а потому оптические пути обоих пучков различаются незначительно и, соответственно, вариации фазы, свойственные классическим двухлучевым интерферометрам (Майкельсона, Маха–Цендера и др.), вызываемые нестабильностью опорного волнового фронта, оказываются почти одинаковыми в обеих ветвях интерферометра [5, 6] и в большой степени взаимно компенсируются. В результате интерферометры с совмещенными ветвями демонстрируют высокую стабильность и устойчивость к изменениям внешних условий.

В известных вариантах голографических модулей для микроскопов, построенных на этом принципе, используются разнообразные подходы – на основе дифракционных решеток [7, 8], пространственных модуляторов света [9], матриц микрзеркал [10] и др. Все они используют сложные электронные и оптические компоненты и требуют прецизионной юстировки, а в большинстве схем интенсивность опорного пучка существенно ниже объектного, что снижает контраст интерференционной картины. Альтернативным подходом является интерферометр оригинальной конструкции (“линза в линзе”), содержащий исключительно пассивные линзовые компоненты [11]. Такой интерферометр имеет относительно простую конструкцию и свободен от большинства перечисленных недостатков, что подтвер-

¹ Работа доложена на Четвертой Международной молодежной конференции “Информационные технологии и технологии коммуникации: современные достижения” (Астрахань, 5–8 октября 2020 г.).

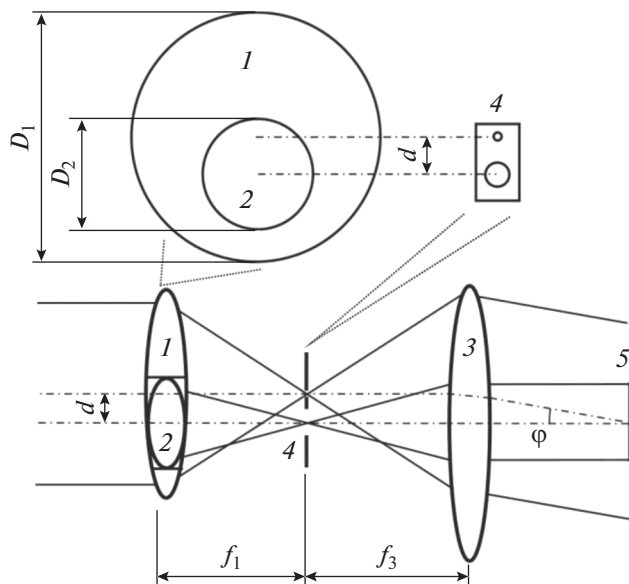


Рис. 1. Схема двухкомпонентного интерферометра: 1, 2 — объективы первого компонента; 3 — объектив второго компонента; 4 — пространственный фильтр (диафрагма); 5 — матричный приемник излучения.

ждено экспериментально: в работах [11, 12] продемонстрирована работоспособность интерферометра, его применимость для решения задач ЦГ.

Данная работа посвящена расчету оптической системы модуля для микроскопа на основе указанного интерферометра.

1. ДВУХКОМПОНЕНТНЫЙ ИНТЕРФЕРОМЕТР

Интерферометр содержит два последовательно расположенных линзовых компонента (рис. 1). Первый состоит из двух объективов 1 и 2, причем объектив 2 располагается в сформированном в объективе 1 отверстии, так что их задние фокальные плоскости совпадают, а с ними совмещается передняя фокальная плоскость второго компонента, состоящего из одиночного объектива 3. Оптические оси объективов 2 и 3 совпадают. В фокальной плоскости расположен пространственный фильтр 4, формирующий опорный сферический волновой фронт из пучка, сформированного объективом 1. Объектный пучок проходит сквозь большое отверстие фильтра 4, не искажаясь. Объектив 3 коллимирует оба пучка — опорный и объектный, и образованная при их взаимодействии интерференционная картина регистрируется матричным приемником излучения (МПИ) 5. В общем случае объективы 1 и 2 могут иметь разные фокусные расстояния, но с точки зрения сборки и юстировки интерферометра и расчета его оптической системы удобно принять

их одинаковыми. На рис. 1 эти расстояния обозначены f_1 .

2. ГАБАРИТНЫЙ РАСЧЕТ

Исходными данными для расчета являются длина волны падающего излучения λ , размер пиксела $a_{\text{пкс}}$ и физический размер $2x_5 \times 2y_5$ приемника излучения, требуемое поле зрения микроскопа (угловое 2ω или линейное $2y_9$), диаметр D пучка на входе из микроскопа (рис. 2), его апертурный угол σ , а также фокусные расстояния микрообъектива f_9 и тубусной линзы f_{11} . На этапе габаритного расчета необходимо определить фокусные расстояния f_1 и f_3 двух компонентов интерферометра 1 и 3, диаметры D_1 и D_2 объективов 1 и 2, а также расстояние d между их осями.

На рис. 2 показана схема микроскопа с интерферометром. Обозначения элементов интерферометра приняты одинаковыми на всех рисунках. Из всего множества лучей, распространяющихся в системе, удобно выделить световой пучок лучей, идущих из осевой точки источника излучения 6 (их ход показан на рис. 2а), и пучки лучей, сфокусированные в различных точках объекта 8 (см. рис. 2б, 2в).

Осевая точка источника излучения 6 сопряжена с пространственным фильтром 4 (см. рис. 2а), т.е. все множество лучей, вышедших из этой точки и распространяющееся в пределах угловой апертуры микроскопа, проходит через центры отверстий пространственного фильтра 4. Именно этот пучок лучей, идущий из осевой точки источника, делится первым компонентом интерферометра на две части, которые интерферируют на МПИ 5.

Поскольку световой пучок на выходе микроскопа является слабо расходящимся, то для получения интерференционной картины в виде прямых полос можно компенсировать расхожимость небольшим смещением z компонентов интерферометра (см. рис. 2б). Так как обсуждаемая расхожимость мала (единицы градусов), в последующих расчетах без существенной потери точности можно считать пучок параллельным, а величиной сдвига z пренебречь и считать диаметр пучка D на выходе из микроскопа равным световому диаметру внешнего объектива 1, т.е. $D_1 = D$.

Для получения высокого контраста интерференционной картины при анализе объектов с гладким распределением фазы необходимо обеспечить равенство интенсивностей интерферирующих пучков, что сводится к равенству

$$\frac{\pi}{4} D_2^2 = \frac{\pi}{4} (D_1^2 - D_2^2) P, \quad (1)$$

где P — доля энергии опорного пучка, дошедшей до МПИ. На коэффициент P влияет несколько

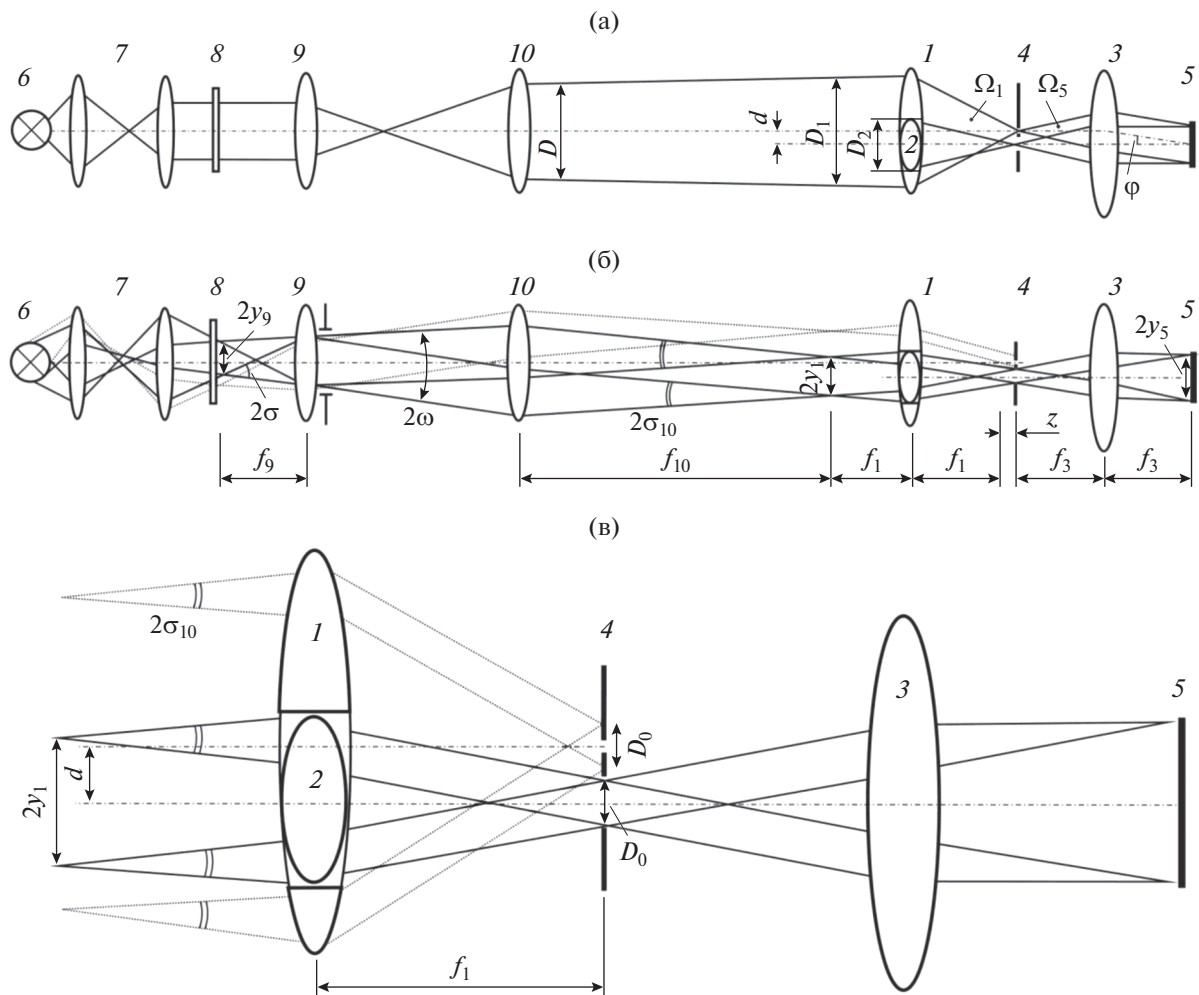


Рис. 2. Ход интерферирующих (а) и формирующих изображение (б, в) пучков в оптической системе микроскопа с интерференционным модулем: 1–3 – объективы интерферометра; 4 – пространственный фильтр (диафрагма); 5 – матричный приемник излучения; 6 – источник излучения; 7 – конденсор; 8 – объект; 9 – микрообъектив; 10 – апертурная диафрагма; 11 – тубусная линза (далее на рис. 3–5 – те же обозначения).

факторов: частичное диафрагмирование лучей малым отверстием пространственного фильтра 4, дифракция на этом отверстии, создающая выходящий опорный пучок, превышающий размер МПИ. В первом приближении можно считать этот коэффициент равным отношению телесных углов двух пучков: попавшего на МПИ (Ω_5) и сфокусированного в пинхол (Ω_1):

$$P = \frac{\Omega_5}{\Omega_1} = \frac{4f_1^2 A_5}{\pi f_3^2 (D_1^2 - D_2^2)}, \quad (2)$$

где A_5 – площадь МПИ. Тогда оптимальное значение диаметра внутренней линзы составляет

$$D_2 = 2 \frac{f_1}{f_3} \sqrt{\frac{A_5}{\pi}}. \quad (3)$$

Следует отметить, что из-за рассеяния излучения исследуемым объектом количество энергии,

прошедшей через пинхол, уменьшается. Однако, как показал описанный ниже эксперимент, это не приводит к существенному снижению контраста интерференционной картины. В крайнем случае интенсивности пучков можно уравнивать, например, введением нейтрального светофильтра в объектную ветвь.

Следующие соотношения можно получить, рассмотрев ход пучков лучей, формирующих изображение объекта 8 на МПИ 5 (см. рис. 2б, 2в). При этом объект и изображение не сопряжены с источником излучения 6, т.е. через каждую точку объекта проходят лучи, вышедшие из различных точек источника.

В то время как пучки, преломляемые объективом 2, проходят через большее отверстие пространственного фильтра 4 и формируют изображение на приемнике, световые пучки, пропущенные объективом 1, срезаются малым отверстием фильтра

так, что создаваемая на приемнике освещенность мала. Поэтому можно считать, что изображение на приемнике излучения формируется только лучами, прошедшими через объектив 2. Для этого, однако, расстояние d между осями объективов 1 и 2 должно быть достаточным, чтобы никакая часть опорного пучка не проходила через большое отверстие пространственного фильтра 4. То есть это расстояние должно превышать диаметр световых пучков, переносящих изображение: $d > D_0$ (см. рис. 2в).

С учетом того, что плоскость фильтра 4 оптически сопряжена с плоскостью апертурной диафрагмы 10 микроскопа, нижнюю границу межосевого расстояния d можно выразить через параметры микроскопа:

$$D_0 = 2f_1 \sin \sigma_1 = 2f_1 \sin \sigma / m_{\text{мс}}, \quad (4)$$

где σ_1 — задний апертурный угол, а линейное увеличение $m_{\text{мс}} = f_{11}/f_9$ определяется фокусными расстояниями составных частей: микрообъектива f_9 и тубусной линзы f_{11} .

Вместе с тем межосевое расстояние d не должно быть слишком большим, чтобы получить приемлемую ширину интерференционных полос b :

$$b = \frac{\lambda}{\sin \varphi} = \frac{\lambda f_3}{d}. \quad (5)$$

Чтобы полосы можно было разрешить, их ширина b должна быть не менее четырех размеров пиксела $a_{\text{пкс}}$, что накладывает на d ограничение сверху. Таким образом, с учетом (4) и (5) расстояние d между центрами отверстий пространственного фильтра Φ должно лежать в интервале

$$\frac{2f_1 \sin \sigma}{m} < d \leq \frac{\lambda f_3}{4a_{\text{пкс}}}. \quad (6)$$

Соотношение фокусных расстояний двух компонентов интерферометра f_3/f_1 определяет его увеличение $m_{\text{инт}}$ и выражается также через увеличение микроскопа $m_{\text{мс}} = f_{11}/f_9$ и другие его параметры:

$$\frac{f_3}{f_1} = m_{\text{инт}} \equiv \frac{y_5}{y_1} = \frac{y_5}{m_{\text{мс}} y_9}. \quad (7)$$

Выбор абсолютных значений фокусных расстояний компонентов основан на соображениях компактности системы при допустимом уровне aberrаций, что ограничивает величину относительного отверстия D_2/f_1 . Анализ показывает, что относительное отверстие в пределах от 1 : 3.5 до 1 : 5 дает возможность эффективно корректировать aberrационные искажения.

Таким образом, приведенные формулы позволяют определить все основные габаритные параметры интерферометра.

Проведем aberrационный расчет для схемы со следующими параметрами: входной апертурный

угол микроскопа $\sin \sigma = 0.17$, фокусные расстояния компонентов микроскопа $f_9 = 9$ мм, $f_{11} = 180$ мм, выходной диаметр пучка $D = 20$ мм. Линейное поле зрения не менее 0.1 мм.

В качестве приемника излучения выбран монокромный КМОП-сенсор Aptina MT9P031 со следующими параметрами: число элементов $N_x \times N_y = 2592 \times 1944$, размер пикселя $a_{\text{пкс}} = 2.2$ мкм, размеры $2x_{\text{мпн}} \times 2y_{\text{мпн}} = 5.7 \times 4.3$ мм². Используемая в расчетах длина волны $\lambda = 633$ нм.

Рассчитанные и выбранные параметры интерферометра: диаметр внутренней линзы $D_2 = 8$ мм, фокусные расстояния $f_1 = 30$ мм, $f_3 = 75$ мм. Увеличение интерферометра составило 2.5, а линейное поле зрения микроскопа 0.12×0.09 мм². Допустимое расстояние между осями объективов первого компонента d лежит в диапазоне 0.5...5.4 мм. При выбранном значении $d = 2$ мм ширина интерференционных полос составляет $b \approx 23$ мкм, что соответствует 10 пикселям приемника излучения. Диаметр большого отверстия диафрагмы 4 взят равным 1 мм, а диаметр пинхола — 30 мкм.

Следует отметить, что диаметр внутренней линзы D_2 в созданной экспериментальной установке не является оптимальным, что не обеспечивает равенство световых потоков. По формуле (1) он должен составить 2.5 мм, однако по технологическим соображениям принято решение сделать $D_2 = 8$ мм.

3. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ

Аберрации компонентов интерферометра влияют на качество изображения, сформированное в объектном пучке и, соответственно, на качество интерферирующих волновых фронтов. Поскольку пинхол, установленный в опорном пучке, формирует почти идеальный сферический фронт, высококачественный объектив 3 способен сформировать качественный плоский опорный волновой фронт на выходе из интерферометра. Следовательно, качество интерференционной картины определяется aberrациями объектива 2. Следует также отметить, что объектив 3 должен иметь малые aberrации при работе в режиме коллиматора, т.е. когда предмет находится в передней фокальной плоскости, а не в бесконечности, и поэтому использовать в качестве 3 стандартные фотообъективы или объективы для машинного зрения можно было бы лишь в обратном ходе лучей, что усложнило бы механизм их крепления к видеокамере.

Таким образом, необходимо минимизировать aberrации двух объективов 1 и 2, формирующих изображение (см. рис. 2). Очевидно, что оптимизация объектива 2 для целей фокусировки объектного

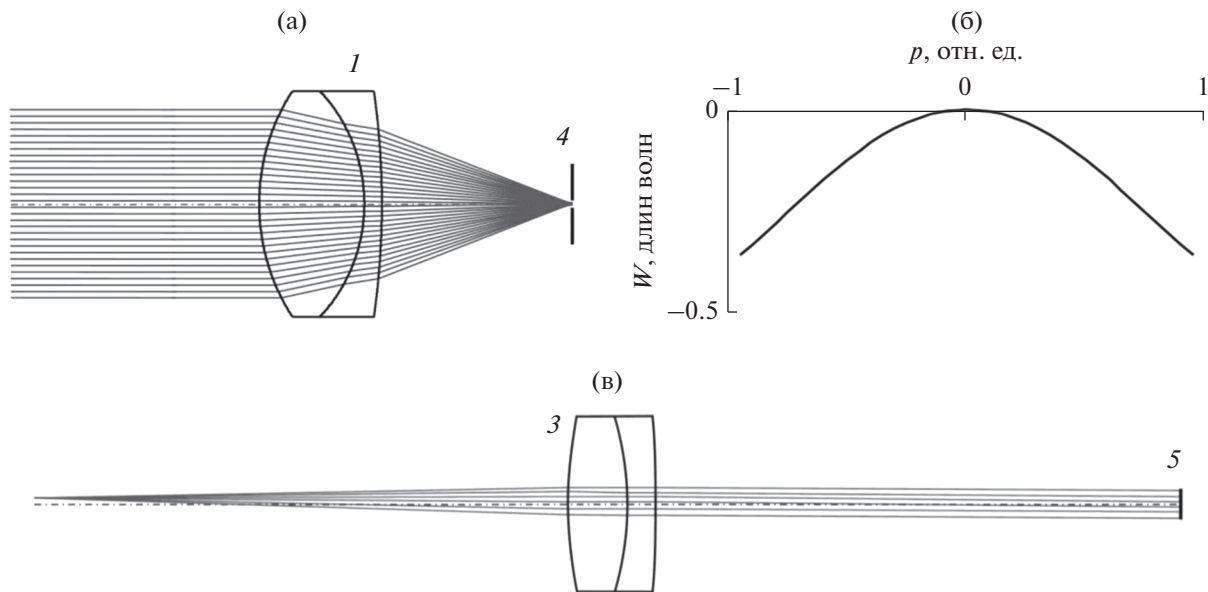


Рис. 3. Результаты моделирования объективов интерферометра: а — оптическая схема объектива 1, фокусирующего опорный пучок в плоскость пространственного фильтра 4; б — график волновой aberrации опорного пучка; в — оптическая схема объектива 3, проецирующего опорный пучок на МПИ 5.

пучка приведет к повышению его aberrаций при работе в качестве коллиматора пучка, переносящего изображение. Однако с учетом относительно небольшой апертуры пучков ($\sigma_1 \approx 1^\circ$) остаточные aberrации можно частично скомпенсировать объективом 3. Таким образом, этот подход может привести к появлению волновой aberrации в интерферирующих пучках, а потому важен “баланс” aberrаций схемы интерферометра в обоих случаях: при работе из бесконечности в бесконечность и при проецировании изображения.

Небольшие поля зрения и апертуры пучков, в которых работают компоненты интерферометра, делают возможным использование простых двухлинзовых склеенных объективов в качестве каждого из его элементов. Это подтверждает выполненное в программе ZEMAX моделирование интерферометра.

Моделировались объективы со следующими конструктивными параметрами. Объектив 3: радиусы поверхностей 52, -43.4 и -217.4 мм, материал первой линзы N-BAF10, ее толщина 8 мм, материал второй линзы N-SF6, а толщина 4 мм. Радиусы поверхностей объектива 1: 20.9, -16.7 и -79.8 мм, материал первой линзы N-BAF10, ее толщина 12 мм, материал второй линзы N-SF6HT, а толщина 2 мм. Объектив 2 идентичен объективу 1, но установлен в обратном ходе и имеет меньший диаметр.

Результаты моделирования элементов, формирующих опорный пучок интерферометра, по-

казаны на рис. 3, оптическая схема объектива 1 — на рис. 3а, а схема объектива 3 — на рис. 3в. На рис. 3б представлен график волновой aberrации W на его выходе из объектива 3 в зависимости от относительной координаты луча на входном зрачке p . Видно, что aberrация не превосходит $\lambda/2$, что вполне приемлемо.

Результаты моделирования объектной ветви интерферометра представлены на рис. 4: работа в параллельных пучках, т.е. в режиме интерферометра (рис. 4а), графики волновой aberrации W осевого и наклонного объектных пучков показаны (рис. 4в). Видно, что остаточная волновая aberrация составляет приблизительно $\lambda/10$. Ход лучей, формирующих изображение, через объектную ветвь интерферометра показан на рис. 4б. Из диаграмм, отображающих пятна рассеяния для осевой и внеосевой точек (см. рис. 4г, 4д), видно, что качество формируемого изображения близко к дифракционному.

Результаты проведенного анализа дают основание считать выбранные объективы пригодными для работы в рассматриваемой системе интерферометра (“линза в линзе”).

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для экспериментов был собран макет двухкомпонентного интерферометра, рассчитанный по описанной выше методике (рис. 5а). В первом

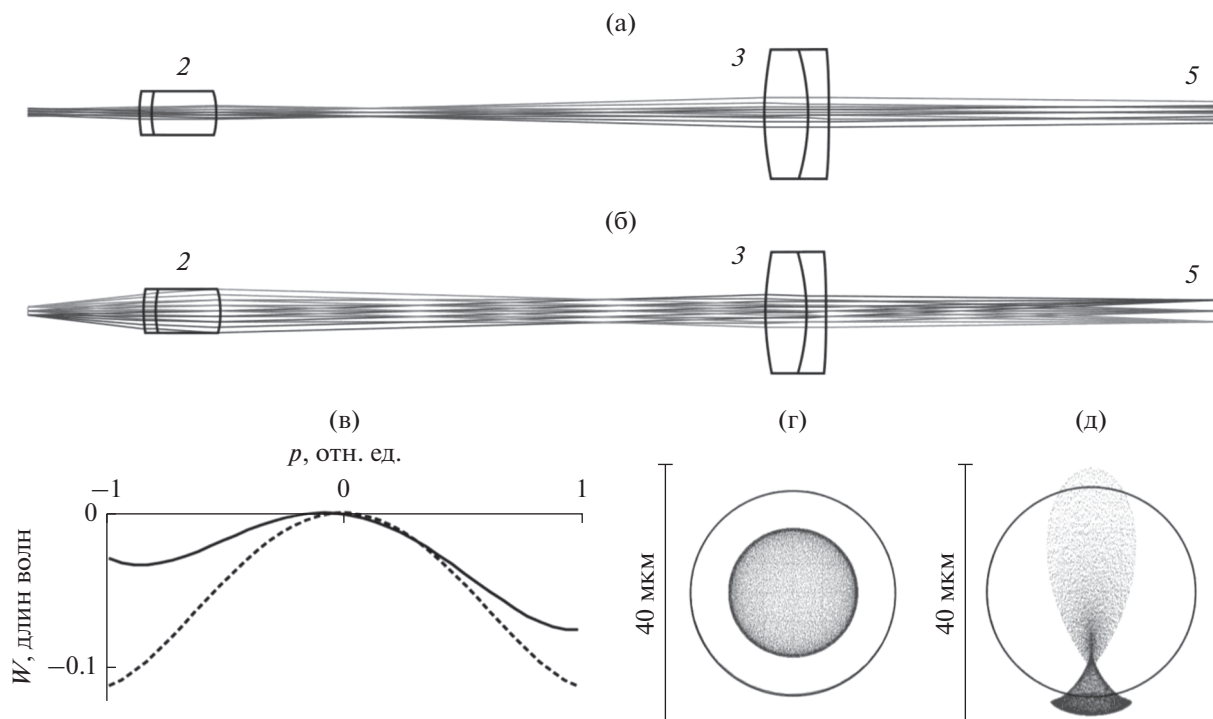


Рис. 4. Результаты моделирования объектной ветви интерферометра: а — ход лучей в параллельных пучках; б — ход лучей в режиме изображающей проекционной системы; в — графики волновой aberrации осевого (сплошная кривая) и наклонного (штриховая кривая) объектных пучков; г — пятно рассеяния осевой точки; д — пятно рассеяния внеосевой точки.

компоненте были использованы два идентичных ахроматических двухлинзовых склеенных объектива Thorlabs AC254-030-A с фокусным расстоянием 30 мм, а в качестве второго компонента — объектив The Imaging Source TCL 7528 5MP с фокусным расстоянием 75 мм, установленный в обратном ходе лучей. Диаметр большого отверстия диафрагмы 4 взят равным 1 мм, а диаметр малого (пинхола) — 30 $\mu\text{м}$.

Увеличение оптической системы интерферометра составляет 2.5. Диаметры внешнего и внутреннего объективов первого компонента составляют соответственно 25.4 и 7.5 мм, расстояние между осями объективов первого компонента 2 мм, общая длина макета интерференционного модуля — 120 мм. В качестве приемника излучения выбран монохромный КМОП-сенсор Artina MT9P031. Данный интерферометр был сопряжен с микрообъективом 20X Olympus Plan Achromat Objective с увеличением 20, числовой апертурой 0.4 и передним рабочим отрезком 1.2 мм. Поле зрения, ограниченное приемником излучения, составило $0.12 \times 0.08 \text{ мм}^2$. В качестве источника освещения был использован He—Ne-лазер мощностью 5 мВт.

На рис. 5б приведен фрагмент ($30 \times 30 \text{ мкм}^2$) зарегистрированного голографического изображения мазка крови, а на рис. 5в — восстановленная

фазовая задержка $\Delta\phi(x, y)$. Восстановленная форма распределения фазовой задержки, вносимой эритроцитами, согласуется с данными работ [7, 8].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассчитанная система двухкомпонентного интерферометра может быть основой для создания дополнительных модулей для оптических микроскопов. Такой интерферометр отличают компактность, отсутствие подвижных элементов, относительная простота сборки и юстировки. Описанная методика расчета параметров такого интерферометра позволяет оптимизировать его характеристики (пространственное разрешение, поле зрения, светосилу) и адаптировать для применения совместно с различными оптическими микроскопами. Полученные результаты применимы и для создания мультимодальных систем анализа микрообъектов, востребованность которых в биомедицине и промышленности непрерывно растет.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Результаты работы получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-технологического центра уникального приборостроения РАН.

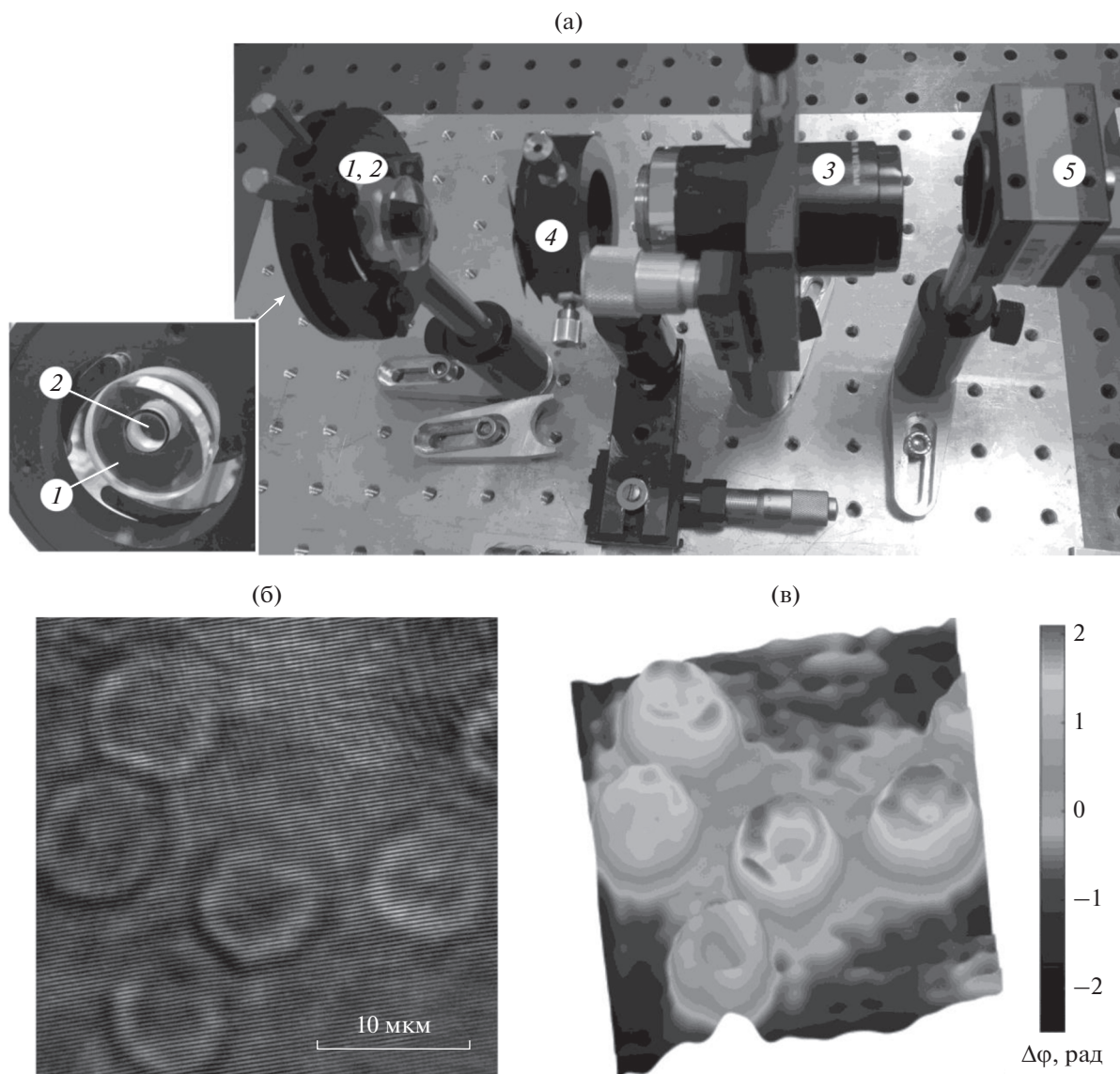


Рис. 5. Внешний вид макета двухкомпонентного интерферометра (а), пример зарегистрированной интерференционной картины (б) и вычисленное пространственное распределение фазовой задержки (в).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 18-38-20057) и Министерства образования и науки (проект № 0069-2019-0010).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shaked N., Zalevsky Z., Satterwhite L. Biomedical Optical Phase Microscopy and Nanoscopy. Oxford: Acad. Press, 2012.
2. Osten W. Optical Inspection of Microsystems. N.Y.: CRC Press, 2019.
3. Paturzo M., Pagliarulo V., Bianco V., Memmolo P. et al. // Optics and Lasers in Engineering, 2018. V. 104. P. 32.
4. Schnars U., Jüptner W. Digital Hologram Recording, Numerical Reconstruction, and Related Techniques. Berlin: Springer, 2005.
5. Dyson J. // J. Optical Soc. Amer. 1957. V. 47. № 5. P. 386.
6. Malacara D. Optical Shop Testing. N.Y.: Wiley, 1978.
7. Mir M., Bhaduri B., Wang R. et al. // Progress in Optics. 2012. V. 57. P. 133.
8. Kim Y., Shim H., Kim K. et al. // Optics Express. 2014. V. 22. № 9. P. 10398.
9. Mico V., García J. // Optics Lett. 2010. V. 35. № 23. P. 3919.
10. Zheng C., Zhou R., Kuang C., Zhao G. et al. // Optics Lett. 2017. V. 42. № 7. P. 1448.
11. Machikhin A., Polschikova O., Vlasova (Ramazanova) A., Pozhar V. // J. Optics. 2019. V. 21. P. 125801.