ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 59743.2— 2022 (ИСО 14880-2:2006)

Оптика и фотоника

МАТРИЦА МИКРОЛИНЗ

Часть 2

Методы измерений аберраций волнового фронта

(ISO 14880-2:2006, MOD)

Издание официальное

Москва
Российский институт стандартизации
2022

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 ПОДГОТОВЛЕН Федеральным государственным унитарным предприятием «Научно-исследовательский институт физической оптики, оптики лазеров и информационных оптических систем Всероссийского научного центра «Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова» (ФГУП «НИИФООЛИОС ВНЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова») и Федеральным государственным автономным образовательным учреждением высшего образования «Национальный исследовательский Университет ИТМО» (Университет ИТМО) на основе собственного перевода на русский язык англоязычной версии стандарта, указанного в пункте 4

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 296 «Оптика и фотоника»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 13 июля 2022 г. № 616-ст

4 Настоящий стандарт является модифицированным по отношению к международному стандарту ИСО 14880-2:2006 «Оптика и фотоника. Матрицы микролинз. Часть 2. Методы определения аберраций волнового фронта» (ISO 14880-2:2006 «Optics and photonics — Microlens arrays — Part 2: Test methods for wavefront aberrations», MOD) путем изменения ссылок, исключения введения и отдельных положений, которые дублируются по тексту стандарта, исключения из библиографии информации о документах, ссылки на которые не использованы в настоящем стандарте.

Внесение указанных технических отклонений направлено на учет особенностей российской национальной стандартизации и целесообразности использования ссылочных национальных стандартов вместо ссылочных международных стандартов. При этом ссылки и другие внесенные дополнения и изменения выделены в тексте курсивом.

Сведения о соответствии ссылочных национальных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте, приведены в дополнительном приложении ДА

5 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

*Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (*gost.e-ecolog.ru

© ISO, 2006
© Оформление. ФГБУ «РСТ», 2022

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 1
3 Термины и определения 1
4 Обозначения 2
5 Измерительное оборудование 2
6 Дополнительные требования к оборудованию 3
7 Методы измерений 3
8 Требования к проведению измерений 4
9 Обработка результатов измерений 4
10 Точность результатов измерений 4
11 Протокол измерений 4
Приложение А (обязательное) Общие требования к методам измерений 6
Приложение В (обязательное) Методы измерений 1 и 2 с применением интерферометра Маха-Цендера 7
Приложение С (обязательное) Методы измерений 3 и 4 с применением интерферометра бокового сдвига 11
Приложение D (обязательное) Метод измерений 5 с применением датчика Шака-Гартмана 15
Приложение Е (обязательное) Метод измерений с применением интерферометра Тваймана-Грина 17
Приложение F (обязательное) Измерение однородности матрицы микролинз 18
Приложение ДА (справочное) Сведения о соответствии ссылочных национальных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте 21
Библиография 22

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Оптика и фотоника

МАТРИЦА МИКРОЛИНЗ

Часть 2

Методы измерений аберраций волнового фронта

Optics and photonics. Microlens array. Part 2. Test methods for wavefront aberrations

Дата введения — 2023—03—01

1 Область применения

Настоящий стандарт распространяется на матрицы микролинз с линзами, образованными внутри или на одной или более поверхностях общей подложки, и устанавливает методы измерений аберраций волнового фронта матриц микролинз.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 8.745/ISO/TR 14999-2:2005 Государственная система обеспечения единства измерений. Оптика и фотоника. Интерференционные измерения оптических элементов и систем. Часть 2. Измерения и методика оценки результатов

ГОСТ Р 59743.1 (ИСО 14880-1:2019) Оптика и фотоника. Матрица микролинз. Часть 1. Термины и определения. Классификация

ГОСТ Р ИСО 15367-2 Лазеры и лазерные установки (системы). Методы измерений формы волнового фронта пучка лазерного излучения. Часть 2. Датчики Шока-Гартмана

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по *ГОСТ Р 59743.1*.

Издание официальное

4 Обозначения

В настоящем стандарте применены следующие обозначения:

NA — числовая апертура;

Φ — аберрация волнового фронта, λ;

Φ_{P-V} — отношение максимального значения к минимальному значению аберрации волнового фронта, λ;

Φ_{rms} — среднеквадратичное значение аберрации волнового фронта, λ;

λ — длина волны, мкм;

Θ — угловая апертура, градус.

5 Измерительное оборудование

5.1 Общие положения

Для измерений применяют оборудование, включая источник оптического (лазерного) излучения (далее — источник излучения), коллимирующую линзу, ограничитель апертуры, устройство крепления образца, оптические устройства для формирования изображений, детектор изображений и систему анализа интерференционных картин.

5.2 Источник оптического (лазерного) излучения

Применяют источник излучения, пригодный для проверки аберраций волнового фронта матриц микролинз. Среднеквадратичное отклонение волнового фронта на рабочей длине волны источника излучения должно быть не более $\lambda/10$ для эффективной апертуры измеряемых микролинз.

Должны быть представлены следующие параметры источника излучения: центральная длина волны, полуширина спектра, состояние поляризации (случайная, линейная, круговая и т. д.), расходимость излучения, размер пятна или параметры перетяжки излучения. При отсутствии спецификации на источник излучения следует провести измерения характеристик излучения и зарегистрировать их в протоколе измерений.

5.3 Объектив

Если для получения опорного сферического волнового фронта в схемах измерения с интерферометрами применяют линзу (объектив), то аберрации волнового фронта должны быть меньше на один и более порядков значения по сравнению с аберрациями измеряемых микролинз, или среднеквадратичное отклонение волнового фронта должно быть не более $\lambda/10$.

Линза объектива оптического микроскопа, используемая в качестве эталонной линзы, должна иметь эффективную числовую апертуру. Для объектива должны быть представлены значения следующих параметров:

- эффективная диафрагма;
- эффективное фокусное расстояние на рабочей длине волны.

Зона (площадь), в которой проходящее оптическое излучение фокусируется, ограничена случаем ∞/f для сопряженных микролинз.

5.4 Коллиматор

Применяемый коллиматор должен иметь числовую апертуру, превышающую максимальную числовую апертуру измеряемого образца, для того чтобы избежать влияния дифракции. При этом отклонения волнового фронта на рабочей длине волны должны быть менее $\lambda/20$ среднеквадратичного отклонения.

В остальных случаях параметры применяемого коллиматора должны быть указаны в протоколе измерений.

5.5 Оптическая система согласования излучения

Для согласования интерференционной картины с матричным детектором (приемником) применяют телескопическую систему, состоящую из двух софокусных линз. Отношение фокусных расстояний этих линз должно быть равно коэффициенту уменьшения интерференционной картины.

Примечание — Диаметр измеряемой области микролинзы может быть установлен с помощью программного обеспечения при определении эффективной числовой апертуры для того, чтобы избежать дополнительной дифракции на физической апертуре.

5.6 Апертурная диафрагма

Для ограничения диаметра пучка оптического (лазерного) излучения, падающего на измеряемую микролинзу, в схеме измерений применяют ограничивающую диафрагму. Допускается использовать программное обеспечение в качестве ограничителя апертуры при обработке результатов измерений.

6 Дополнительные требования к оборудованию

Измерения аберраций волнового фронта микролинз проводят с применением интерферометра или другого устройства методами, приведенными в приложениях B—F. При использовании гауссовых пучков малого диаметра следует проводить дополнительные (специальные) расчеты преобразования гауссовых пучков оптическими устройствами. Размер приемной площадки детектора должен быть сопряжен с входным или выходным зрачком измеряемых микролинз.

Метод измерений должен соответствовать применению матрицы микролинз. Для однопроходовых схем измерений применяют однопроходные интерферометры.

Примечание — В интерферометрах, как правило, применяют лазерные источники излучения, при этом следует учитывать, что могут возникнуть трудности при использовании двухпроходных схем измерений с отраженным оптическим излучением, например при применении интерферометров Физо или Тваймана Грина. Следует учитывать, что все границы оптических элементов схемы формируют дополнительные интерференционные полосы, усложняющие получение достоверных результатов измерений.

Методы измерений, в которых использовано проходящее оптическое (лазерное) излучение, в меньшей степени подвержены воздействию паразитных интерференционных полос, чем двухпроходные интерферометры с отражением. В связи с этим для измерений рекомендуется применять интерферометры типа Маха-Цендера, бокового сдвига или датчик Шака-Гартмана в проходящем оптическом излучении.

7 Методы измерений

7.1 Методы измерений одиночных микролинз

Для измерений аберраций волнового фронта микролинз применяют интерферометры или детекторы волнового фронта. Для измерений допускается использовать однопроходные интерферометры, такие как интерферометр Маха-Цендера, интерферометры бокового сдвига или двухпроходные интерферометры, такие как детекторы волнового фронта Физо, Тваймана-Грина и датчики волнового фронта Шака-Гартмана (см. приложения B—D).

Следует определить требования к методам измерений. Выбор конкретного метода измерений осуществляют с учетом следующих критериев:

- требуемая точность;
- характеристики, подлежащие измерению;
- универсальность измерений;
- затраты;
- измерение характеристик одной выбранной микролинзы или всей матрицы микролинз.

При выборе конкретного метода измерений следует руководствоваться *ГОСТ Р 8.745*.

7.2 Конкретные методы измерений

Интерферометры или датчики волнового фронта применяют для измерений матрицы микролинз в целом или отдельных микролинз. Конкретные методы измерений приведены в приложениях E и F.

Примечание — Измерения с применением излучения со сферическим волновым фронтом проводят на отдельных микролинзах, выбранных из матрицы, так как выполнить такие измерения для всей матрицы микролинз невозможно. Для измерений матриц микролинз применяют излучение с плоским волновым фронтом или специальное оборудование с дифракционными элементами формирования волнового фронта (см. *[1]*).

7.3 Требования к положению измеряемых микролинз

Оптические оси измеряемой микролинзы и оптических устройств, применяемых для согласования излучения, должны быть совмещены с оптическими осями измерительных приборов.

Примечание — Образец следует устанавливать на предметный столик, обеспечивающий возможность его регулирования в двух или трех направлениях.

7.4 Подготовка к измерениям

Для обеспечения получения достоверных результатов измерений следует соблюдать требования к окружающей среде и не подвергать измерительное оборудование воздействию вибраций.

Поверхности оптических элементов должны быть чистыми.

При очистке поверхностей оптических элементов следует руководствоваться указаниями изготовителя или нормативным документом на конкретное изделие.

8 Требования к проведению измерений

Требования к проведению измерений и методы измерений аберраций волнового фронта отдельных микролинз приведены в приложениях A—D.

Требования к проведению измерений и методы измерений аберраций волнового фронта матрицы микролинз приведены в приложениях E и F.

9 Обработка результатов измерений

Аберрации волнового фронта вычисляют по интерферограммам (см. *[2]* и *[3]*) или результатам измерений методами, приведенными в приложениях A—F. Из аберраций волнового фронта сферических линз с круглой апертурой могут быть получены низшие коэффициенты Цернике с апертурой, заданной программным обеспечением.

Примечания

1 Низшими коэффициентами Цернике являются:

- сферическая аберрация;
- астигматизм;
- кома.

2 Для получения информации о других формах апертуры объектива (например, прямоугольной формы) см. *ГОСТ Р 8.745*.

Результатом измерений является значение отношения максимального значения к минимальному значению аберраций волнового фронта или среднеквадратичное значение.

При регистрации в качестве результата измерений значения отношения максимального значения к минимальному значению аберраций волнового фронта следует учитывать, что полученное значение может быть недостаточно достоверным. Поэтому в качестве результата измерений рекомендуется регистрировать в протоколе 6-кратное среднеквадратичное значение.

10 Точность результатов измерений

Следует учитывать, что оборудование, применяемое для измерений, может иметь собственные аберрации волнового фронта. Точность результатов измерений может быть улучшена путем вычитания собственных аберраций волнового фронта применяемого оборудования.

11 Протокол измерений

Протокол измерений должен включать следующую информацию:

а) основная информация:

1) сведения о том, что измерение проведено в соответствии с настоящим стандартом,
2) дата измерений,
3) наименование и адрес организации, проводившей измерения,
4) Ф.И.О. лица, проводившего измерения;

b) информация об измеряемом образце:
   1) тип микролинз,
   2) наименование изготовителя,
   3) тип матрицы микролинз,
   4) регистрационный номер;
c) условия измерения (условия окружающей среды):
   1) температура,
   2) относительная влажность;
d) информация о методе измерений:
   1) применяемый метод измерений,
   2) применяемые оптические устройства,
   3) применяемый источник излучения:
      i) тип источника излучения,
      ii) длина волны,
      iii) полуширина спектра оптического (лазерного) излучения,
      iv) состояние поляризации,
      v) расходимость излучения,
      vi) размер пятна,
   4) датчик,
   5) апертура;
e) результаты измерений:
   1) отношение максимального значения к минимальному значению аберрации волнового фронта Φ_{P_V},
   2) среднеквадратичное значение аберрации волнового фронта Φ_{rms},
   3) коэффициенты полинома Цернике или другие полиноминальные коэффициенты.

Приложение А
(обязательное)

Общие требования к методам измерений

Измерение аберраций волнового фронта микролинз проводят с применением однопроходного интерферометра Маха-Цендера, интерферометра бокового сдвига или датчика волнового фронта Шака-Гартмана. Однопроходные измерительные приборы необходимы для получения четкого изображения апертуры микролинзы на детекторе. В двухпроходовых схемах измеряемая микролинза формирует два изображения апертуры линзы (объектива), одно из которых находится вне фокуса из-за дифракционных эффектов. Таких эффектов можно избежать, используя интерферометр с однопроходовой схемой, так как все отражения от поверхностей микролинз в оптической системе в прямом направлении ничтожно малы. Также следует учитывать, что вследствие четкого изображения апертуры микролинзы отсутствуют неоднозначности определения аберраций волнового фронта.

Измерительное устройство не должно вносить в результат измерений влияние собственных аберраций.

В случае применения интерферометра бокового сдвига необходимо сохранять конструкцию устройства сдвига симметричной и максимально простой (например, интерферометр сдвига на основе двух дифракционных решеток), чтобы избежать дополнительных ошибок измерений.

Поскольку диаметр микролинз составляет от 10 мкм до нескольких миллиметров, необходимо применять средство увеличения по меньшей мере на два порядка для заполнения апертуры матричного фотодетектора, чтобы получить достаточное разрешение, так что даже сильно деформированные волновые фронты могут быть измерены без нарушения теоремы дискретизации. Для обеспечения большого диапазона увеличений при измерениях с применением интерферометра с плоским волновым фронтом плечо интерферометра с образцом должно содержать микроскоп для получения высоких коэффициентов увеличения. Если формирующий изображение объектив используют вне интерферометра, то следует применять объектив специальной конструкции для обеспечения высокого коэффициента увеличения в сочетании с большим рабочим расстоянием. Аберрации волнового фронта микролинз измеряют с применением интерферометров Маха-Цендера одним из двух методов, приведенных в приложении В. Рекомендуется применять изображающий микроскоп телескопического типа для формирования плоских волн в измерительном плече и на втором делителе лучей.

Для изменения увеличения следует применять специальные меры для регулирования коэффициента деления между двумя плечами интерферометра для получения требуемого контраста интерференционных полос. Для этих целей рекомендуется применять блок поляризационного делителя, состоящий из поляризационного светоделителя в комбинации с двумя четвертьволновыми пластинами, по одной в каждом плече интерферометра, и полуволновой пластины перед блоком деления для поворота вектора поляризации.

Также необходимо предусмотреть возможность изменения средней интенсивности излучения, чтобы фотодетектор не находился в состоянии насыщения.

Для измерений аберраций волнового фронта микролинз применяют сферический волновой фронт излучения, создаваемый объективом микроскопа с числовой апертурой, превышающей числовую апертуру измеряемой микролинзы. Число Штреля объектива должно быть не менее 95 %. При удовлетворении данного требования проводить дополнительные калибровки объектива не требуется.

Для измерений микролинз с малой числовой апертурой рекомендуется облучать образец плоской волной. При облучении плоской волной можно измерить фокусное расстояние микролинзы. Для определения фокусного расстояния микролинз с большой числовой апертурой в центральной зоне интерференционной полосы также допускается облучать образец плоскими волнами. Для этой цели программное обеспечение должно обеспечивать задание (установление) размера центральной зоны выбора данных. Эффективное фокусное расстояние f в выбранной зоне вычисляют с помощью фазового отклонения Ф по формуле

$$\frac{1}{f} = \frac{\Phi\lambda}{\pi\rho_{mask}^2}.$$

Выполнив калибровку коэффициента масштабирования с помощью объектмикрометра, можно определить абсолютный диаметр микролинзы $2\rho_{mask}$, мкм.

В приложениях В и С приведены методы измерений с применением интерферометров, которые удовлетворяют требованиям к измерениям, установленным в настоящем приложении.

Приложение В
(обязательное)

Методы измерений 1 и 2 с применением интерферометра Маха-Цендера

В.1 Схема измерений и измерительное оборудование

Для измерений применяют, как правило, интерферометры Маха-Цендера с плоским волновым фронтом. Излучение с неплоским волновым фронтом используют в этих интерферометрах в случае необходимости измерений аберраций волнового фронта микролинз с помощью специальных микрообъективов с большим рабочим отрезком вне интерферометра для формирования изображения на детекторе.

В.2 Проведение измерений

В.2.1 Метод измерений 1

Для измерений применяют интерферометр, элементы которого расположены коаксиально. Элементы интерферометра: источник излучения, расширитель луча, ограничитель апертуры, формирующий объектив, эталонная линза (объектив) или измеряемая микролинза, зеркала 1—4, линза (объектив) формирования изображения и датчик изображения. Эталонную линзу и микролинзы следует устанавливать как можно точнее для обеспечения уменьшения собственных аберраций измерительных устройств.

На рисунке В.1 приведена схема интерферометра фазового сдвига Маха-Цендера с использованием зеркал 1—4. Параллельный пучок лучей источника излучения расширяется телескопической системой и ограничивается диафрагмой, которые расположены перед интерферометром. Затем пучок разделяется на два с помощью полупрозрачного зеркала 1. Пучок измерительного плеча интерферометра падает на формирующий объектив, обеспечивающий сферический волновой фронт для облучения измеряемых микролинз или эталонной линзы (объектива), свободных от аберраций, и имеющий одинаковую с микролинзами апертуру. Микролинзы или эталонная линза (объектив) должны быть расположены конфокально с формирующим объективом, создавая плоский волновой фронт в выходном зрачке измеряемой микролинзы. Этот волновой фронт накладывается на плоскую опорную волну, и в результате формируется интерференционная картина. Изображающий объектив на выходе интерферометра отображает апертуру микролинзы на фотодетекторе с таким коэффициентом масштабирования, чтобы заполнить большую часть фоточувствительной области матричного детектора, обеспечивая достаточность данных для определения аберраций волнового фронта микролинзы. Диафрагму перед интерферометром следует располагать на оптической оси и таком расстоянии от формирующего объектива измерительного плеча, чтобы четкое изображение диафрагмы совпадало с изображением апертуры измеряемой микролинзы.

Аберрации волнового фронта определяют путем регистрации нескольких сдвинутых по фазе интерференционных картин в памяти компьютера и с последующей обработкой данных. Сдвинутые по фазе интерференционные картины получают при сдвиге зеркала (см. рисунок В.1, позиция *10*) пьезоэлектрическим элементом (см. рисунок В.1, позиция *13*).

На первом этапе измеряют аберрации волнового фронта эталонной линзы (объектива) вместе с аберрациями интерферометра и обозначают как Φ_0.

На втором этапе в интерферометр помещают измеряемые микролинзы вместо эталонной линзы. Аберрации волнового фронта измеряемых микролинз обозначают как Φ. Эти аберрации являются результатом разности аберраций измеренных микролинз с аберрациями интерферометра Φ_1 и аберраций Φ_0, измеренных совместно с эталонной линзой (объективом)

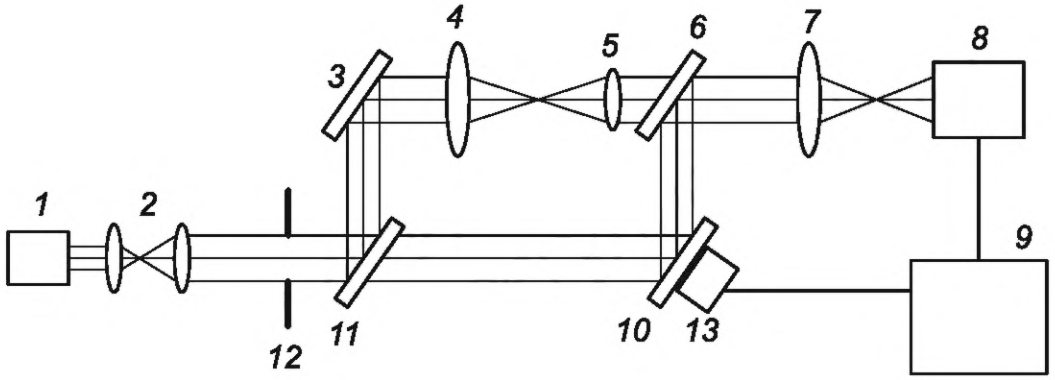
$$\Phi = \Phi_1 - \Phi_0.$$

Формирующий объектив должен иметь эффективную числовую апертуру *NA*, большую, чем у измеряемых микролинз.

Примечания

1 В схеме, приведенной на рисунке В.1, допускается устанавливать диафрагму как можно ближе к выходному зрачку эталонной линзы (объектива) или измеряемых микролинз.

2 Диафрагмой задают диаметр области измерений эталонной линзы (объектива) или измеряемых микролинз. Допускается задавать область измерений эталонной линзы (объектива) и измеряемых микролинз путем размещения диафрагмы как можно ближе к датчику изображения или путем задания области анализа с использованием соответствующего программного обеспечения.

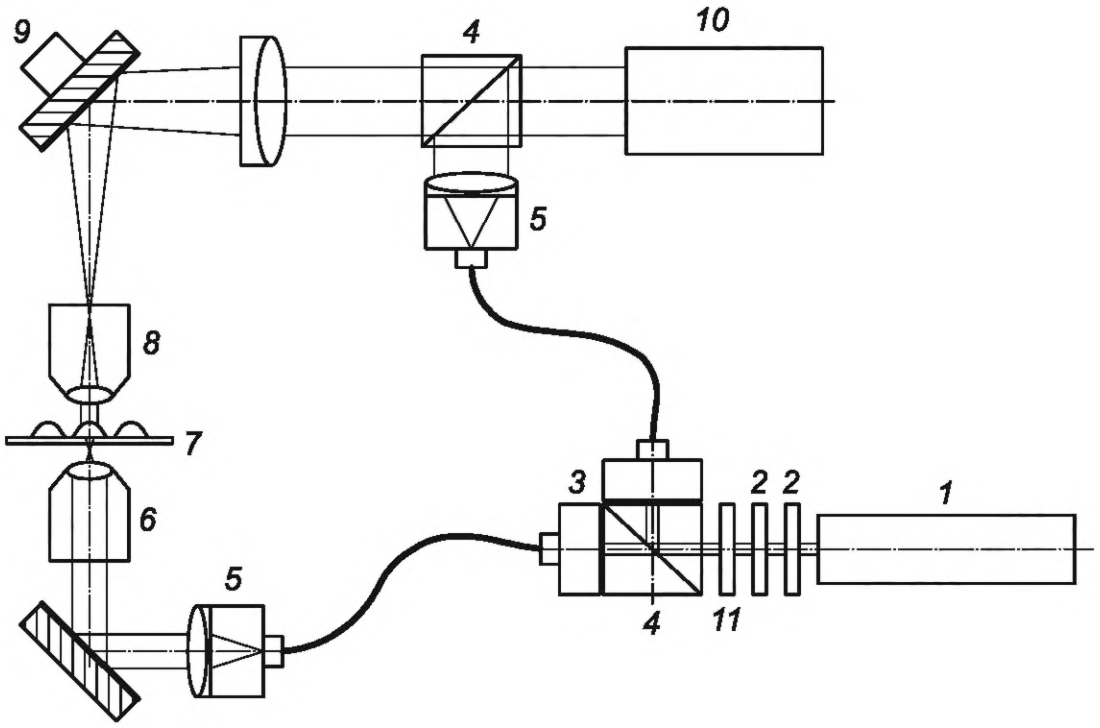


1 — источник излучения; *2* — расширитель луча; *3* — зеркало 2; *4* — формирующий объектив; *5* — эталонная линза (объектив) или измеряемая микролинза; *6* — зеркало 4; *7* — изображающий объектив; *8* — датчик изображения; *9* — устройство обработки изображений; *10* — зеркало 3; *11* — зеркало 1; *12* — ограничитель апертуры (диафрагма); *13* — пьезоэлектрический преобразователь (ПЭП)

Рисунок В.1 — Схема интерферометра фазового сдвига Маха-Цендера

В.2.2 Метод измерений 2

Измерения проводят с применением интерферометра Маха-Цендера на основе блока деления луча с использованием одномодовых оптических волокон в обоих плечах интерферометра *[4]*, схема которого приведена на рисунке В.2.



1 — источник излучения; *2* — поляризатор; *3* — волоконно-оптический адаптер; *4* — поляризационный светоделитель; *5* — расширитель (коллиматор) пучка; *6* — осветительный микрообъектив 20×; *7* — измеряемые микролинзы; *8* — микрообъектив с увеличением 5×, 10×, 20×, 50×; *9* — зеркало, установленное на ПЭП; *10* — регистрирующее устройство; *11* — полуволновая фазовая пластина

Рисунок В.2 — Схема интерферометра Маха-Цендера на основе блока деления луча с использованием одномодовых оптических волокон в обоих плечах интерферометра

В качестве источника излучения в интерферометрах, как правило, применяют He-Ne лазер (см. рисунок В.2). Используя поляризационный светоделитель, можно осуществлять регулировку интенсивности в обоих плечах интерферометра путем вращения поляризатора. Деление пучка в измерительном и опорном плече интерферометра

осуществляют путем поворота полуволновой фазовой пластинки, расположенной перед поляризационным светоделителем. Поляризованные пучки вводят в одномодовые волокна с последующим расширением излучения на выходе и формированием плоского волнового фронта. Опорную волну объединяют с объектной волной с помощью неполяризационного светоделителя. Поляризацию опорного пучка согласуют с поляризацией объектного пучка путем поворота концов волокон. Падающее на измеряемую микролинзу излучение может быть:

a) со сферическим волновым фронтом для измерения значений аберраций;

b) плоским волновым фронтом путем удаления микрообъектива перед измеряемой микролинзой.

В первом случае используют высококачественный микроскоп с достаточным рабочим отрезком для преобразования падающей плоской волны в идеальную сферическую волну, что позволяет измерять аберрации волнового фронта ∞/f для сопряженных микролинз. Плоский волновой фронт используют для измерений микролинз с небольшой оптической силой и фазовых объектов. Также, применяя плоский волновой фронт, можно определить эффективное фокусное расстояние в центральной зоне измеряемой микролинзы.

Матрицу микролинз закрепляют в подвижку с перемещением в направлениях *x* и *y*. Изображение микролинз матрицы получают на детекторе с помощью микроскопа, оснащенного объективом и тубусной линзой. Объективы *6* и *8*, приведенные на рисунке В.2, имеют одинаковые рабочие отрезки, поэтому необходимо принять специальные меры для того, чтобы избежать систематических ошибок при изменении увеличения. С целью сохранения положения изображения при смене объектива микроскопа тубусную линзу вместе со светоделителем и детектором смещают в осевом направлении одновременно для сохранения плоского волнового фронта излучения на втором светоделителе. Таким образом уменьшают возможность возникновения дополнительных погрешностей в результатах измерений, вызванных неправильным расположением элементов схемы интерферометра.

Интерферометр, показанный на рисунке В.2, оснащен поляризационным блоком деления пучка, с помощью которого можно изменять коэффициент деления и интенсивность излучения.

На рисунках В.3—В.5 показаны примеры изображений для различных настроек интерферометра, приведенного на рисунке В.2. Изображение результата измерений аберраций волнового фронта сферических микролинз приведен на рисунке В.6.

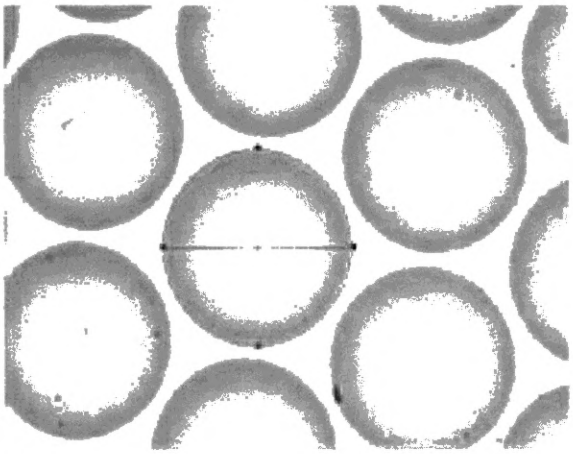


Рисунок В.3 — Изображение зоны измерений микролинз, подсвеченных белым светом

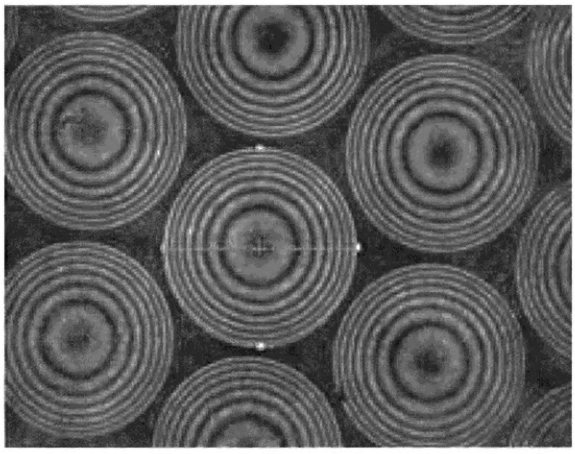
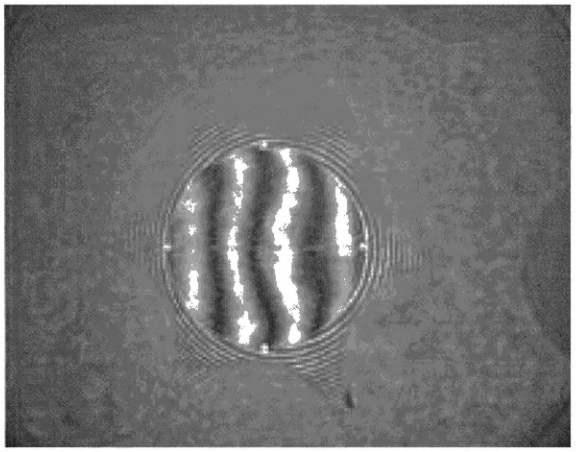
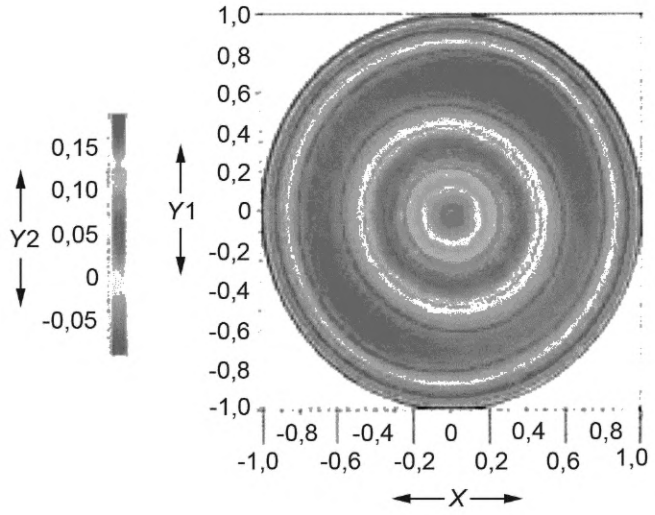


Рисунок В.4 — Изображение интерференционной картины матрицы микролинз в поле плоской волны



Примечание — Интерференционная картина микролинзы со сферической аберрацией.

Рисунок В.5 — Изображение интерференционной картины микролинзы в поле волны со сферическим волновым фронтом



X — нормированный радиус (направление *x*); *Y*1 — нормированный радиус (направление *y*); *Y*2 — фаза/длина волны

Рисунок В.6 — Изображение результата измерений аберраций волнового фронта сферических микролинз по Цернике

Приложение С
(обязательное)

Методы измерений 3 и 4 с применением интерферометра бокового сдвига

С.1 Схема измерений и измерительное оборудование

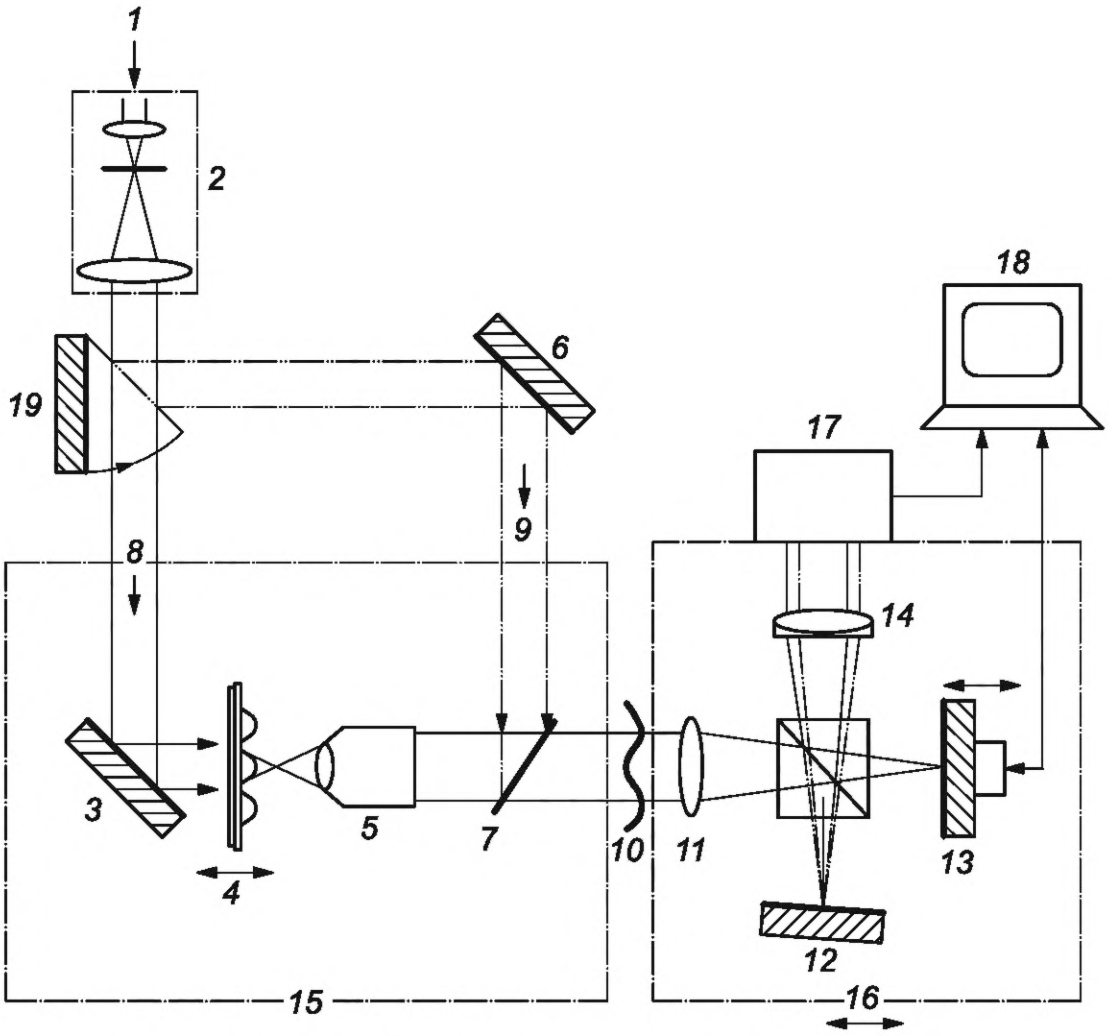
В методе измерений 3 (см. *[5]*) применяют интерферометр бокового сдвига, с помощью которого измеряют аберрации волнового фронта микролинз посредством измерения частных производных волнового фронта в двух ортогональных направлениях с последующей обработкой двух массивов данных.

С.2 Проведение измерений

С.2.1 Метод измерений 3

На рисунке С.1 показан интерферометр бокового сдвига Майкельсона. В интерферометре такой конструкции расширитель формирует параллельный пучок, испускаемый источником оптического излучения. Затем излучение падает на измеряемые микролинзы, которые преобразуют плоский волновой фронт в сферический. С помощью объектива микроскопа с заданной числовой апертурой сферическая волна преобразуется в плоскую. Выходящая волна содержит аберрации волнового фронта, вносимые измеряемой микролинзой. Вспомогательный объектив фокусирует волновой фронт на концевых зеркалах интерферометра Майкельсона. При наклоне одного или обоих зеркал в противоположных направлениях возникающие волновые фронты от вспомогательного объектива сдвигаются в боковом направлении относительно друг друга.

Если осевые расстояния между элементами интерферометра выбраны правильно, то будет получено четкое изображение апертуры микролинзы на матрице детекторов, то есть интерферограмма бокового сдвига. При наклоне зеркала интерферограмма формируется в ортогональном направлении. Фазовые распределения измеряют методами бокового сдвига. Необходимые боковые сдвиги получают перемещением одного из зеркал в осевом направлении с помощью ПЭП. Выполнив обработку двух изображений бокового сдвига, можно определить аберрации волнового фронта. Данным методом также можно измерить положения микролинз и определить эффективное фокусное расстояние путем перемещения микрообъектива между поверхностью микролинз и положением фокуса подвижным механизмом с отсчетным устройством. Для этого применяют канал отраженного оптического излучения *9* с отклоняющим зеркалом *19* (см. рисунок С.1).



Примечание — Входной волновой фронт фокусируется на зеркале с помощью правильно скорректированного объектива с небольшой числовой апертурой. Влияние светоделительного куба на аберрации волнового фронта следует учитывать при выборе вспомогательного объектива.

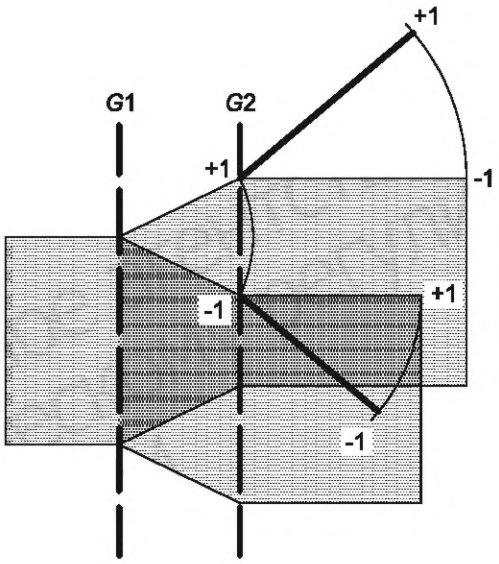
1 — источник излучения; *2* — расширитель пучка; *3* — зеркало; *4* — измеряемые микролинзы; *5* — объектив микроскопа (например, с увеличением 20 × 0,65); *6* — зеркало; *7* — светоделитель пучка; *8* — падающее оптическое излучение; *9* — отраженное оптическое излучение; *10* — аберрированная плоская волна; *11* — вспомогательная линза; *12* — зеркало 1 с возможностью наклона; *13* — зеркало 2 на ПЭП; *14* — объектив, формирующий изображение; *15* — устройство освещения; *16* — устройство фазового сдвига; *17* — матричный детектор; *18* — персональный компьютер; *19* — отклоняющее зеркало

Рисунок С.1 — Схема интерферометра бокового сдвига Майкельсона, в котором боковой сдвиг создают посредством наклона одного из зеркал

С.2.2 Метод измерений 4

Примечание — Для получения дополнительной информации см. *[6]*.

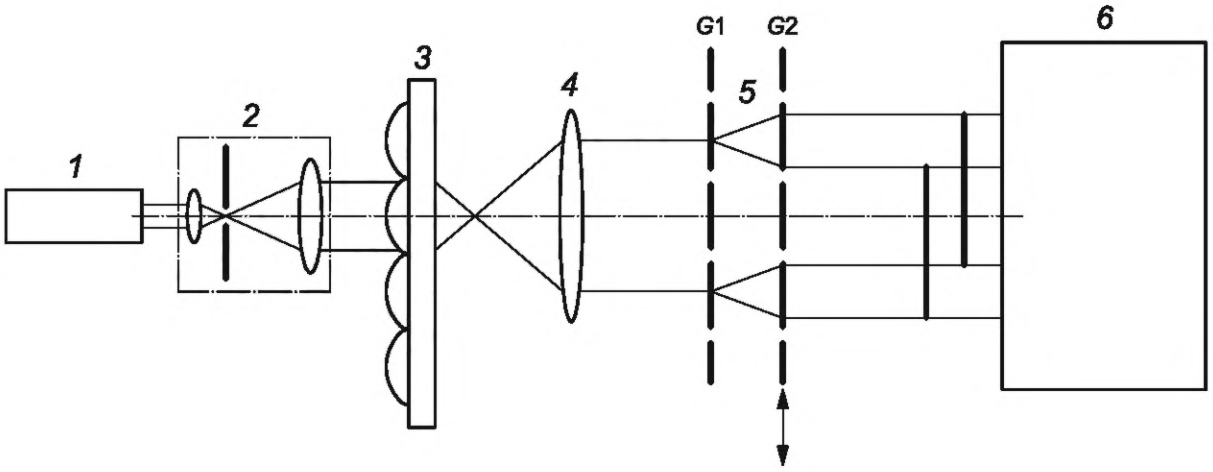
Метод 4 основан на использовании в интерферометре двух дифракционных светоделителей для осуществления бокового сдвига. Схема бокового сдвига на основе последовательного расположения двух фазовых решеток Ронки в интерферометре приведена на рисунке С.2. В этом случае осуществляется сдвиг плоских волн, исходящих от комбинации микролинз и компенсирующего микроскопа. На рисунке С.3 приведена схема интерферометра бокового сдвига для измерений аберраций волнового фронта микролинз на основе симметричного дифракционного устройства сдвига, с отсутствием собственных аберраций.



Примечание — Периодическая фазовая структура обеспечивает боковой сдвиг π для подавления нулевого порядка дифракции.

*G*1 — дифракционная решетка 1; *G*2 — дифракционная решетка 2; +1, –1 — порядок дифракции пучка

Рисунок С.2 — Схема бокового сдвига на основе последовательного расположения двух фазовых решеток Ронки в интерферометре



1 — источник излучения; *2* — расширительный телескоп; *3* — измеряемая матрица микролинз; *4* — объектив микроскопа; *5* — интерферометр бокового сдвига; *6* — регистрирующее устройство; *G*1 — решетка 1; *G*2 — решетка 2

Рисунок С.3 — Схема интерферометра бокового сдвига для измерений аберраций волнового фронта микролинз на основе симметричного дифракционного устройства сдвига, с отсутствием собственных аберраций

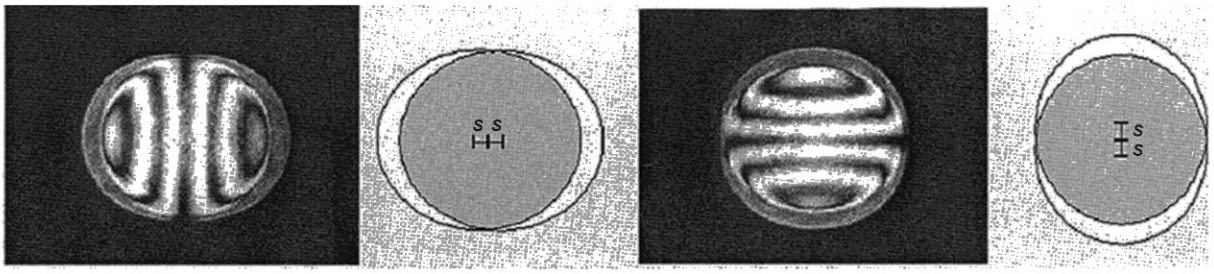
С применением интерферометров бокового сдвига можно фиксировать разность аберраций волнового фронта между поперечно сдвинутыми копиями измеряемого волнового фронта в одном направлении. Необходимо проводить измерения в двух направлениях (см. рисунок С.4) с целью получения возможности измерить аберрации волнового фронта путем определения полиномов. Для этого необходимо установить значение бокового сдвига и направление бокового сдвига. Интерферометр бокового сдвига с дифракционными решетками имеет следующие существенные преимущества:

a) обеспечивает симметричный боковой сдвиг относительно оптической оси;
b) обладает стабильными параметрами, он достаточно простой в использовании;
c) может быть развернут на 90° для получения двух ортогональных интерферограмм;
d) значение бокового сдвига можно регулировать изменением расстояния между решетками;

e) фаза может быть сдвинута путем перемещения одной из решеток относительно другой перпендикулярно к направлению штрихов решеток;

f) простая конструкция, содержащая две плоскопараллельные стеклянные пластины со штрихами, позволяет обеспечить вклад собственных аберраций элементов интерферометра в суммарные аберрации менее 1/20 длины волны.

На рисунке С.4 приведены интерферограммы сдвига, полученные с помощью дифракционного интерферометра бокового сдвига при длине волны 1320 нм в направлениях *x* и *y*.



s — боковой сдвиг

Примечание — Для получения интерферограмм в двух взаимоперпендикулярных направлениях достаточно развернуть комбинацию из двух решеток на 90° вокруг оси.

Рисунок С.4 — Интерферограммы сдвига, полученные с помощью дифракционного интерферометра бокового сдвига при длине волны 1320 нм в направлениях *x* и *y*

Приложение D
(обязательное)

Метод измерений 5 с применением датчика Шака-Гартмана

D.1 Схема измерений и измерительное оборудование

Для измерений аберраций волнового фронта микролинз применяют датчик Шака-Гартмана.

Принцип работы датчика Гартмана основан на разбиении падающего пучка на несколько пучков. Этого достигают применением непрозрачного экрана с матрицей микроотверстий (датчик Гартмана) или матрицы микролинз (датчик Шака-Гартмана).

Распределение плотности мощности (энергии) за матрицей регистрируют детектором, как правило, с ПЗС-матрицей. Сигналы детектора обрабатываются системой сбора и анализа данных на базе персонального компьютера (см. также *ГОСТ Р ИСО 15367-2*).

D.2 Проведение измерений

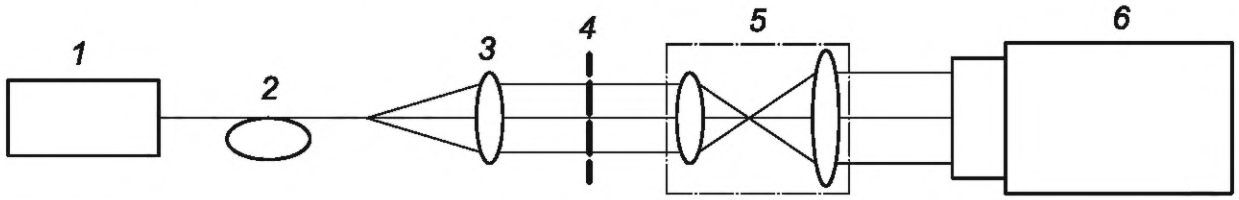
На рисунке D.1 показана схема измерений аберраций волнового фронта с помощью датчика Шака-Гартмана.

Элементы схемы (источник оптического излучения, волокно, коллимирующие линзы, измеряемые микролинзы, расширитель пучка и датчик Шака-Гартмана) располагают коаксиально.

Сначала формируют набор данных для опорного волнового фронта с использованием установки, схема которой приведена на рисунке D.1. Оптическое излучение из волокна коллимируют, пропускают через микроскоп и подают на датчик волнового фронта. Этот опорный волновой фронт содержит данные аберраций оптических устройств, применяемых для расширителя пучка. Аберрации опорного волнового фронта вычитают из суммы измеренных аберраций волнового фронта микролинз и элементов схемы.

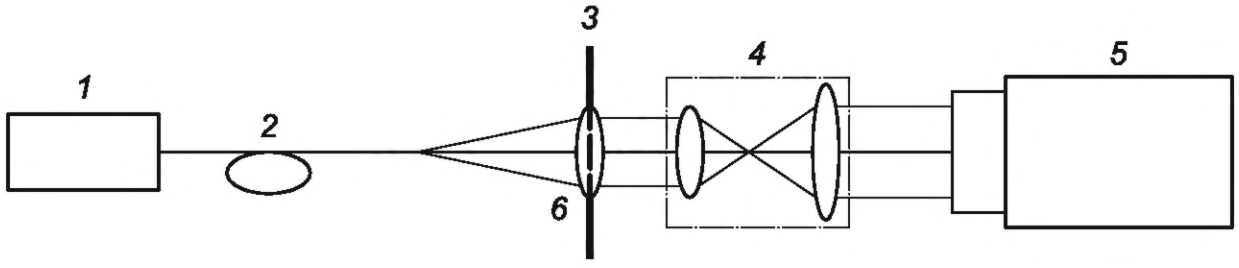
Для измерений применяют схемы двух вариантов в зависимости от оптической силы микролинз. Для измерений микролинз с небольшой оптической силой (то есть числовая апертура *NA* микролинз меньше числовой апертуры *NA* волокна) применяют схему, приведенную на рисунке D.2. В этом случае микролинзы помещают в плоскость формирования изображения, расположенную непосредственно перед расширителем пучка, положение волокна регулируют для коллимации пучка через микролинзы. Аберрации волнового фронта микролинз измеряют с учетом данных опорного волнового фронта, полученных на установке, схема которой приведена на рисунке D.1.

Для измерений «быстрых» микролинз (то есть микролинз с большой оптической силой, где *NA* микролинз больше, чем *NA* волокна) применяют установку, схема которой приведена на рисунке D.3. В этом случае используют дополнительную линзу с оптической силой, соизмеримой с оптической силой измеряемых микролинз. Результат измерений аберраций волнового фронта микролинз получают с учетом данных опорного волнового фронта.



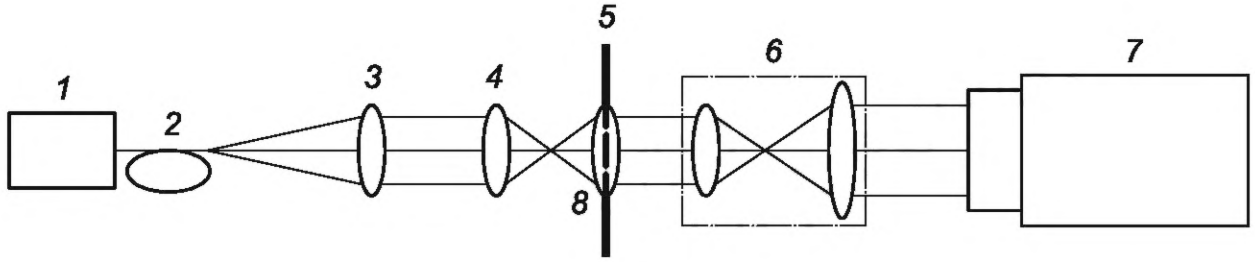
1 — источник излучения; *2* — волокно; *3* — коллиматорная линза; *4* — плоскость изображения; *5* — расширитель пучка; *6* — датчик Шака-Гартмана

Рисунок D.1 — Схема установки для измерений опорного волнового фронта



1 — источник излучения; *2* — волокно; *3* — апертура; *4* — расширитель пучка; *5* — датчик Шака-Гартмана; *6* — измеряемые «медленные» микролинзы

Рисунок D.2 — Схема установки для измерений аберраций волнового фронта «медленных» микролинз



1 — источник излучения; *2* — волокно; *3* — коллимирующая линза; *4* — дополнительная линза; *5* — апертура; *6* — расширитель пучка; *7* — датчик Шака-Гартмана; *8* — измеряемые «быстрые» микролинзы

Рисунок D.3 — Схема установки для измерений аберраций волнового фронта «быстрых» микролинз

Приложение Е
(обязательное)

Метод измерений с применением интерферометра Тваймана-Грина

Е.1 Схема измерений и измерительное оборудование

Аберрации волнового фронта матрицы микролинз определяют с применением интерферометра Тваймана-Грина методом измерений 1.

Е.2 Проведение измерений

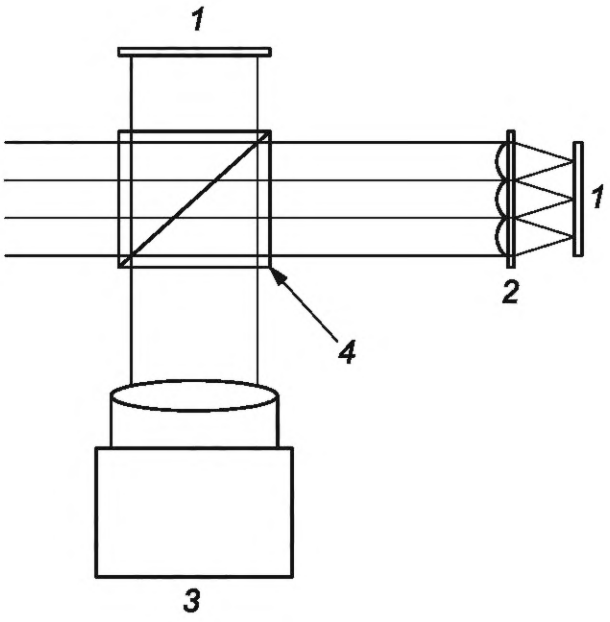
На рисунке Е.1 показана схема интерферометра Тваймана-Грина для измерений волнового фронта матрицы микролинз. Параллельный пучок от источника оптического излучения расширяется телескопической системой, проходит через полуволновую фазовую пластину и падает на поляризационный светоделитель. На поляризационном светоделителе пучок разделяется на два пучка. *p*-поляризованный пучок проходит поляризационный светоделитель, четвертьволновую фазовую пластину, отражается от зеркала ПЭП. Затем он преобразуется четвертьволновой пластиной в *s*-поляризованный пучок и отражается от поляризационного светоделителя.

s-поляризованный пучок, отраженный от поляризационного светоделителя, после прохождения через другую четвертьволновую пластину падает на измеряемую матрицу микролинз. Затем пучок отражается на плоском зеркале и снова проходит матрицу микролинз, преобразуясь в *p*-поляризованный пучок четвертьволновой пластиной. На поляризационном светоделителе происходит наложение обоих пучков друг на друга. Изображение интерференционного поля двух наложенных волновых фронтов формируется на датчике изображения линзой формирования изображения после прохождения поляризатора. Боковые сдвиги получают путем приложения напряжения к ПЭП, прикрепленному к опорному зеркалу.

В результате получают сумму четных аберраций волнового фронта измеряемой матрицы микролинз и аберраций волнового фронта интерферометра. Далее применяют способ вычитания из суммы аберраций волнового фронта матрицы микролинз и интерферометра, приведенный в приложении D.

Источник излучения, расширитель луча, ограничитель апертуры, первая и вторая линзы, измеряемая матрица микролинз, зеркала, линза формирования изображения и датчик изображения должны быть установлены на одной оптической оси.

На рисунке Е.1 приведена схема интерферометра Тваймана-Грина для измерений только четных аберраций волнового фронта микролинз. Это означает, что правильно выполнить измерения интерферометром Тваймана-Грина можно только сферических аберраций, для измерений комы его не применяют. Причиной такого ограничения является инверсия пути оптического излучения после отражения сфокусированных микролинзами лучей на плоском зеркале.



1 — зеркало; *2* — измеряемая матрица микролинз; *3* — датчик; *4* — поляризационный светоделитель пучка

Рисунок Е.1 — Схема интерферометра Тваймана-Грина для измерений четных аберраций волнового фронта матрицы микролинз

Приложение F
(обязательное)

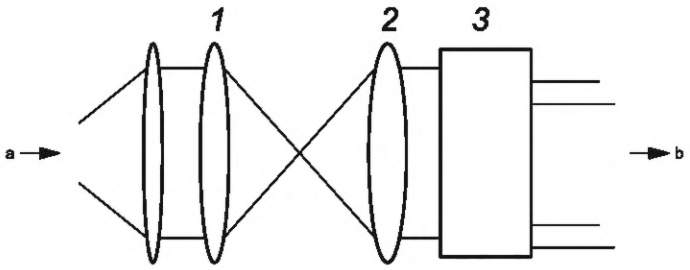
Измерение однородности матрицы микролинз

F.1 Схема измерений и измерительное оборудование

Однородность матрицы микролинз измеряют методом 2 с помощью матрицы компьютерно-синтезированных голограмм (КСГ) или дифракционных оптических элементов (ДОЭ), которые формируют идеальный сферический волновой фронт. Для измерений рекомендуется применять интерферометр бокового сдвига или однопроходовый интерферометр Маха-Цендера.

F.2 Проведение измерений

Интерферометры бокового сдвига применяют для определения аберраций волнового фронта матрицы микролинз (см. рисунок F.1) в случае, когда диаметр одиночных микролинз меньше шага в матрице.

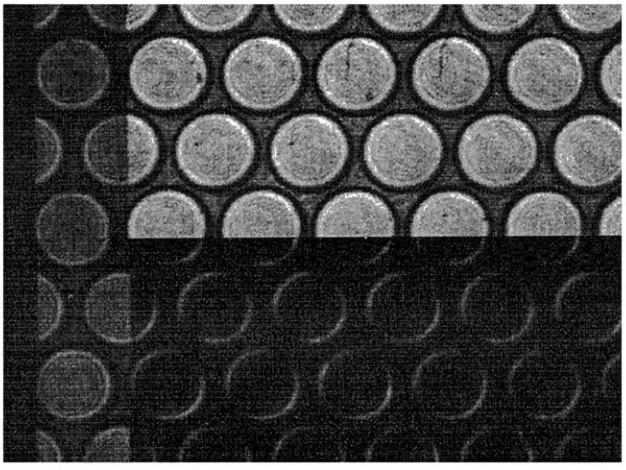


[a] Направление от источника излучения.
[b] Направление к детектору.

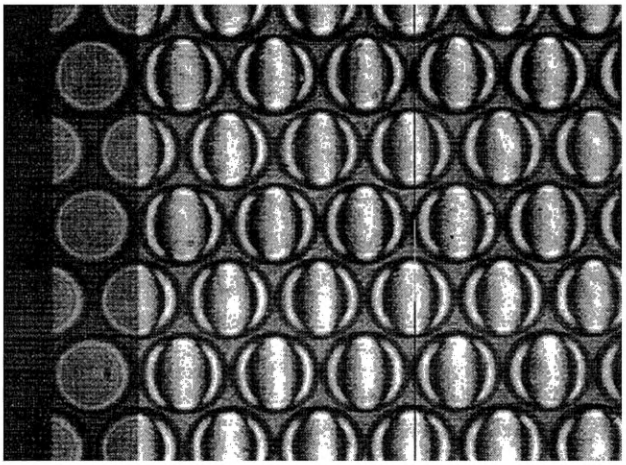
1 — вспомогательные оптические устройства; *2* — измеряемая матрица микролинз; *3* — интерферометр бокового сдвига

Рисунок F.1 — Схема измерений однородности матрицы микролинз с применением интерферометра бокового сдвига

Для плотно упакованных матриц учитывают возможность сдвига изображений микролинз на один шаг в матрице и сравнивают таким образом соседние микролинзы матрицы путем определения разности аберраций волнового фронта соседних микролинз. Поэтому данный метод применяют только для измерений однородности матрицы микролинз (см. рисунок F.2).



а) Точное совпадение изображений микролинз в матрице

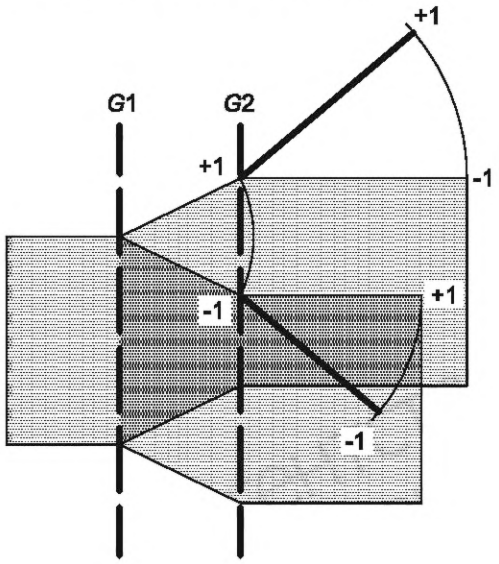


b) Сдвиг изображений микролинз на один шаг в матрице [по сравнению с рисунком а)], показывающий сферические аберрации

Примечание — На левом крае интерферограммы показан сдвиг микролинз на один шаг в матрице.

Рисунок. F.2 — Примеры интерферограмм, полученных по результатам измерений однородности путем сдвига изображений микролинз на один шаг в матрице

Выбор интерферометра бокового сдвига осуществляют с учетом того, что на точность измерений влияют аберрации волнового фронта, возникающие в результате несовершенства самого интерферометра. На рисунке F.3 показана схема бокового сдвига на основе последовательного расположения двух фазовых решеток Ронки в интерферометре. В таких решетках четные порядки отсутствуют и нулевой порядок подавляется выбором подходящей глубины травления поверхности. Значение бокового сдвига может изменяться в зависимости от расстояния между решетками, и их боковой сдвиг, перпендикулярный к канавкам решетки, обеспечивает необходимый фазовый сдвиг для формирования интерференционной картины. Интерферометр оснащен только двумя решетками с рельефной поверхностью, поэтому прибор имеет аберрации менее λ/20-уровня.



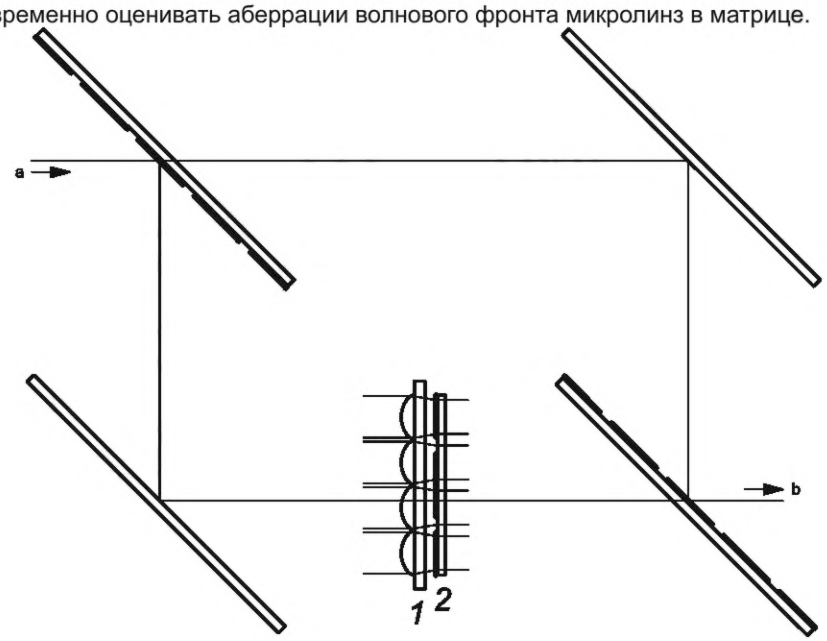
*G*1 — дифракционная решетка 1; *G*2 — дифракционная решетка 2; +1, –1 — порядок дифракции пучка

Рисунок F.3 — Схема бокового сдвига на основе последовательного расположения двух фазовых решеток Ронки

F.3 Одновременное измерение аберраций волнового фронта матрицы микролинз

При измерениях аберраций волнового фронта происходит облучение измеряемой микролинзы идеальной сферической волной или компенсация кривизны сферического волнового фронта вспомогательной эталонной линзой или элементом, подобным КСГ. Матрицу измеряют в целом, поэтому шаг микролинз в матрице и шаг КСГ в матрице должны совпадать. На рисунке F.4 показана схема измерений с применением интерферометра Маха-Цен-

дера, в которой КСГ компенсирует кривизну фронта сферической волны, оставляя только аберрации микролинз матрицы. Для оценки полученных интерферограмм следует применять специальное программное обеспечение, позволяющее одновременно оценивать аберрации волнового фронта микролинз в матрице.



[a] Направление от источника излучения.
[b] Направление к источнику излучения.

Примечание — Шаг двух микролинз в матрице должен быть одинаковым.

1 — измеряемая матрица микролинз; *2* — матрица КСГ

Рисунок F.4 — Схема измерений с применением интерферометра Маха-Цендера и матрицы КСГ, компенсирующей кривизну фронта сферической волны

Приложение ДА
(справочное)

Сведения о соответствии ссылочных национальных стандартов международным стандартам, использованным в качестве ссылочных в примененном международном стандарте

Таблица ДА.1

Обозначение ссылочного национального стандарта	Степень соответствия	Обозначение и наименование ссылочного международного стандарта
ГОСТ Р 8.745—2011/ ISO/TR 14999-2:2005	IDT	ISO/TR 14999-2:2005 «Оптика и фотоника. Интерферометрическое измерение оптических элементов и систем. Часть 2. Методы измерения и оценки»
ГОСТ Р 59743.1—2021 (ИСО 14880-1:2019)	MOD	ISO 14880-1:2019 «Оптика и фотоника. Матрицы микролинз. Часть 1. Словарь»
ГОСТ Р ИСО 15367-2—2012	IDT	ISO 15367-2:2005 «Лазеры и лазерное оборудование. Методы испытания для определения формы волнового фронта лазерного луча. Часть 2. Датчики Шака-Гартмана»

Примечание — В настоящей таблице использованы следующие условные обозначения степени соответствия стандартов:
- IDT — идентичные стандарты;
- MOD — модифицированный стандарт.

Библиография

[1] SCHWIDER, J., and SICKINGER, H., Array tests for microlenses. Optik 107(1), 1997, pp. 26—34

[2] HERZIG, H.P., (ed), Micro-Optics: Elements, systems and applications. Taylor & Francis Ltd, London, 1997

[3] MALACARA, D., Optical shop testing, Wiley & sons, 1992

[4] SICKINGER, H., SCHWIDER, J., and MANZKE, B., Fiber based Mach-Zehnder interferometer formeasuring wave aberrations of microlenses. Optik, 110, 1999, pp. 239—243

[5] SICKINGER, H., FALKENSTÖRFER, O., LINDLEIN, N., and SCHWIDER, J., Characterisation of microlenses using a phase-shifting shearing interferometer. *Opt. Eng*. 33, 1994, pp. 2680—2686

[6] SCHREIBER, H., and SCHWIDER, J., A lateral shearing interferometer based on two Ronchi-phase gratings in series. *Appl. Opt.*, 36, 1997, pp. 5321—5324

УДК 537.872:006.354 ОКС 31.260

Ключевые слова: оптика и фотоника, матрица микролинз, методы измерений аберраций волнового фронта

Редактор *Н.В. Таланова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *Л.С. Лысенко*
Компьютерная верстка *И.А. Налейкиной*

Сдано в набор 14.07.2022. Подписано в печать 01.08.2022. Формат 60×84⅛. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 3,26. Уч.-изд. л. 2,77.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

Создано в единичном исполнении в ФГБУ «РСТ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru