

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ ОБЪЕКТА В ЛАЗЕРНОМ СКАНИРУЮЩЕМ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНО-ФАЗОВОМ АБЕРРОМЕТРЕ

© 2008 г. В. И. Григорук; Ю. В. Пильгун; Е. Н. Смирнов

Киевский национальный университет им. Тараса Шевченко, Киев, Украина

На примере линзы проанализирована проблема точного расположения объекта в фокусе оптической схемы гетеродинного дифференциально-фазового интерферометра со сканированием пучков по полю. Получено теоретическое выражение для дифференциально-фазового портрета линзы. Предложено способ исключения погрешности, связанной с неточным расположением исследуемого объекта в фокальной плоскости объектива, методом проведения нескольких измерений фазы при контролируемом смещении гетеродинного фотоприемника в поперечном направлении. Проведена экспериментальная проверка, которая показала соответствие теоретических расчетов результатам измерения оптической силы линз.

Коды OCIS: 220.1000, 120.3180.

Поступила в редакцию 03.03.2008.

Введение

Точный контроль качества оптических элементов все еще представляет сложную прикладную задачу. Для измерения искажений волнового фронта, внесенных оптической системой, наиболее часто используются интерферометрические методы. Однако эти методы требуют трудоемкой процедуры юстировки и весьма чувствительны к вибрациям. Исследование асферических поверхностей с помощью классических интерферометров представляет некоторые трудности из-за высокой плотности интерференционных полос. В таких случаях приходится использовать компенсирующие элементы, подогнанные под конкретный класс измеряемых объектов.

Альтернативные методы измерения, использующие датчики Шака–Гартмана, имеют другие недостатки, среди которых ограниченное разрешение и низкая чувствительность. Поперечное разрешение таких датчиков определяется размером используемых микролинз, количество которых относительно небольшое: массив микролинз обычно сформирован в виде матрицы размером порядка 30 на 30 линз.

Разработка гетеродинного дифференциально-фазового интерферометра предлагает новые возможности для высокоточного контроля качества оптических элементов. Измерение фазового сдвига между двумя близко расположенными сканирующими пучками позволяет зарегистрировать разницу оптического хода лучей величиной до тысячных долей длины волны света [1–3]. В то же время метод практически нечувствителен к продольным вибрациям [4, 5]. Поперечное разрешение интерферометра ограничено диаметром сфокусированных измерительных пучков и, учитывая свойства сканирующей системы, позволяет получить поле скани-

рования порядка 500 на 500 разрешимых точек. Поперечный размер сфокусированного пятна зависит от параметров формирующей оптической системы и может варьироваться в зависимости от объектива в пределах от микрометра до десятков микрометров для видимого диапазона. При этом продольная чувствительность по измерению длины оптического хода лучей остается на несколько порядков выше и составляет тысячные доли длины волны света. При этом, поскольку измерительные пучки проходят через оптическую схему по очень близким путям, достигается высокая вибрационная защищенность: продольные вибрации действуют на оба пучка практически одинаково, а измеряемой величиной является разность хода между пучками. Таким образом, продольная виброзащищенность обеспечивается особенностями метода измерения, а требования к виброзащищенности в поперечном направлении существенно ниже, поскольку поперечное разрешение ограничено размером пятна и не превышает длины волны света.

Данные, полученные с помощью дифференциально-фазового интерферометра, соответствуют производной по координате от функции оптической толщины объекта, а не самой функции, потому необходимо интегрирование данных для получения интересующей нас функции толщины. Но для случая измерения параметров линзы, можно избежать процедуры интегрирования. Поскольку оптическая сила линзы пропорциональна второй производной функции оптической толщины, величину оптической силы сферической линзы можно получить расчетным путем из ее дифференциально-фазового портрета без интегрирования. Существуют также методы получения коэффициентов Цернике непосредственно из наклонов волнового фронта [6].

В данной работе рассматривается проблема необходимости точного расположения исследуемого объекта в фокальной плоскости объектива сканирующего дифференциально-фазового интерферометра. При неконтролируемом смещении объекта вдоль оптической оси возникают ошибки измерения профиля объекта. Для случая, когда объектом является линза, это выражается в неточности определения оптической силы линзы. Устранить такую неточность не представляется возможным, поскольку нет критерия, который бы позволил по результатам измерений определить, точно или не точно был установлен объект в системе. Однако для примера исследования линзы нашлись пути обойти эту проблему и корректно измерить оптическую силу линзы даже при неточном ее расположении в фокусе измерительной системы. В работе предлагается доработка схемы измерений, которая позволяет использовать дифференциально-фазовый интерферометр для определения оптической силы линз и их aberrаций.

Линза выбрана в качестве объекта исследования для упрощения теоретического рассмотрения. Несмотря на неточность описания сферической линзы параболическим фазовым профилем, полученные выводы, в том числе предложенный способ корректировки неточности фокусировки, могут быть использованы и для более сложных объектов.

Схема гетеродинного дифференциально-фазового интерферометра

Схема интерферометрической установки для дифференциально-фазовых измерений показана на рис. 1. Свет лазера коллимируется конфокальной системой К и проходит через акустооптический дефлектор (АОД). Дефлектор управляется двумя близкими частотами ω_1 и ω_2 так, что свет дифрагирует на двух акустических волнах, и одновременно два пучка первого порядка дифракции выходят из дефлек-

тора. Углы отклонения пучков пропорциональны управляющим частотам, сканирование достигается одновременным изменением частот ω_1 и ω_2 . Во время сканирования разность частот $(\omega_2 - \omega_1)$ поддерживается постоянной и после прохождения линзы L_1 пучки фокусируются на объекте Т разнесенными на небольшое расстояние Δx . После прохождения объекта пучки приобретают разный фазовый сдвиг. Разница этих фазовых набегов пропорциональна разнице оптического хода лучей, внесенного объектом в точках, разнесенных на расстояние Δx . Линза L_2 сводит разнесенные пучки на диафрагме D_0 , расположенной в плоскости детектирования ξ перед фотоприемником П. Линзы L_1 и L_2 расположены так, что расстояние между ними равно их фокусному расстоянию F . Это обеспечивает преобразование сканирования после АОД по углу в линейное сканирование по объекту и последующее обратное сведение пучков на фотодетектор. Оптические частоты обоих сканирующих лучей сдвигаются АОД, поэтому в плоскости фотоприемника образуется интерференционная картина, меняющаяся во времени на промежуточной частоте $(\omega_2 - \omega_1)$. Ток гетеродинного фотодетектора $I(t)$ может быть записан как

$$I(t) \sim A \cos[(\omega_2 - \omega_1)t + \Delta\varphi], \quad (1)$$

где A – амплитуда фототока, t – время, а фазовый сдвиг электрического сигнала $\Delta\varphi$ отображает оптическую разность фаз между сканирующими пучками. Фазовый сдвиг измеряется фазовым детектором ФД относительно опорного сигнала той же частоты $(\omega_2 - \omega_1)$. Опорный сигнал можно получить непосредственным смешиванием управляющих частот ω_1 и ω_2 . Измеренный фазовый сдвиг характеризует поведение объекта для одного положения пары пучков. Полный дифференциально-фазовый портрет объекта можно измерить путем синхронного изменения частот ω_1 и ω_2 , при котором будет соответствующим образом меняться координата x пары сканирующих пучков.

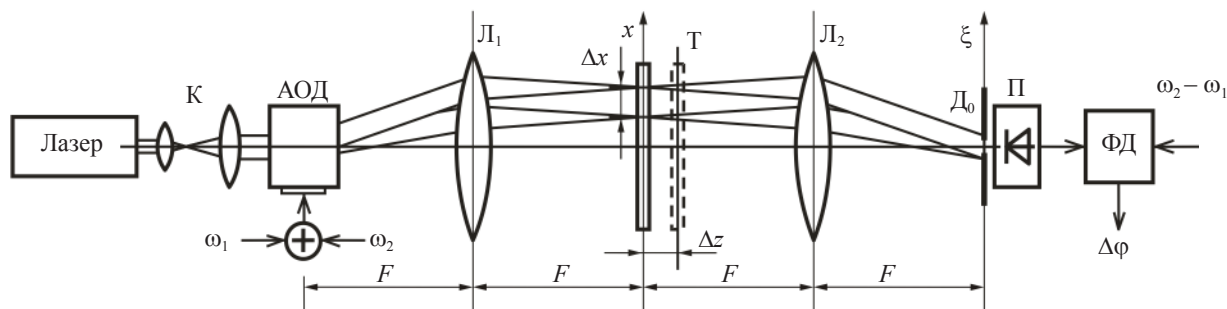


Рис. 1. Оптическая схема сканирующего дифференциально-фазового интерферометра.

Теория формирования дифференциально-фазового сигнала

Величина выходного тока детектора определяется распределением светового поля в его плоскости. Используя комплексное представление, распределение светового поля для каждого из сканирующих пучков может быть записано как

$$\begin{aligned} E_1(x, y, t) &= \text{Re}[\mathbf{A}_1(x, y) \exp(i 2\pi\nu_1 t)], \\ E_2(x, y, t) &= \text{Re}[\mathbf{A}_2(x, y) \exp(i 2\pi\nu_2 t)], \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1(x, y) &= A_1(x, y) \exp[i\varphi_1(x, y)], \\ \mathbf{A}_2(x, y) &= A_2(x, y) \exp[i\varphi_2(x, y)]. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь $\mathbf{A}_1(x, y)$ и $\mathbf{A}_2(x, y)$ – комплексные амплитуды поля в зависимости от координат x, y для каждого из пучков света, состоящие из значения по модулю A_1, A_2 и фаз φ_1, φ_2 . E_1 и E_2 – напряженности электрического поля излучения. Оптические частоты ν_1 и ν_2 сканирующих пучков различны благодаря сдвигу, внесенному АОД. Меняющаяся во времени компонента тока детектора для некоторой точки на фотодетекторе, вызванная интерференцией пучков, записывается следующим выражением

$$dI(x, y, t) = \text{Re}[U(x, y) \exp(i 2\pi(\nu_2 - \nu_1)t)], \quad (4)$$

где

$$U(x, y) = \mathbf{A}_1^*(x, y) \mathbf{A}_2(x, y). \quad (5)$$

Здесь \mathbf{U} – комплексная амплитуда тока фотодетектора, которая может быть найдена как произведение комплексно сопряженной величины поля света для одного пучка \mathbf{A}_1 на поле второго пучка \mathbf{A}_2 . Разница частот оптических пучков равна разности управляющих частот, подаваемых на АОД, т. е. $\nu_2 - \nu_1 = (\omega_2 - \omega_1)/2\pi$. Суммарный ток фотодетектора определяется интегрированием в пределах диафрагмы

$$I(t) \sim \text{Re} \left[\exp(i(\omega_2 - \omega_1)t) \iint_{D_0} U(x, y) dx dy \right], \quad (6)$$

D_0 – рабочая область фотодетектора

Фазовый детектор измеряет фазу сигнала

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \arg \left[\int_{D_0} U ds \right] \text{ или} \\ \Delta\varphi &= \arg \left[\int_{D_0} \mathbf{A}_1^* \mathbf{A}_2 ds \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

* В данной статье жирным шрифтом выделены комплексные величины.

Для того чтобы получить выражение для дифференциально-фазового портрета объекта, мы должны найти распределение полей \mathbf{A}_1 и \mathbf{A}_2 в плоскости детектора для каждого из сканирующих пучков.

Комплексное поле в плоскости детектора определяется распределением поля в плоскости объекта и связано с ним преобразованием Фурье [7]

$$\mathbf{A}(\xi, \eta) = \frac{1}{i\lambda F} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{a}(x, y) \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda F} (x\xi + y\eta) \right] dx dy, \quad (8)$$

где x, y и ξ, η – координаты в плоскости объекта и фотодетектора соответственно, F – фокусное расстояние линзы, формирующей изображение, λ – длина волны.

Поле $\mathbf{a}(x, y)$ непосредственно после объекта состоит из двух множителей

$$\mathbf{a}(x, y) = \mathbf{g}(x - x_0, y) \mathbf{T}(x, y), \quad (9)$$

где $\mathbf{T}(x, y)$ есть комплексная функция пропускания линзы, а $\mathbf{g}(x - x_0, y)$ есть распределение светового поля сканирующего пучка, попадающего на объект в точке x_0 .

Для двух пучков, совместно сканирующих объект, можно получить зависимость измеряемой фазы от положения пучков. Если расстояние между пучками Δx сохраняется постоянным, $x_1 = x_{12} - \Delta x/2$ и $x_2 = x_{12} + \Delta x/2$, измеряемая фаза $\Delta\varphi(x_{12})$ может быть описана следующим выражением:

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_1(\xi, \eta) &= \frac{1}{i\lambda F} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{g}(x - x_{12} + \Delta x/2, y) \mathbf{T}(x, y) \times \\ &\times \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda F} (x\xi + y\eta) \right] dx dy, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_2(\xi, \eta) &= \frac{1}{i\lambda F} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \mathbf{g}(x - x_{12} - \Delta x/2, y) \mathbf{T}(x, y) \times \\ &\times \exp \left[-i \frac{2\pi}{\lambda F} (x\xi + y\eta) \right] dx dy, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\Delta\varphi(x_{12}) = \arg \left[\int_{D_0} \mathbf{A}_1^* \mathbf{A}_2 ds \right], \quad (12)$$

где $\Delta\varphi$ – измеряемая разность фаз, Δx – разнесение между пучками, x_{12} – координата пары сканирующих пучков, s – площадь рабочего участка фотодетектора, который ограничивается диафрагмой.

Если известны конфигурация объекта и распределение полей сканирующих пучков, то можно вычислить дифференциально-фазовый портрет объекта и сравнить его с данными измерений.

Дифференциально-фазовый портрет линзы

Комплексная функция пропускания линзы может быть достаточно точно описана следующим выражением с квадратичной зависимостью фазы [7]

$$T_L = \exp \left[-i \frac{\pi}{\lambda F_L} (x^2 + y^2) \right], \quad (13)$$

где F_L – фокусное расстояние линзы. Принимая во внимание дифференциальный характер метода, можно сразу заключить, что дифференциально-фазовый портрет линзы должен содержать линейную зависимость измеряемой фазы $\Delta\phi$ от координаты сканирования x_{12} . Коэффициент наклона этой зависимости пропорционален оптической силе линзы. Такой вывод можно сделать исходя из того, что производная квадратичной функции фазы объекта есть функция линейная.

Рассмотрим случай гауссовых сканирующих пучков и попытаемся найти дифференциально-фазовый портрет линзы. Комплексное поле гауссова пучка согласно [8] описывается как

$$g(x, y, z) = \frac{w_0}{w(z)} \exp \left[-\frac{x^2 + y^2}{w^2(z)} + i \frac{\pi}{\lambda R(z)} (x^2 + y^2) \right] \quad (14)$$

при

$$w^2(z) = w_0^2 \left(1 + z^2/z_0^2 \right), \\ R(z) = z \left(1 + z_0^2/z^2 \right), \quad z_0 = \pi w_0^2/\lambda.$$

Здесь w_0 – размер пучка в перетяжке, а z_0 – длина перетяжки. Используя зависимость профиля пучка от координаты z , учитывается возможное продольное смещение Δz исследуемой линзы относительно фокуса измерительной системы.

Для гауссовых пучков и для функции пропускания объекта с квадратичной зависимостью фазы распределение светового поля в плоскости детектора может быть найдено вычислением интегралов Фурье (13) и (14), которые упоминались ранее. Результирующая амплитуда и фаза гетеродинного сигнала $\mathbf{A}_1^* \mathbf{A}_2$ записывается как

$$|\mathbf{A}_1^* \mathbf{A}_2| = \frac{1}{F^2} \frac{F_L^2 (z_0^2 + \Delta z^2)}{z_0^2 + (F_L - \Delta z)^2} \exp \left\{ -2 \frac{F_L^2}{z_0^2 + (F_L - \Delta z)^2} \frac{(x_{12} F/F_L + \xi)^2 + \eta^2 + (F^2/F_L^2) (\Delta x^2/4)}{(\lambda/\pi)^2 (F/w_0)^2} \right\} \quad (15)$$

$$\arg [\mathbf{A}_1^* \mathbf{A}_2] = -\frac{2\pi}{\lambda} \frac{(F_L - \Delta z)}{z_0^2 + (F_L - \Delta z)^2} \Delta x x_{12} - \frac{2\pi}{\lambda F} \frac{F_L (F_L - \Delta z)}{z_0^2 + (F_L - \Delta z)^2} \Delta x \xi. \quad (16)$$

Комплексный гетеродинный сигнал описывается распределением амплитуды (15) и фазы (16). Амплитудное распределение определяет интенсивность гетеродинного сигнала на детекторе и устанавливает предел возможности измерения фазы исходя из допустимого уровня шумов. В свою очередь, фазовое распределение несет информацию непосредственно об исследуемой линзе.

Из (16) следует, что распределение амплитуды гетеродинного сигнала в плоскости фотодетектора зависит как от фокусного расстояния исследуемой линзы, так и от ее смещения вдоль оптической оси измерительной системы. Соответственно, и размер видимого участка (V) зависит от этих параметров. Длина строки сканирования вдоль x_{12} , где уровень сигнала позволяет провести измерение фазы, можно оценить с помощью следующей формулы:

$$V \sim \frac{\lambda F}{\pi w_0} \sqrt{\frac{z_0^2 + (F_L - \Delta z)^2}{2 F_L^2}}. \quad (17)$$

Распределение фазы (16) гетеродинного сигнала есть линейная функция от координаты пары сканирующих лучей x_{12} . Выражение для фазы может быть переписано как

$$\arg [\mathbf{A}_1^* \mathbf{A}_2] = -B k x_{12} - B \frac{F_L}{F} k \xi, \quad (18)$$

где $B = (2\pi/\lambda)\Delta x$ и

$$k = \frac{F_L - \Delta z}{z_0^2 + (F_L - \Delta z)^2}. \quad (19)$$

Коэффициент наклона k дифференциально-фазовой характеристики зависит от фокусного расстояния

исследуемой линзы F_L . Благодаря этому можно получить значение F_L путем измерения коэффициента наклона. Однако, строго говоря, коэффициент k зависит от разности $(F_L - \Delta z)$ – разницы между фокусным расстоянием и смещением измеряемой линзы относительно фокуса объектива L_1 , а не от самого F_L . То есть невозможно получить истинное значение фокусного расстояния F_L , изменяя положение пучков x_{12} и вычисляя коэффициент k из измерений фазы, если нам не известно точное значение смещения линзы Δz . Таким образом, напрашивается вывод, что возможность точного измерения фокусного расстояния исследуемой линзы в реальном устройстве сильно зависит от точности расположения линзы Δz в фокусе измерительной системы. Одновременно коэффициент наклона зависит от длины перетяжки пучка z_0 . Это накладывает дополнительное ограничение на минимальное фокусное расстояние F_L , которое может быть измерено (рис. 2).

Однако распределение фазы гетеродинного сигнала также линейно зависит от положения детектора в плоскости регистрации (см. второй член выражения (18)). Коэффициент наклона этой зависимости пропорционален произведению коэффициента k на F_L . Таким образом, есть возможность получить истинное значение фокусного расстояния измеряемой линзы, взяв отношение коэффициента наклона дифференциально-фазовой характеристики вдоль направления в плоскости детектора ξ к коэффициенту вдоль направления сканирования x_{12} . Если подставить обозначения $K_x = Bk$ и $K_\xi = B \frac{F_L}{F} k$ в выражение (18), оно преобразуется в

$$\arg[\mathbf{A}_1^* \mathbf{A}_2] = -K_x x_{12} - K_\xi \xi. \quad (20)$$

Из отношения коэффициентов при x_{12} и ξ можно определить интересующее нас фокусное расстояние исследуемой линзы

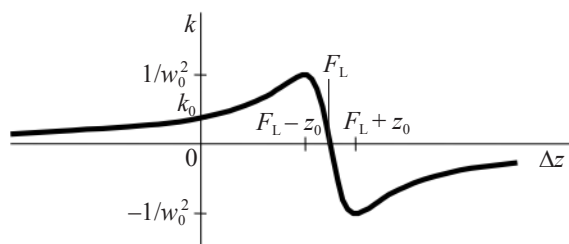


Рис. 2. Зависимость коэффициента наклона дифференциально-фазовой характеристики от смещения линзы относительно фокуса объектива L_1 .

$$\frac{K_\xi}{K_x} = \frac{B(F_L/F)k}{Bk} = F_L/F. \quad (21)$$

При этом фокусное расстояние F_L , полученное таким способом, не будет зависеть от смещения Δz , хотя каждый из коэффициентов K_ξ и K_x , взятый отдельно, зависит от неизвестного смещения Δz .

Отметим, что фаза, которую мы можем измерить, определяется интегрированием гетеродинного сигнала (15) и (16) по диафрагме D_0

$$\Delta\varphi = \arg \left[\int_{D_0} \mathbf{A}_1^* \mathbf{A}_2 ds \right]. \quad (22)$$

Расположив тонкую щелевую диафрагму, ориентированную перпендикулярно к направлению расщепления пучков, становится возможным измерить фазу гетеродинного сигнала $\Delta\varphi(x_{12}, \xi) = \arg[\mathbf{A}_1^* \mathbf{A}_2]$ для определенной координаты ξ . Перемещая диафрагму и сканируя пучками поверхность исследуемой линзы для каждого положения диафрагмы, можно получить оба коэффициента наклона дифференциально-фазового портрета, необходимые для определения действительного фокусного расстояния линзы.

Экспериментальная установка

Для проверки выражений (17) и (18) был поставлен эксперимент. Оптическая схема экспериментальной установки идентична изображенной схеме на рис. 1. В качестве источника света использован гелий-неоновый лазер (0,6328 мкм) со стабилизацией частоты. Отклонение пучков и сканирование ими по объекту осуществлялось АОД на парателлурите. Диапазон отклоняющих частот 90–100 МГц, частота расщепления – 100 кГц. Диаметр перетяжки сфокусированного на объекте сканирующего пучка, составлял около 24 мкм. Заднее фокусное расстояние линзы L_2 , формирующей изображение на фотодетекторе, равнялось 193 мм. Детектор перемещался перпендикулярно к оптической оси столиком с электроприводом, дискретность позиционирования составляла 50 мкм. Опорная частота для цифрового фазового детектора была получена за счет электричества смещения подаваемых на АОД управляющих частот. Управление акустооптическим устройством, столиком и оцифровка данных осуществлялась персональным компьютером.

Измерения

Во время эксперимента было проведено две серии измерений. Сначала исследовались линзы с относительно коротким фокусным расстоянием

для определения поведения дифференциально-фазового портрета в области смещений линзы Δz , близких к точке исчезновения сигнала $-\Delta z = F_L$. Во второй серии исследовался набор линз известной оптической силы, для каждой экспериментально измерялось фокусное расстояние. В качестве эталонных применялись линзы из набора оптической скамьи ОСК-2.

Для обеих серий исследуемая линза помещалась в разных положениях вдоль оптической оси. Сдвигая детектор в поперечном к оси направлении, измерялся набор дифференциально-фазовых портретов. Для каждого положения линзы линейной аппроксимацией определялись два коэффициента наклона – коэффициент наклона дифференциально-фазового портрета в направлении сканирования x_{12} и коэффициент наклона в направлении сдвига детектора ξ . Фокусное расстояние линзы определялось из отношения полученных коэффициентов наклона. При этом для калибровки использовалась линза с известным фокусным расстоянием.

Зависимости измеренных значений коэффициента k от смещения линзы и соответствующие фокусные расстояния для первой серии измерений показаны на рис. 3 и 4. Как видно из рис. 3, измеренный коэффициент наклона k хорошо совпадает с теоретически вычисленным по формуле (19). Полученное фокусное расстояние близко к истинному своему значению. Причем значения фокусного расстояния линзы, полученные при измерениях, проведенных с разными продольными смещениями Δz линзы в оптической схеме (рис. 4), мало различаются между собой.

Среднее значение полученного фокусного расстояния $\bar{F}_L = 60,189$ мм при ошибке измерения $\delta F_L = 1,54\%$, несмотря на то, что диапазон изменения продольного смещения сравним с фокусным расстоянием линзы и равнялся 60 мм.

Также был определен размер области сканирования V , где уровень сигнала еще позволяет измерить фазу. Для сравнения, теоретическая кривая, вычисленная по (17), и экспериментальные значения изображены на рис. 5. Закономерно, что вблизи $\Delta z = F_L$ размер видимой области уменьшается, а ошибка измерения увеличивается. В пределах измерения Δz от $F_L - z_0$ до $F_L + z_0$ достоверных данных получить не удалось. В этой области размер видимого участка настолько мал и эффект влияния толщины линзы настолько велик, что получить надежные дифференциально-фазовые данные про объект не представляется возможным.

Результат измерения фокусного расстояния для набора линз с известными оптическими силами представлен в таблице. Вклад смещения линзы в

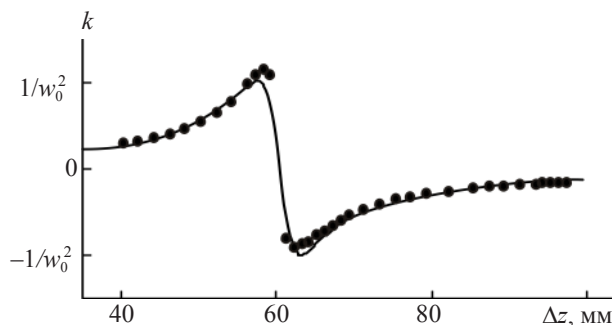


Рис. 3. Экспериментальная (точки) и теоретическая (сплошная линия) зависимости коэффициента наклона фазовой характеристики для положительной линзы от ее смещения. $F_L = 60,2$ мм, $z_0 = 2,8$ мм.

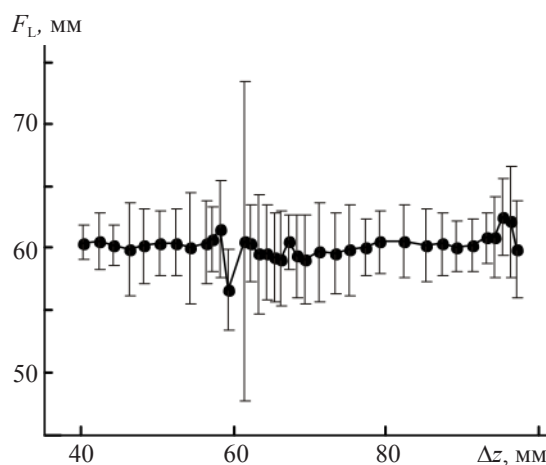


Рис. 4. Экспериментально полученные фокусные расстояния для разных положений линзы.

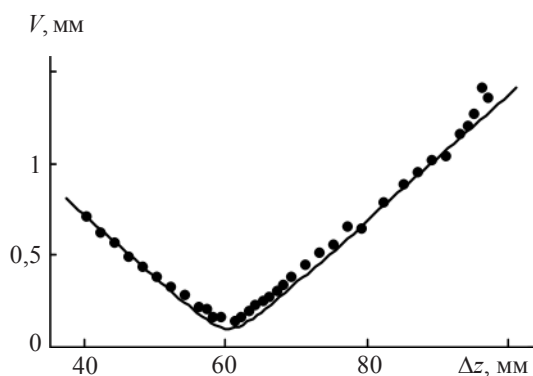


Рис. 5. Размер видимого участка для разных положений линзы.

ошибку измерения сравним с статистической ошибкой измерения оптической силы линзы. Для крайних положений смещения Δz коэффициент k меняется значительно, что при определении опти-

Измеренное фокусное расстояние для набора линз с известной оптической силой

Оптическая сила линзы, D	D	+3,5	+2,0	-2,0
Измеренная оптическая сила, D	D_L	3,501	1,983	-2,147
Относительная среднеквадратическая ошибка измерений	δD_L	1,52%	2,71%	2,14%
Относительное изменение коэффициента k для крайних положений Δz	$\Delta k/k$	28,47%	19,15%	4,16%
Фокусное расстояние линзы, мм	F	285,7	500,0	-500,0
Диапазон изменения Δz , мм	$ \Delta z_2 - \Delta z_1 $	60,0	60,0	30,0

ческой силы только по одному коэффициенту наклона дифференциально-фазовой характеристики определяло бы ошибку измерения. При применении предлагаемого метода значение измеренного фокусного расстояния близко к истинному независимо от смещения линзы.

Выводы

Полученные теоретические выражения для амплитуды и фазы гетеродинного сигнала хорошо согласуются с экспериментальными результатами исследования линзы. Предложенная схема дифференциально-фазового интерферометра успешно решает проблему необходимости точного расположения исследуемой линзы в фокусе оптической схемы. Истинное значение фокусного расстояния может быть корректно измерено для любого смещения линзы, где может быть получен достоверный гетеродинный сигнал. Отличие в полученных значениях фокусного расстояния для разных смещений линзы сравнима с ошибкой измерения.

Хотя данная система разработана для сканирования по одной координате, она легко может быть усовершенствована для измерений в плоскости путем использования двухкоординатного АОД. Перемещаемый фотодетектор может быть также заменен матрицей фотодетекторов или фотодетектором с пространственным модулятором света, и в таком случае измерительная установка не будет содержать движущихся частей.

Кроме измерения фокусного расстояния, система может быть использована для получения распре-

деления оптической силы по поверхности исследуемой линзы. Таким образом, метод пригоден для измерения оптического качества не только сферических, но также асферических, цилиндрических и прогрессивных линз.

ЛИТЕРАТУРА

1. See C.W., Iravani M.V., Wickramasinghe H.K. Scanning differential phase contract optical microscope: application to surface studies // Appl. Opt. 1985. V. 24. № 15. P. 2373.
2. Somekh M.G., Valera M.S., Appel R.K. Scanning heterodyne confocal differential phase and intensity microscope // Appl. Opt. 1995. V. 34. № 22. P. 4857.
3. Баранов Д.В., Егоров А.А., Золотов Е.М., Свидзинский К.К. Восстановление профиля микрообъекта в гетеродинном дифференциальном микроскопе // Опт. и спектр. 1997. Т. 83. № 3. С. 516.
4. Lin Y., Schill J., Wang R.-W. Instrumental noise effect in an optical heterodyne profiler // Appl. Opt. 1994. V. 33. № 22. P. 5005.
5. Carlson T.B., Denzer S.M., Greenlee T.R., Groschen R.P., Peterson R.W., Robinson G.M. Vibration-resistant direct-phase-detecting optical interferometers // Appl. Opt. 1997. V. 36. № 28. P. 7162.
6. Acosta E., Bara S., Rama M.A., Rios S. Determination of phase mode components in terms of local wave-front slopes: an analytical approach // Opt. Lett. 1995. V. 20. № 10. P. 1083.
7. Гудмен Дж. Введение в Фурье оптику / Пер. с англ. М.: Мир, 1970. 364 с.
8. Ярич А., Юх П. Оптические волны в кристаллах / Пер. с англ. М.: Мир, 1987. 616 с.