

2004, том 40, № 5

УДК 535.4 : 621.383

В. П. Кирьянов, В. Г. Никитин

(Новосибирск)

ИЗМЕРЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТОДОМ СКАНИРОВАНИЯ

Представлены результаты исследования методики измерения дифракционной эффективности оптических элементов, основанной на принципе сканирования поверхности элемента световым пучком ограниченной апертуры. Сравниваются результаты измерения дифракционной эффективности линзы Френеля, полученные при использовании интегральной и сканирующей методик. Рассматривается концепция создания установки, обеспечивающей измерение дифракционной эффективности по обеим методикам, обсуждаются экспериментальные результаты.

Введение. В настоящее время в различных оптических системах все более широко применяют новые элементы, принцип действия которых основан на явлении дифракции. Такой класс оптических элементов представляет новые возможности улучшения качества изображения, сокращения числа компонентов в оптических схемах приборов, снижения массы и цены изделий. Эти элементы получили название дифракционных оптических элементов (ДОЭ). Важнейшим параметром ДОЭ является их дифракционная эффективность (ДЭ) – отношение световой энергии, сконцентрированной в рабочих порядках дифракции, к полной световой энергии, прошедшей через элемент. Наибольший интерес для практики представляют ДОЭ с непрерывным изменением фазового профиля в пределах дифракционных зон, поскольку их ДЭ приближается к 100 %. Однако изготовление их сопряжено с рядом технических трудностей: требуется с высокой точностью выдерживать заданный характер изменения фазового профиля в пределах каждой зоны, обеспечивать резкий излом фазовой функции на границах зон [1]. От того, как соблюдается выполнение этих требований, существенно зависит качество ДОЭ и, естественно, его дифракционная эффективность. В предлагаемой работе рассмотрена методика измерения ДЭ синтезированных оптических элементов, использование которой позволяет также оценить величины дефектов фазового профиля, ухудшающих ДЭ контролируемых элементов.

Методы измерения ДЭ оптических элементов. Известен метод проверки ДЭ оптических элементов [2], в основе которого лежит принцип фото-

метрирования в заданном спектральном диапазоне. В соответствии с этим методом на расчетной длине волны проводят измерение количественных показателей потока световой энергии, направленной элементом (согласно его назначению) в определенные точки пространства. Для этого производится регистрация трех сигналов: один несет информацию о текущем значении мощности светового потока, падающего на ДОЭ, второй – информацию о текущем значении мощности светового потока, прошедшего через ДОЭ, и третий – информацию о значении мощности светового потока в пучке, сформированном ДОЭ. Отношение интенсивностей сфокусированного излучения к полной интенсивности излучения, прошедшего через ДОЭ, дает дифракционную эффективность, а отношение интенсивностей сфокусированного и падающего пучков дает общую энергетическую эффективность ДОЭ. Использование матричного фотоприемника (например, видеокамеры) для формирования третьего сигнала позволяет дополнительно проводить анализ распределения интенсивности света в плоскости изображения. Этот метод будем называть интегральным.

Основным недостатком интегрального метода измерения ДЭ является необходимость полной замены основных узлов установки и большей части технологической оснастки [2] при смене спектрального диапазона и/или типа ДОЭ.

В настоящее время, благодаря появлению лазерных генераторов изображений, работающих в полярной системе координат, появилась возможность изготавливать ДОЭ размером до 300 мм и более (например, CLWS-300 [3, 4] и др.) и соответственно возникла потребность измерять ДЭ таких широкоапертурных элементов. Для этих элементов проблема формирования исходного волнового фронта становится совсем непростой. В этом случае установка для измерения ДЭ, реализующая интегральный метод, становится весьма дорогой.

В работах [5, 6], посвященных технологии изготовления ДОЭ, серьезное внимание уделяется ДЭ изготовленных элементов. Чаще всего причина снижения ДЭ кроется в дефектах профиля внутри дифракционных зон ДОЭ. Но выявить причины недостаточной ДЭ (если такая обнаруживается), используя данные ее измерений интегральным методом, довольно трудно, даже имея результаты анализа распределения интенсивности в плоскости изображения.

В представленной работе рассматривается концепция построения установки, которая осуществляет измерение ДЭ широкого класса синтезированных ДОЭ путем сканирования их поверхности световым пучком ограниченной апертуры и дает возможность получать дополнительную информацию о характеристиках фазового профиля элементов [7]. Для этого использовался ряд результатов, полученных в [6].

Измерение ДЭ методом сканирования рабочей поверхности ДОЭ. Согласно данному методу рабочая поверхность ДОЭ условно разбивается на N локальных площадок s_i , размеры которых определяются размерами светового пятна, последовательно сканирующего поверхность контролируемого элемента. При освещении локального участка ДОЭ падающий луч дифрагирует на его микроструктуре. Интенсивность света в рабочих порядках дифракции I_i измеряется и нормируется на текущее значение интенсивности падающего света I_n и пропускание подложки $T_{\text{ДОЭ}}$. В результате нормировки получают $\eta_i = I_i / (T_{\text{ДОЭ}} I_n)$ – значение ДЭ в данной локально измеренной

площадке ДОЭ, поскольку величина $T_{\text{ДОЭ}} I_{\text{п}}$ равна интенсивности света, прошедшего через элемент. Результаты всех локальных измерений суммируют и усредняют по общему числу измерений:

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \eta_i. \quad (1)$$

Полученная величина соответствует ДЭ всего элемента, хотя в самом общем случае она может отличаться от реальной ДЭ, если в синтезируемом образце имеются значительные искажения геометрии дифракционных зон. Однако в технологических комплексах, формирующих данные структуры, используются высокоточные системы управления перемещением записывающей головки (см., например [8]), в результате чего, как показывают исследования [9], удается минимизировать подобную причину ухудшения дифракционной эффективности.

Экспериментальная установка, реализующая измерение ДЭ методом сканирования рабочей поверхности ДОЭ. На рис. 1 представлена функциональная схема экспериментальной установки, осуществляющей измерение ДЭ в спектральном диапазоне 450–2200 нм как методом сканирования поверхности ДОЭ, так и интегральным методом. Измерение ДЭ методом сканирования производится с помощью узлов и блоков основного канала установки. В состав основного канала входят: осветитель 1, автоматизированный монохроматор 2, коллиматор 3а блока коллиматоров 3, двухкоординатный стол 4, оптико-механический блок быстрого сканирования 5, сменные фотоприемники основного 6 и калибровочного 7 каналов, полупрозрачное зеркало 8 и зеркальный блок переключения каналов 9.

В качестве осветителя, обеспечивающего спектральный диапазон 450–2200 нм, используется галогенная лампа со специальной оптической схемой для переключения режимов работы. (На рис. 1 схема переключения оптических каналов в осветителе не представлена.) Для выбора рабочей длины волны служит монохроматор марки ДМР-4, который с целью автоматизации процесса выбора спектральной линии дополнен специальной системой управления на основе шагового двигателя. Коллиматор 3а формирует на

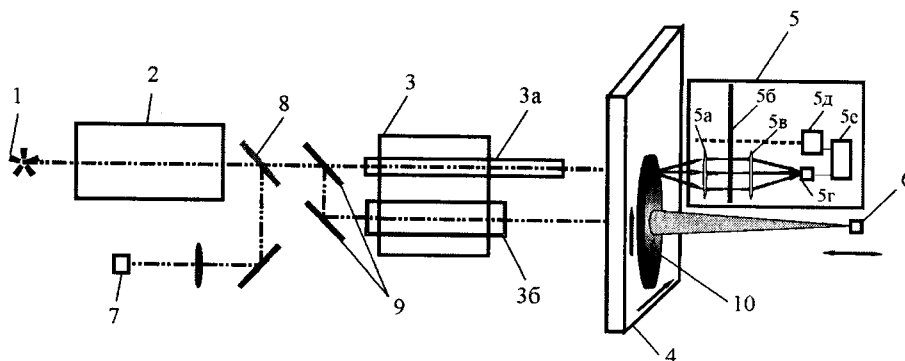


Рис. 1. Функциональная схема экспериментальной установки

рабочей поверхности ДОЭ световой пучок квадратного сечения размером 1×1 мм. Контролируемый элемент 10 располагается на двухкоординатном столе, с помощью которого по сигналам от управляющего компьютера обеспечивается последовательное сканирование рабочей поверхности ДОЭ таким световым пучком. При взаимодействии с рабочей поверхностью ДОЭ падающий луч дифрагирует на фазовом рельефе площадки, освещенной в данный момент. Пространственный спектр порядков дифракции, возникших в результате этого взаимодействия, анализируется с помощью оптико-механического блока быстрого сканирования, состоящего из двух объективов 5а и 5в, диска Нипкова 5б, фотоприемника 5г, преобразователя угол–код 5д, закрепленного на валу диска Нипкова, и аналого-цифрового преобразователя 5е. Диск Нипкова имеет 50 отверстий размером $0,3 \times 0,3$ мм, расположенных по спирали вдоль одного витка с одинаковым угловым шагом и смещением по радиусу, равным радиальному размеру отверстия. При вращении диска каждое отверстие поочередно сканирует площадку в направлении вращения, в результате чего формируется 50 строк получаемого в итоге кадра изображения. Аналоговый сигнал на выходе фотоприемника 5г с помощью АЦП 5е преобразуется в цифровой, при этом за счет синхронизации работы АЦП с выходными сигналами датчика угол–код 5д выделяются 2500 последовательных дискретных значений сигнала фотоприемника, распределенных равномерно в пределах каждой из 50 линий сканирования. Совокупность полученных данных представляет собой кадр изображения, содержащего 50×50 элементов разложения. Информация с блока сканирования стандартным образом передается в управляющий компьютер. С помощью программного обеспечения полученный сигнал анализируется, и на основе априорной информации о топологии ДОЭ и координатах освещенной площадки определяется интенсивность света в нужном порядке дифракции $I_{\text{изм}}$. Полученный сигнал нормируется на интенсивность света в калибровочном канале (КК) $I_{\text{КК}}$ с учетом коэффициентов пропускания оптического тракта (ОТ) $T_{\text{ОТ}}$ и подложки ДОЭ $T_{\text{ДОЭ}}$ и коэффициента отражения полупрозрачного зеркала R_3 . Таким образом, дифракционная эффективность

$$\eta = I_{\text{изм}} / ((1 - R_3) T_{\text{ДОЭ}} I_{\text{КК}} T_{\text{ОТ}}).$$

Коэффициенты пропускания $T_{\text{ОТ}}$ и $T_{\text{ДОЭ}}$ измеряются отдельно для каждой длины волны.

Следует заметить, что угол отклонения измеряемого порядка дифракции ограничен, с одной стороны, числовой апертурой объектива 5а, с другой – его фокусом и разрешением сканирующей системы. Таким образом, угол дифракции α на локальных участках ДОЭ, измеряемого методом сканирования, находится в диапазоне $0,063 < \alpha < 0,63$ рад.

Чтобы обеспечить независимость результатов измерения ДЭ от изменяющихся со временем параметров осветителя, информацию об интенсивности падающего на ДОЭ излучения получают одновременно с информацией об интенсивности света в нужном порядке дифракции. Для этого световой пучок после монохроматора разделяют при помощи полупрозрачного зеркала на два, один из которых направляют на фотоприемник. Выходной сигнал фотоприемника оцифровывается с помощью АЦП, аналогичного 5е, и передается в управляющий компьютер. Фотоприемник с АЦП и зеркало образуют калибровочный канал установки. На основе данных об интенсивности

света в зарегистрированном порядке дифракции и интенсивности падающего излучения вычисляется значение локальной ДЭ η , которое фиксируется в памяти компьютера.

Затем стол с ДОЭ смещается по одной из координат на 1 мм и проводится измерение ДЭ в новой точке. После сканирования всех локальных площадок ДОЭ результаты расчетов η суммируются и усредняются по всем измерениям. Время для снятия данных о η составляет порядка 30 мс. В результате общее время измерения ДЭ полноразмерного элемента будет составлять более 2,5 ч. И это является серьезным недостатком сканирующего метода измерения ДЭ. Так как среди контролируемых ДОЭ значительное число занимают изделия типа линзы Френеля малого диаметра, то представляется целесообразным на основе узлов и блоков основного канала сформировать дополнительный канал, в котором измерение ДЭ будет проводиться по интегральной схеме более оперативно. Для этого в оптическую схему установки введен зеркальный блок переключения каналов, направляющий выходное излучение монохроматора в дополнительный коллиматор 3б, который формирует выходной пучок с круглым сечением диаметром 50 мм. Неравномерность интенсивности по сечению пучка составляет не более 1%. Данный пучок направляется на исследуемую линзу. Линза Френеля размещается на каретке, которая позволяет установить измеряемый элемент в центр параллельного пучка, сформированного коллиматором 3б. Фотоприемник дополнительного канала, снабженный диафрагмой, расположен коллинеарно оптической оси коллиматора 3б и имеет возможность перемещаться вдоль оси на расстоянии 250–600 мм от плоскости ДОЭ для совмещения плоскости изображения ДОЭ с фоточувствительной площадкой фотоприемника. В случае, когда фокусное расстояние зонной пластины Френеля превышает диапазон перемещения фотоприемника, предусмотрена возможность помещать дополнительную линзу между ДОЭ и фотоприемником. Выходной сигнал фотоприемника оцифровывается стандартным образом и передается в компьютер, где он нормируется в соответствии с пропусканием оптического канала, подложки ДОЭ, дополнительной линзы (если она вставлена) и сигналом калибровочного канала.

Вид установки для измерения дифракционной эффективности синтезированных оптических элементов представлен на рис. 2: 1 – источник излучения, 2 – автоматизированный монохроматор, 3 – коллиматорный блок, 4 –

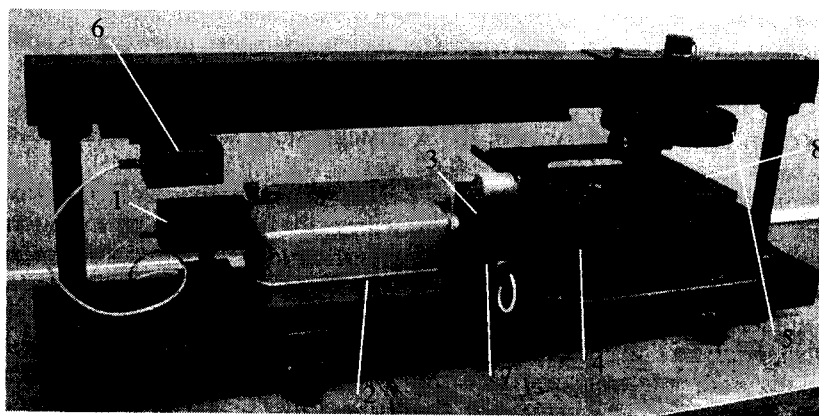


Рис. 2. Общий вид экспериментальной установки

двухкоординатный стол, 5 – оптико-механический блок быстрого сканирования, 6 – фотоприемник основного измерительного канала, 7 – фотоприемник калибровочного канала, 8 – место для крепления контролируемого ДОЭ.

Анализ дополнительных возможностей, возникающих при использовании сканирующего метода измерения ДЭ. Возможность измерять дифракционную эффективность ДОЭ методом сканирования их поверхности световым пучком ограниченной апертуры экспериментально проверялась путем измерения в широком спектральном диапазоне 500–1000 нм ДЭ зонной пластины Френеля, изготовленной в Институте автоматики и электрометрии СО РАН методом полутоновой фотолитографии с использованием фотошаблонов на основе поверхностно модифицированных LDW-стекол [10]. Полутоновый фотошаблон для изготовления такой зонной пластины сделан на круговой лазерной записывающей системе [11]. Зонная пластина была рассчитана для работы в первом дифракционном порядке на рабочей длине волны, равной 560 нм. Фокусное расстояние линзы 150 мм, диаметр 20 мм.

Теоретическая зависимость ДЭ от длины волны падающего света для идеальной зонной пластины Френеля с учетом потерь света, равных 8 %, на отражение от подложки, параметры которой аналогичны параметрам контролируемой линзы, приведена на рис. 3 (кривая 1). Экстремум функции $\eta(\lambda)$ приходится на расчетную длину волны.

Реальная зонная пластина Френеля сканировалась световым пучком размером 1×1 мм вдоль диаметра с шагом 1 мм. Поскольку она обладает аксиальной симметрией, то для оценки работоспособности метода сканирование вдоль диаметра оказывается достаточным. В указанном спектральном диапазоне было выбрано 21 фиксированное значение длин волн, разнесенных равномерно по диапазону с интервалом в 25 нм. Экспериментальная зависимость ДЭ от длины волны для реальной зонной пластины Френеля, получен-

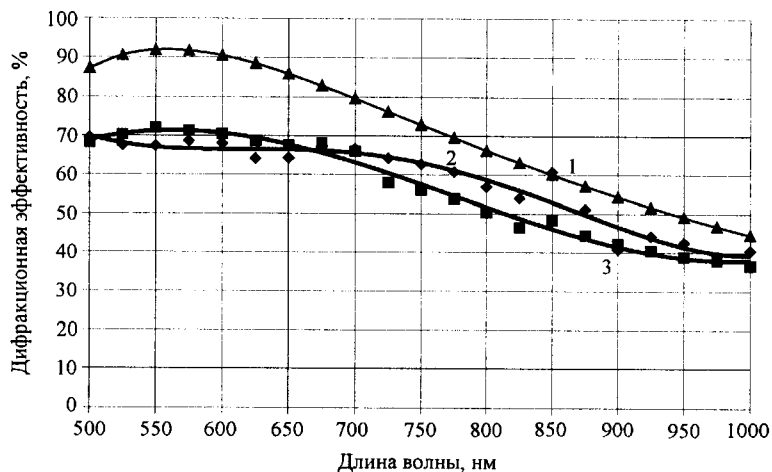


Рис. 3. Три зависимости дифракционной эффективности зонной пластины Френеля от длины волны: теоретическая зависимость для расчетной длины волны 560 нм (кривая 1); дифракционная эффективность, измеренная интегральным методом (кривая 2); дифракционная эффективность, определенная интегрированием данных, полученных сканированием (кривая 3)

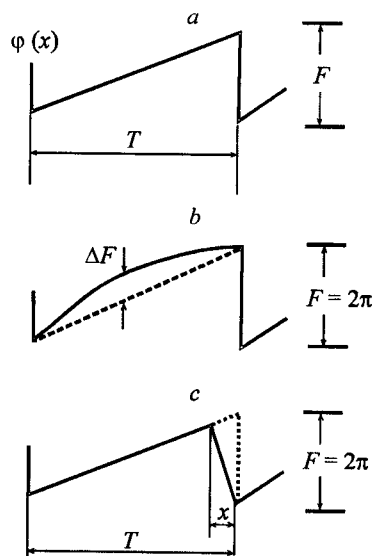


Рис. 4. Основные факторы, влияющие на дифракционную эффективность ДОЭ: глубина фазового профиля (а); отклонение формы профиля (b); обратный скат (с)

ная методом сканирования поверхности световым пучком ограниченной апертуры, показана на рис. 3 (кривая 3). Сравнивались количественные показатели зависимостей, полученных методом сканирования и интегральным методом (см. рис. 3, кривая 2). Расхождение в величине ДЭ на рабочей длине волны не превышает 5 %, что для оценочных экспериментов можно считать вполне удовлетворительным. Заметное расхождение результатов измерений $\eta(\lambda)$ методом сканирования и теоретической зависимости на нерабочих длинах волн не анализировалось.

Данные сканирования поверхности элемента позволяют получить дополнительную информацию о факторах, влияющих на дифракционную эффективность ДОЭ, [9] (рис. 4): глубине фазового профиля, отклонении формы профиля, наличии обратного ската и неточности выполнения геометрии дифракционных зон. На основе результатов измерений интенсивности света в нужном порядке дифракции проверить неточность выполнения геометрии дифракционных зон не представляется возможным. Также трудно извлечь информацию об отклонениях формы профиля зон от расчетных значений. Но можно с достаточной точностью судить об отклонениях глубины фазового профиля от расчетных значений и величине обратного склона.

Методика измерения ДЭ с помощью сканирования площади рабочей части элемента была опробована на осесимметричных ДОЭ, для которых можно было использовать данные сканирования поверхности, принадлежащие одному из диаметральных сечений элемента.

Выявление неточности формирования фазового профиля. В основе алгоритма, используемого для выявления неточностей формирования фазового профиля, лежит следующее соотношение [6], связывающее измеренную локальную ДЭ в N -м порядке дифракции для ДОЭ с ДЭ в M -м порядке дифракции:

$$\eta = \text{sinc}^2(\alpha \mu M - N), \quad (2)$$

где $\alpha = \lambda_0 [n(\lambda) - 1] / (\lambda [n(\lambda_0) - 1])$ (λ_0 – расчетная длина волны, λ – длина волны излучения, $n(\lambda)$ – показатель преломления материала, из которого изготовлен ДОЭ); $\mu = d/d_0$ (d – полученная глубина, d_0 – расчетная глубина, μ – параметр глубины).

Следует отметить, что данные формулы верны, если мы пренебрегаем эффектом «затенения» [6].

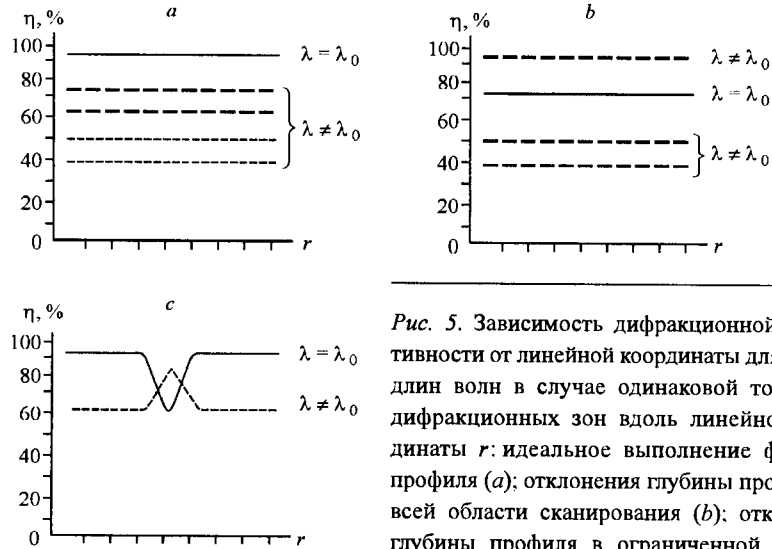


Рис. 5. Зависимость дифракционной эффективности от линейной координаты для разных длин волн в случае одинаковой топологии дифракционных зон вдоль линейной координаты r : идеальное выполнение фазового профиля (а); отклонения глубины профиля по всей области сканирования (б); отклонения глубины профиля в ограниченной области сканирования (с)

Рассмотрим случай, когда заданным образом воспроизведена форма фазового профиля (за исключением его глубины). Если геометрическая глубина профиля зон в любой локальной площадке одинакова, то при сканировании поверхности ДОЭ световым пучком с разными значениями длин волн λ будут регистрироваться зависимости $\eta_i(r, \lambda)$, представляющие собой серию прямых линий, параллельных оси ординат r . При $d = d_0$ максимальное значение $\eta_i(r, \lambda)$ принимает, если $\lambda = \lambda_0$ (рис. 5, а).

Если реальная глубина профиля зон $d \neq d_0$, то максимальное значение $\eta_i(r, \lambda)$ принимает при некотором другом $\lambda \neq \lambda_0$ (рис. 5, б).

Если глубина профиля зон d в пределах некоторых локальных площадок не равна расчетной величине d_0 , то при сканировании поверхности ДОЭ на расчетной длине волны $\lambda = \lambda_0$ на графике $\eta_i(r, \lambda)$ должен наблюдаться провал, координаты которого указывают на место расположения дефектной области. Сканируя поверхность этого образца на других длинах волн при некотором значении $\lambda \neq \lambda_0$, увидим, что на этом месте появится локальный экстремум (рис. 5, с).

Оценка величины обратного склона. Алгоритм оценки величины обратного склона дифракционных зон основан на том, что участки этих зон, занимаемые обратным склоном, не участвуют в формировании изображения в нужной точке пространства. Причем доля световой энергии, дифрагирующей на обратном склоне, меняется в зависимости от реального размера зон и не зависит от длины волны падающего света. Зависимость локальной ДЭ от величины обратного склона x (см. рис. 4) можно представить [6]:

$$\eta_i(x) = \left(1 - \frac{x}{T}\right)^2, \quad (3)$$

где T – текущий период дифракционной зоны.

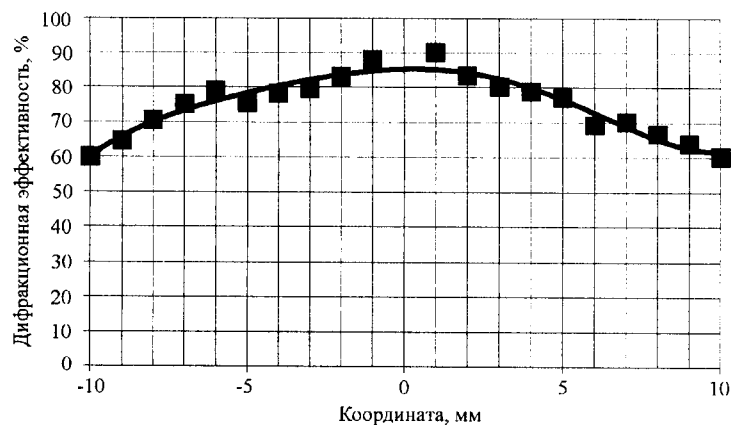


Рис. 6. Зависимость дифракционной эффективности от радиуса для линзы Френеля

Интерпретация реальных экспериментальных данных. В реальном эксперименте все факторы действуют одновременно и в измеренных данных содержится информация сразу обо всех факторах. На рис. 6 приведена экспериментальная зависимость локальной ДЭ от текущего радиуса линзы Френеля для расчетной длины волны 560 нм. (В точке 0 измерения не проводились.)

Для того чтобы выявить вклад того и другого фактора, производится сканирование по длинам волн в каждой точке на выделенном диаметре. Получаются зависимости, представленные на рис. 7 (кривые 1, 2). Их максимумы лежат на некоторых промежуточных значениях λ , (в частности, $\lambda_1 = 625$ нм). Так как вклад обратного склона в ДЭ элемента не зависит от длины волны, то, выбирая в каждой точке максимальные значения $\eta(\lambda)$, получим новую экспериментальную кривую, характеризующую зависимость локальных ДЭ от ширины дифракционных зон (рис. 8, кривая 2). Используя полученные данные и выражение (3), можно вычислить усредненное значение ширины об-

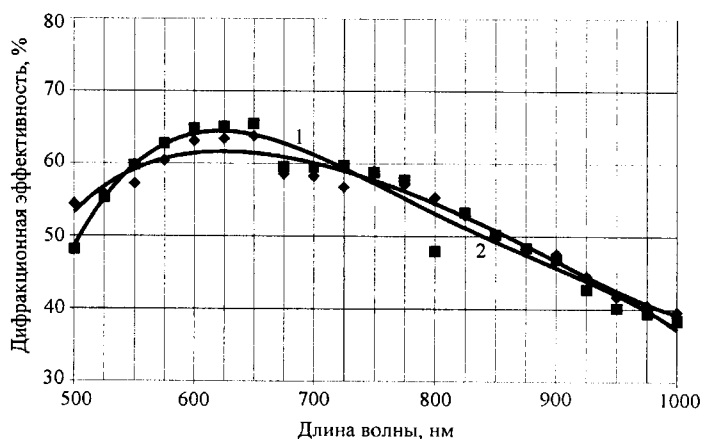


Рис. 7. Зависимость дифракционной эффективности от длины волны для двух точек на ДОЭ

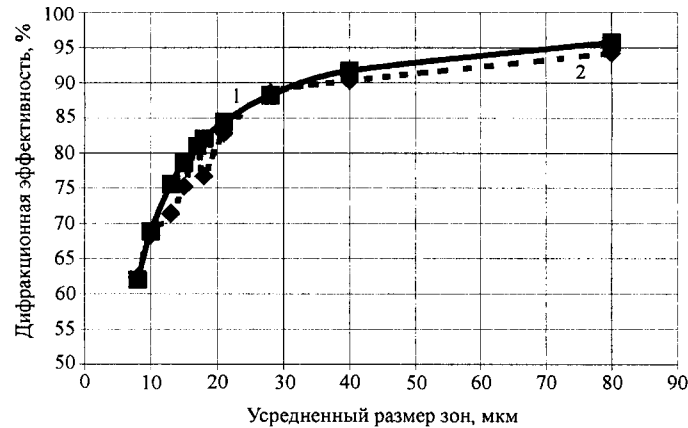


Рис. 8. Зависимость дифракционной эффективности от ширины дифракционной зоны. Кривая 1 теоретически вычислена с обратным скатом 1,7 мкм, кривая 2 построена на основе усредненных экспериментальных данных

ратного склона. Для данного случая было получено значение $x = 1,7$ мкм. Теоретическая кривая зависимости (3), построенная для $x = 1,7$ мкм, (см. рис. 8, кривая 1) практически совпадает с экспериментальной кривой. На основе этого можно сделать вывод, что для данного ДОЭ главными факторами, влияющими на ДЭ, являются глубина и обратный скат. Измерения в точке с координатой 0 (в центре зонной пластины Френеля) не являются адекватными ввиду экстремума фазовой функции в данной точке, поэтому из анализа они исключены.

И наконец, опишем оценку отклонения фазового сдвига или глубины фазового профиля ($F = 2\pi\lambda/\lambda_0$) данного ДОЭ. Снова для анализа берутся максимальные значения $\eta_i(\lambda)$, полученные при сканировании по длинам

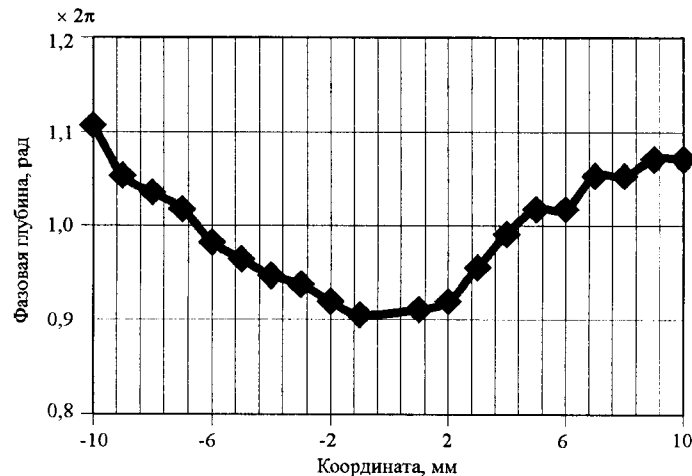


Рис. 9. Зависимость фазовой глубины линзы Френеля от радиуса

волн. Оценивается относительная величина смещения локальных максимумов по сравнению с расчетной длиной волны. Полученным значениям относительного смещения локальных экстремумов ставится в соответствие глубина фазового профиля в данной точке ДОЭ (рис. 9). (В точке с координатой 0 измерения не проводились.)

Аналогичные измерения были проведены для дифракционного аксикона [12]. Аксикон преобразует плоский волновой фронт в волновой фронт конической формы. Измерить ДЭ таких элементов по классической методике не просто, особенно в тех случаях, когда элемент концентрирует излучение в световой шнур длиной в несколько десятков метров. При использовании методики сканирования была измерена ДЭ данного элемента и получены следующие результаты. Для расчетной длины волны 632 нм дифракционная эффективность составила 45 %. Зарегистрировано максимальное значение локальной ДЭ, равное 65 %. Это значение пришлось на длину волны падающего излучения, равную 725 нм. Методика оценки влияния дестабилизирующих факторов позволила сделать вывод, что в данном элементе не выдержана необходимая глубина фазового профиля. Ширина обратного ската зон, вычисленная на основе данных (3), составила 2,9 микрон.

Заключение. Создана установка, позволяющая благодаря наличию двух специальных каналов измерять дифракционную эффективность широкого класса ДОЭ с линейными размерами от 10 до 300 мм как интегральным методом, так и методом сканирования.

Применение метода сканирования поверхности ДОЭ световым пучком ограниченной апертуры дает возможность по единой схеме производить измерение дифракционной эффективности широкого класса ДОЭ. Сравнение результатов измерений ДЭ, полученных на рабочей длине волны по двум различным методикам для известного объекта (зонной пластины Френеля), показало достаточно близкое их совпадение (различие не превышало 5 %). Использование двойного сканирования (по пространству и по длинам волн) позволяет оценивать с приемлемой для практики точностью искажения глубины фазового профиля и величину обратного ската зон ДОЭ.

В методе сканирования угол дифракции α измеряемых элементов для созданной системы определяется разрешением сканирующей подсистемы и апертурой рабочих объективов и находится в пределах $0,063 < \alpha < 0,63$ рад.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Korolkov V., Koronkevich V., Malyshev A., Nikitin V. New fabrication method for diffractive optical elements with deep phase relief // Proc. SPIE. 1997. 3010. P. 180.
2. Методы компьютерной оптики /Под. ред. В. А. Сойфера. М.: Физматлит, 2000.
3. Burge J. H. Null test optics for MMT and Magellan 6.5 m f/1.25 primary mirrors // Proc. SPIE. 1994. 2199. P. 658.
4. Kiryanov V. P. Laser setup for flat optical components fabrication with submicron resolution // Proc. SPIE. 1997. 3091. P. 66.
5. Корольков В. П., Малышев А. И., Никитин В. Г. и др. Полутонновые фотошаблоны на основе LDW-стекло // Автометрия. 1998. № 6. С. 27.
6. Hessler T., Rossi M., Kunz R. E., Gale M. T. Analysis and optimization of fabrication of continuous-relief diffractive optical elements // Appl. Opt. 1998. 37, N 19. P. 4069.

7. **Kiryakov V. P., Nikitin V. G., Verkhogliad A. G.** Development and research of the scanning method for testing of diffraction optical elements // Proc. SPIE. 2002. **4900**. Pt. 2. P. 977.
8. **Кирьянов В. П., Кокарев С. А.** Лазерно-интерферометрический преобразователь перемещений с субнанометровым разрешением // Автометрия. 1998. № 2. С. 3.
9. **Полещук А. Г., Корольков В. П., Черкашин В. В. и др.** Методы минимизации ошибок прямой лазерной записи дифракционных оптических элементов // Автометрия. 2002. **38**, № 3. С. 3
10. **Korolkov V., Malyshev A., Nikitin V. et al.** Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOE // Proc. SPIE. 1999. **3633**. P. 129.
11. **Koronkevich V. P., Kirianov V. P., Korolkov V. P. et al.** Fabrication of diffractive optical elements by direct laser writing with circular scanning // Proc. SPIE. 1995. **2363**. P. 290.
12. **Mikhailsova I. A., Nalivaiko V. I., Soldatenkov I. S.** Kinoforms axicons // Optik. 1984. **67**, N 3. S. 267.

*Конструкторско-технологический институт
научного приборостроения СО РАН,
E-mail: kiryanov@tdisie.nsc.ru*

*Поступила в редакцию
28 мая 2003 г.*