

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ПРОФИЛОГРАММ КУСОЧНО-НЕПРЕРЫВНОГО ДИФРАКЦИОННОГО МИКРОРЕЛЬЕФА

© 2009 г. В. П. Корольков, канд. техн. наук; С. В. Остапенко

Институт автоматики и электрометрии СО РАН, Новосибирск

E-mail: victork@iae.nsk.su

Вопросы профилометрического анализа кусочно-непрерывного микрорельефа высокоеффективных дифракционных элементов практически не рассматривались в литературе, несмотря на то что рынок дифракционной оптики существенно вырос в последнее время, и высокоеффективные дифракционные элементы перешли из разряда экзотики в обычную практику оптического приборостроения. В данной работе авторы рассматривают несколько методик оценки микрорельефа, которые позволяют вычислить “аппроксимированную глубину”, практически не зависящую от типа используемого профилометра. Предложенные методики основаны на полиномиальной аппроксимации профиля дифракционной зоны с минимизацией влияния ненадежных данных вблизи ее границ.

Ключевые слова: профилограмма, микрорельеф, профиль дифракционной зоны, дифракционные оптические элементы.

Коды OCIS: 120.6650 120.2830 120.3930 120.4290 120.4630

Поступила в редакцию 30.10.2008

Введение

Проблемы метрологии микрорельефа высокоеффективных дифракционных оптических элементов (ДОЭ) стали весьма актуальными на современном этапе развития дифракционной оптики, когда работа ДОЭ оценивается не только по соответствию заданному преобразованию световой волны, но и по соответствию жестким критериям высокой дифракционной эффективности и малому светорассеянию. Высокая дифракционная эффективность может быть получена только при регулярном контроле ошибок выполнения микрорельефа элементов.

Безусловно, оптимальным способом такой оценки является измерение дифракционной эффективности элемента как конечной характеристики ДОЭ. Но на промежуточных этапах изготовления рельеф может быть сформирован на материале (например, в фоторезисте или металле) с показателем преломления, отличающимся от материала конечного оптического элемента, а при использовании технологии “сухого” травления коэффициент переноса микрорельефа в подложку часто существенно отличается от единицы. Таким образом, глубина микрорельефа на промежуточном этапе будет не оптимальна для получения максимума эффективности. В некоторых случаях даже невозможно измерить

дифракционную эффективность отдельного ДОЭ пока не собрана вся оптическая схема. Поэтому наиболее часто для характеристики ДОЭ на этапе первичного формообразования используется прямое измерение формы микрорельефа локально или всего элемента (при малых размерах) с помощью профилометра.

Однако в настоящее время программное обеспечение промышленно выпускаемых профилометров не имеет функций математической обработки, предназначенных для дифракционной оптики и микрооптики. Дело в том, что форма кусочно-непрерывного микрорельефа элементов дифракционной оптики и микрооптики коренным образом отличается от типовых форм микрорельефов электронной промышленности и промышленной механообработки, являющихся основными потребителями профилометров. Поэтому в стандартных профилометрах можно только получить профилограмму дифракционного микрорельефа, но ее количественный анализ, соответствующий области применения, должен быть сделан в каком-то внешнем программном обеспечении. В идеале, этот количественный анализ должен дать краткую численную характеристику микрорельефа, выраженную 2–3 значениями, чтобы облегчить оперативную оценку элемента.

Вне зависимости от способа измерения профилограмма представляет собой массив данных,

который определяет зависимость высоты точек микрорельефа от их координат. Как правило, этот массив данных имеет лишь приближенную привязку к системе координат, в которой формировалась дифракционная микроструктура. Чтобы оценить по профилометрическим данным качество изготовления ДОЭ, необходимо выделить набор параметров, определяющих геометрическое соответствие расчетного и измеренного микрорельефа. Для этого рассмотрим типовой микрорельеф кусочно-непрерывных ДОЭ.

ДОЭ с таким микрорельефом описываются, как правило, гладкими фазовыми функциями. После кодирования фазовой функции по модулю $2\pi n$ основной массив дифракционных зон имеет линейную форму (вдали от экстремумов фазовой функции) и только небольшая часть зон имеет нелинейную форму (параболическую – для линз).

Современные методы изготовления ДОЭ (прямая лазерная запись [1, 2], полутоновая литография [3], электронно-лучевая литография [4], алмазное тонение [5]) обеспечивают точность исполнения горизонтальных размеров микроструктуры порядка 50 нм, что для ширины зон порядка 10–50 мкм соответствует ошибке фазовой функции 0,001–0,005 λ .

Ошибки же глубины микрорельефа обычно имеют значения порядка 30–100 нм, что соответствует ошибке фазовой функции 0,03–0,1 λ . Очевидно, что основной вклад в ошибку кодированной фазовой функции вносит ошибка локальной глубины микрорельефа.

При точных горизонтальных размерах высота перепада микрорельефа на границе между зонами является естественным общим параметром, которым можно характеризовать точность исполнения микроструктуры по всей площади ДОЭ. Однако на практике перепад высоты микрорельефа на границе зон сглаживается в процессе изготовления. Кроме этого, аппаратная функция профилометра также вносит искажения в профилограмму обратного ската. К примеру, оптические профилометры просто не могут корректно измерять резкие скачки микрорельефа, так как отражение от крутого обратного ската и дифракция на границе приводят к тому, что свет не попадает обратно в объектив профилометра. Поэтому необходим метод оценки микрорельефа ДОЭ, который бы давал оценку геометрических параметров микрорельефа независимо от типа профилометра.

В работе [6] сформулирован алгоритм профилометрической характеризации линейных дифракционных решеток. Он состоит из следующих основных шагов:

- предварительная обработка: прочитать профилометрические данные, удалить краевые артефакты, повернуть систему координат данных в соответствии с направлением канавок штрихов решетки;

- найти границы штрихов (авторы использовали критерий минимумов профиля штрихов).

- усреднить, чтобы найти форму штрихов (усреднение как по нескольким штрихам, так и вдоль каждого штриха);

- аппроксимировать форму штриха к представлению, удобному для выбранной расчетной дифракционной модели;

- предсказать дифракционную эффективность, используя скалярную или точную дифракционную модель;

- вычесть усредненную форму штриха, чтобы найти остаточную неровность профиля;

- вычислить функцию спектральной плотности мощности с учетом остаточной неровности;

- подогнать функцию спектральной плотности мощности к теоретической модели спектра мощности неровной поверхности;

- предсказать угловое рассеяние, используя модель спектральной плотности мощности.

Очевидно, что данный алгоритм ориентирован на потребности характеризации дифракционных решеток для нужд спектроскопии. Он не предполагает вычисления каких-то обобщенных численных оценок формы микрорельефа, удобных для оперативного контроля вне зависимости от назначения элемента в целом. Тем не менее, первые пять этапов этого алгоритма носят общий характер и используются в той или иной степени и в предлагаемом авторами подходе.

Методы аппроксимации дифракционного микрорельефа

Соответствие микроструктуры реального ДОЭ расчетной кодированной фазовой функции и его дифракционная эффективность вдали от экстремумов фазовой функции (где расчетная форма профиля дифракционных зон линейна) зависят от наклона дифракционных зон и высоты скачка микрорельефа между зонами. Но определение правильности угла наклона каждой зоны усложняется тем, что в общем случае трудно достоверно определить положение измеряемого участка в расчетной системе координат ДОЭ и, соответственно, невозможно определить расчетный угол наклона данной дифракционной зоны. Высота скачка микрорельефа между соседними зонами тоже не является надежным параметром, как

сказано выше. Кроме этого неровность микрорельефа и шумы профилометра также осложняют оценку микрорельефа. Естественным решением всех этих проблем является полиномиальная аппроксимация профиля каждой дифракционной зоны в отдельности. Очевидно, что при отработанной технологии изготовления с малыми искажениями формы достаточно использовать линейную аппроксимацию для дифракционных зон вдали от экстремумов фазовой функции.

Однако прежде чем аппроксимировать профиль дифракционной зоны, необходимо устранить ненадежные данные вблизи ее границ. Это может быть осуществлено согласно алгоритму обработки профилограммы, стадии которого показаны на рис. 1. Расчетный микрорельеф 1, сформированный каким-либо методом на поверхности пленки или подложки, отображается профилометром в виде кривой 2. Для удаления высокочастотных шумов профилометрические данные сглаживаются путем усреднения по соседним точкам и дифференцируются (кривая 3). Нахождение экстремумов производной позволяет определить положение границ дифракцион-

ных зон. Ненадежная область вокруг этих границ (от B_1 до B_2) может быть определена достаточно просто как область между точками вокруг границы, где производная пересекает ноль. Линейная аппроксимирующая функция $A_i(x) = a_i x + b_i$ находится для каждой i -ой зоны отдельно между этими граничными участками (кривая 4).

При наличии существенных ошибок в форме профиля зон или при анализе зон с расчетным параболическим профилем может быть осуществлен переход от линейной аппроксимации к параболической. Критерием для этого может служить достаточно простое соображение. В работе [7] приведено аналитическое выражение для зависимости дифракционной эффективности от глубины параболического прогиба профиля линейной решетки "с блеском"

$$DE = \operatorname{sinc}^2(\Delta h/h),$$

где h – высота микрорельефа, Δh – максимальное отклонение параболической формы от расчетной линейной в центре дифракционной зоны. Если задано максимально допустимое значение падения дифракционной эффективности

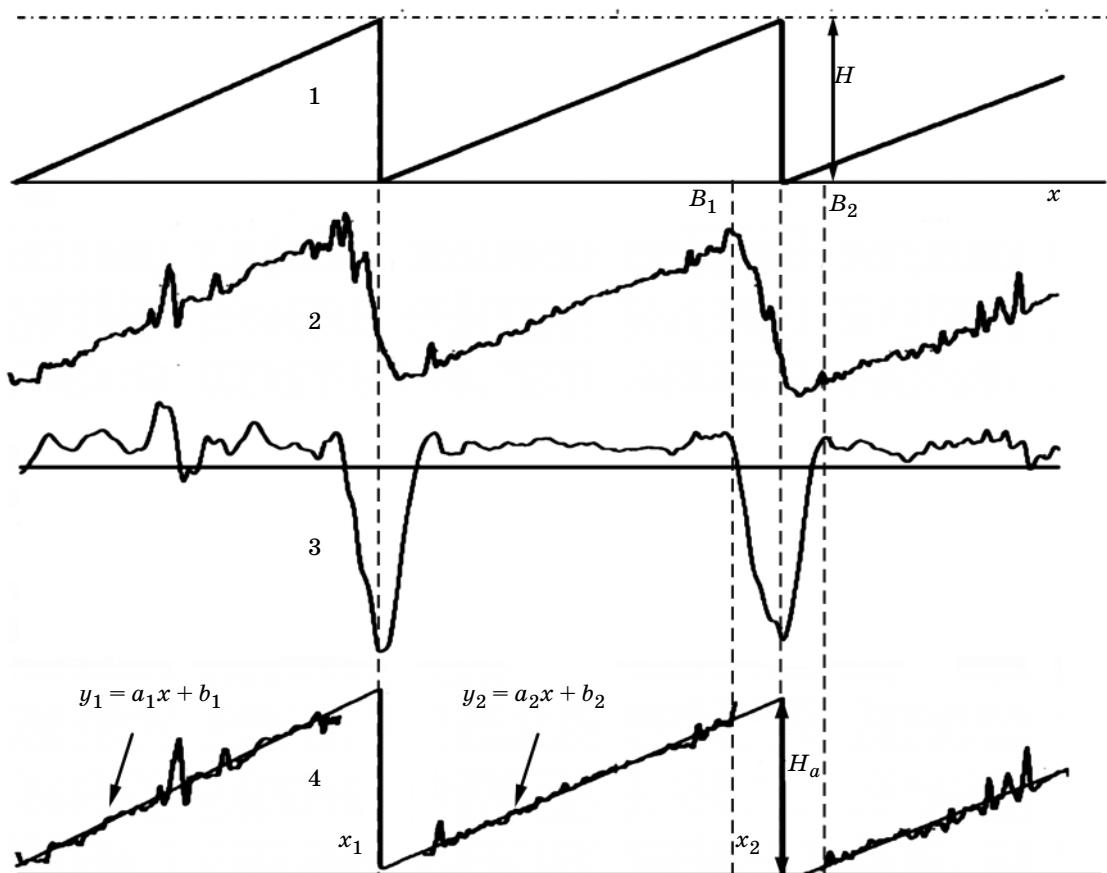


Рис. 1. Метод определения аппроксимированной глубины.

$\Delta DE = 1 - DE$, то можно вычислить допустимое значение $\Delta h/h$. Например, если $\Delta DE \leq 0,05$, то $\Delta h/h \leq 0,12$. Отсюда легко получить оценку предельно допустимого значения коэффициента квадратичного члена с полиномиальной аппроксимации, при достижении которого необходимо переходить на квадратичную аппроксимацию

$$c < 4(\Delta h/T^2),$$

где T – ширина анализируемой дифракционной зоны.

Определение аппроксимированной глубины

Полученную аппроксимирующую функцию $A_i(x)$ можно экстраполировать до границ зоны (кривая 4 на рис. 1), положение которых было определено по экстремумам первой производной. На основании этой экстраполяции можно ввести новый параметр количественной оценки дифракционного микрорельефа – разность высот между точками пересечения кривых, аппроксимирующих наклон поверхности дифракционных зон, с границами зон. Этот параметр назван “аппроксимированной глубиной”. Эта величина может быть определена двумя путями в зависимости от особенностей профилограммы.

Если профилограмма включает только одну целую зону и наклон базовой поверхности подложки ДОЭ незначителен, то аппроксимированная глубина H_1 может быть вычислена как

$$H_1 = A_i(x_1) - A_i(x_2),$$

где x_1 и x_2 – координаты границ дифракционной зоны (рис. 2). Данный метод определения аппроксимированной глубины был назван “двуухграницным” методом.

Если профилограмма содержит хотя бы две дифракционные зоны, то аппроксимированная глубина H_2 (рис. 2) может быть определена как

$$H_2 = A_i(x_2) - A_{i+1}(x_2).$$

Данный метод определения аппроксимированной глубины был назван “однограницным”.

Линейная аппроксимация в описанных выше методах может быть заменена на нелинейную в случае технологических ошибок передачи линейной формы микрорельефа дифракционных зон или их нелинейной расчетной формы. Метод также может быть распространен на анализ двумерных профилограмм, но в данной статье рассматривается только его более наглядная одномерная реализация.

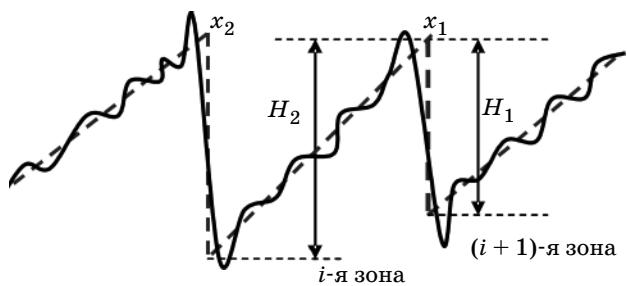


Рис. 2. Определение аппроксимированной глубины однограницным и двухграницным методами.

При программной реализации аппроксимации экспериментальных данных также легко получить информацию о среднеквадратичной ошибке отклонения экспериментальных данных от аппроксимирующей кривой, которая дает дополнительную информацию об ошибках изготовления.

Таким образом, графическая форма представления данных, сложная для оперативной оценки микрорельефа, может быть сведена к минимальному числу количественных характеристик локальной точности изготовления микрорельефа.

Сравнение методов определения аппроксимированной глубины

Проведем оценку устойчивости предложенных вариантов определения аппроксимированной глубины к основным измерительным погрешностям. На работу алгоритмов определения аппроксимированной глубины существенно влияют наклон поверхности измеряемого образца, а также точность определения границ зон. Точность определения границ зависит от размера области недостоверных данных вблизи границ зон и их характера (например, наличие пиков на границах зон, характерных для многих оптических профилометров). Поэтому была проведена оценка влияния данных параметров на однограницную и двухграницную вариации метода аппроксимированной глубины при наиболее типичной линейной форме дифракционных зон.

Для большей наглядности наряду с формулами для ошибок определения аппроксимированной глубины будут приведены численные оценки с использованием типовых параметров дифракционного микрорельефа: ширина дифракционных зон $T = 20$ мкм, глубина – 1 мкм, ширина обратных скатов в профилограмме на границе зон – 3 мкм, ошибка ΔT определения по-

локации границ дифракционных зон $\pm 0,5$ мкм, остаточный наклон базовой линии профилограммы – 5% от наклона дифракционных зон.

Двухграницный метод

В первую очередь было оценено влияние на аппроксимированную глубину остаточного наклона базовой линии профилограммы. Пусть $H(x)$ – измеренный профиль дифракционной зоны (рис. 3), точка с координатами (x_0, y_0) является точкой, которую находит алгоритм поиска границ дифракционных зон по производной, H – аппроксимированная глубина профиля без остаточного наклона и H' – высота дифракционной зоны с углом наклона базовой линии γ . Тогда обе высоты H и H' проходят через точку (x_0, y_0) .

Решая задачу координатным методом, получается

$$H = x_0 \tan \alpha,$$

$$H' = \cos \gamma (x_0 - y_0 \tan \gamma) \times \\ \times (\tan \alpha + \tan \gamma) / (1 - \tan \alpha \tan \gamma).$$

Приняв во внимание, что отношение y_0/x_0 приблизительно равно $1/2$, получается

$$\Delta H/H = \cos \gamma (1 - 0,5 \tan \alpha \tan \gamma + \\ + \tan \gamma / \tan \alpha + 0,5 \tan^2 \gamma) / (1 - \tan \alpha \tan \gamma) - 1.$$

Отбросив величины второго порядка малости, получается выражение для ошибки определения высоты

$$\Delta H/H = (\cos \gamma + \sin \gamma / \tan \alpha - 1).$$

Для остаточного наклона $\gamma = 0,05\alpha$ ошибка высоты составляет $\Delta H = 0,05H$.

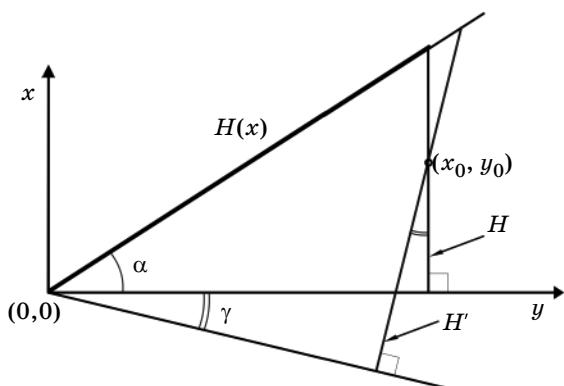


Рис. 3. Определение устойчивости двухграницного метода к наклону данных.

Далее оценивается устойчивость метода к неточности поиска границ. Пусть ΔT – максимальная ошибка поиска границы. Учтя то, что данный метод использует для определения аппроксимированной глубины две границы дифракционной зоны, определяется ошибка поиска высоты $\Delta H/H = 2\Delta T/T$. Для указанного выше примера профилограммы ошибка составила $\Delta H/H = 0,05$.

Однограницный метод

В первую очередь была проведена оценка влияния остаточного наклона γ базовой линии профилограммы на аппроксимированную глубину (рис. 4). Пусть A – точка, которую находит алгоритм поиска границ дифракционных зон, и через нее в обоих случаях проходит аппроксимированная высота дифракционной зоны. AH_0 и AP_0 – перпендикуляры, опущенные на прямые аппроксимирующие соседние зоны.

Выразим высоту H для профилограммы без наклона и высоту H' для профилограммы с наклоном на угол γ

$$H = AH_0 / \cos \alpha_1 + AP_0 / \cos \alpha_2,$$

$$H' = AH_0 / \cos(\alpha_1 + \gamma) + AP_0 / \cos(\alpha_2 + \gamma).$$

После тригонометрических преобразований, отбросив величины второго порядка малости, получается

$$H' = H / \cos \gamma,$$

$$\Delta H/H = \cos^{-1} \gamma - 1.$$

Если подставить в полученное выражение значение остаточного угла наклона, равное $0,05\alpha_1$

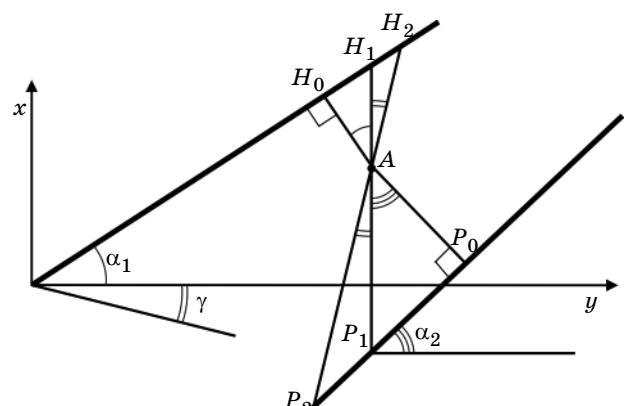


Рис. 4. Оценка влияния наклона на однограницный метод.

и параметры типовой дифракционной зоны, то ошибка глубины составит $\Delta H = 4 \times 10^{-5} H$.

Далее оценивалась устойчивость однограницного метода аппроксимированной глубины к ошибкам поиска границ. Ошибка определения глубины рельефа зависит от ошибки ΔT поиска границы между дифракционными зонами следующим образом:

$$\Delta H = \Delta T(\tan \alpha_1 - \tan \alpha_2),$$

$$\Delta H/H = \Delta T/T(1 - \tan \alpha_2/\tan \alpha_1).$$

То есть для решетки с постоянным наклоном зон ошибка вообще не возникает. Для случая ДОЭ с переменным периодом зон значение изменения периода (и соответственно тангенса угла наклона зон) принималось равным 10%. Тогда численная оценка ошибки равна $\Delta H/H = 0,0025$.

Как видно из проведенных оценок устойчивости к измерительным искажениям, однограницный метод аппроксимированной глубины более устойчив как к наклону подложки измеряемого образца, так и к ошибкам поиска границ дифракционных зон. Однако стоит отметить, что несмотря на лучшие результаты работы, однограницная вариация метода требует примерно в два раза больше данных по сравнению с двухграницным методом, так как для определения аппроксимированной высоты необходимы линейные аппроксимации хотя бы двух соседних зон. Такое не всегда представляется возможным, так как область измерения некоторых профило-

метров ограничена световым полем используемого объектива.

Метод “лестницы”

Из однограницного варианта метода определения аппроксимированной глубины следует альтернативный подход к обработке профилограмм. Типовым первым шагом в обработке практически любой профилограммы является горизонтальное выравнивание. Для случая слабо меняющегося наклона дифракционных зон предлагается наоборот, еще больше наклонить профилограмму до получения горизонтального положения ступенек микрорельефа (рис. 5). Это может быть реализовано алгоритмически достаточно просто: после выделения участков микрорельефа между границами дифракционных зон в профилограмму $H(x)$ вносится дополнительный наклон таким образом, чтобы сделать равным нулю коэффициент a'_i аппроксимирующих прямых $A'_i(x) = (a'_i x + b'_i)$ для определенной зоны или усредненный коэффициент наклона по нескольким дифракционным зонам в профилограмме. Аппроксимированная высота микрорельефа может быть определена в этом случае как среднее значение от $(b'_i - b'_{i-1})$.

Данный подход может быть достаточно легко реализован даже в рамках существующего программного обеспечения профилометров путем применения после принудительного наклона профилограммы функции измерения высоты ступеньки.

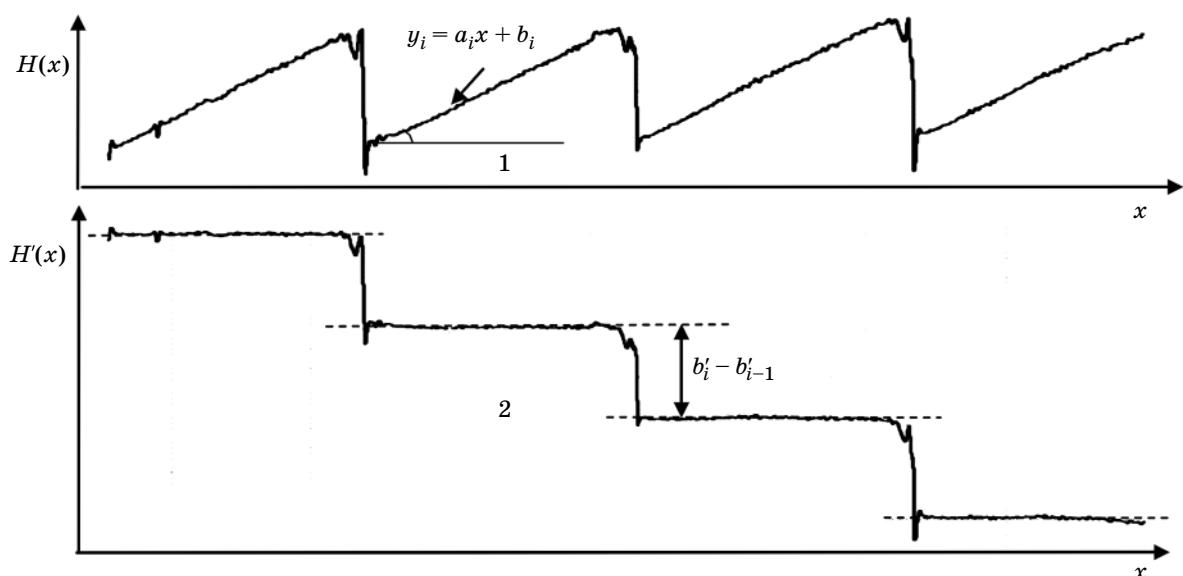


Рис. 5. Метод “лестницы”.

Применение метода лестницы, очевидно, ограничено тем, что при малом периоде дифракционных зон возрастает угол наклона α дифракционных зон к базовой поверхности ДОЭ, и соответственно возрастает ошибка определения глубины зон $\Delta H/H = 1 - \cos\alpha$. Вполне приемлемая точность измерения 1–1,5% достигима вплоть до углов 8–10°, что для ДОЭ, работающих в первом порядке и видимом световом диапазоне, означает применимость вплоть до периодов 6–7 мкм. Однако эта ошибка может быть легко устранена путем коррекции H с учетом известного угла α

$$H = (b'_i - b'_{i-1})/\cos\alpha.$$

Различие наклона $\Delta\alpha$ соседних дифракционных зон также вносит дополнительную ошибку в результат работы данного метода определения аппроксимированной глубины: $\Delta H = (1 - \cos\alpha + \sin\alpha \tan\Delta\alpha)$.

Использование метода “лестницы” в микропрототипировании позволяет быстро и наглядно измерить аппроксимированную глубину дифракционных решеток с “блеском”, подстраивая опорное зеркало так, чтобы интерференционные полосы на пилообразном рельфе были горизонтальными.

Заключение

Предложенный подход к определению количественной характеристики дифракционного микрорельефа – аппроксимированной глубины – позволяет повысить надежность оперативной характеристики высокоеффективных ДОЭ и делает ее практически независимой от типа профилометра. В зависимости от объема данных в профилограмме возможны однограничный или двухграницный варианты этого метода для пилообразного рельефа. Однограничный метод более устойчив к наклону образца и ошибке определения границы дифракционной зоны при обработке профилограммы, но требует большей длины трека профилограммы. Вариант однограничного метода – метод “лестницы” – может быть реализован с помощью функции измерения ступеньки в стандартном программном обеспечении профилометров принудительным наклоном профилограммы до получения горизонтального положения ступенек микрорельефа.

Измерение полной карты глубин микрорельефа ДОЭ возможно только в редких случаях при небольших размерах ДОЭ и при отсутствии в нем слишком узких для профилометра дифракционных зон. Поэтому измерение локальной глубины

микрорельефа производится обычно выборочно на нескольких участках или по нескольким сечениям элемента. Для определения годности ДОЭ желательно объединить все локальные значения глубины в одно число. Простое усреднение корректно только для случая использования равномерной освещенности ДОЭ с постоянным или слабо изменяющимся периодом дифракционных зон. Поскольку общая дифракционная эффективность является конечным критерием качества изготовления ДОЭ, то оценка точности выполнения элемента должна быть построена именно на ее основе. Один из простейших примеров такого подхода предложен в работе [8] для оценки дифракционной эффективности аксиально-симметричной дифракционной линзы по одномерной профилограмме, проходящей через центр линзы. В общем случае, когда нет явной симметрии микроструктуры и непрерывной профилограммы, можно использовать усреднение значений дифракционной эффективности, полученных моделированием локальной дифракционной эффективности из профилометрических данных небольших участков ДОЭ. Однако, необходимо учитывать искажение формы микрорельефа за счет сглаживания при свертке измеряемого профиля с аппаратной функцией профилометра. Построение алгоритма такой интегральной оценки выходит за рамки данной работы и будет рассмотрено авторами отдельно.

Работа выполнена при поддержке Междисциплинарного проекта № 15 Сибирского отделения Российской академии наук.

ЛИТЕРАТУРА

1. Gale M.T., Lang G.K., Raynor J.M., Schütz H., Prongué D. Fabrication of kinoform structures for optical computing // Appl. Opt. 1992. V. 31. № 3. P. 5712–5715.
2. Korolkov V.P., Nasyrov R.K., Shimansky R.V. Zone-boundary optimization for direct laser writing of continuous-relief diffractive optical elements // Appl. Opt. 2006. V. 45. № 1. P. 53–62.
3. Korolkov V.P., Malyshev A.I., Nikitin V.G., Cherkashin V.V., Poleshchuk A.G., Kharissov A.A. Application of gray-scale LDW-glass masks for fabrication of high-efficiency DOEs // Proc. SPIE. 1999. V. 3633. P. 129–138.
4. Kley E.B. Continuous profile writing by electron and optical lithography // Microelectronic Engineering. 1997. V. 34. № 3. P. 261–298.
5. Blough C.G., Rossi M., Mack S.K., Michaels R.L. Single-point diamond turning and replication

- of visible and near-infrared diffractive optical elements // *Appl. Opt.* 1997. V. 36. № 20. P. 4648–4654.
6. *Content D.A.* Diffraction grating groove analysis used to predict efficiency and scatter performance // Conference “Gradient Index, Miniature, and Diffractive Optical Systems”. Ed. by Kathman Alan D. / Proc. SPIE. 1999. V. 3778. P. 19–30.
-
7. *Fujita T., Nishihara N., Koyama J.* Blazed gratings and Fresnel lenses fabricated by electron-beam lithography // *Opt. Lett.* 1982. V. 7. № 12. P. 578–580.
8. *Golub M.A.* Optical performance evaluation from microrelief profile scans of diffractive optical elements // OSA Conference Technical Digest “Diffractive Optics and Micro-Optics”. Québec City, Canada, 2000. P. 110–112.