Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

А. В. Волков, Контроль параметров микрорельефа дифракционных оптических элементов с использованием тестовых дифракционных структур, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2001, выпуск 12, 179–185

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu80>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.81.55.215

26 апреля 2023 г., 16:33:04

Прикладная оптика

УДК 621.382

А.В. Волков

КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ МИКРОРЕЛЬЕФА ДИФРАКЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕСТОВЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ СТРУКТУР

Предложен и исследуется метод лазерного контроля качества микрорельефа дифракционных оптических элементов, осуществляемого на основе тестовых дифракционных структур (ТДС). Показана возможность контроля дифракционного микрорельефа оптических элементов среднего ИК-диапазона на основе линейных амплитудных ТДС с точностью 0,1 мкм.

1 Постановка задачи. Технологические проблемы создания дифракционных оптических элементов (ДОЭ) обусловлены малыми размерами микрорельефа (сравнимого с длиной волны оптического излучения), определяющего параметры элемента. Для получения микрорельефа используются, как правило, базовые технологии твердотельной микроэлектроники, такие как литография, химическое и плазменное травление, напыление тонких пленок и другие. Перечисленные процессы являются практически главными с точки зрения получения необходимой формы и геометрических параметров микрорельефа, а, следовательно, и требуемой фазовой функции ДОЭ.

Если для изделий микроэлектроники микрорельеф поверхности подложки выступает в качестве негативного фактора, то для ДОЭ – основным конструктивным элементом. В свою очередь появление микрорельефа с типичными значениями вариаций высоты от долей до десяти мкм (для видимого и инфракрасного диапазонов) существенно усложняет проведение практически всех технологических процессов. Принимая во внимание тот факт, что технология создания многоуровневых ДОЭ является многооперационной (многоэтапной), задача контроля параметров микрорельефа после выполнения очередной технологической операции представляется особенно актуальной.

2 Тестовые дифракционные структуры. Следует отметить, что контроль качества выполненных технологических процессов изготовления ДОЭ может быть проведен на основе корреляционного анализа его выходных параметров. Однако этот метод, учитывая многооперационность технологии, является малоинформативным. Для отработки индивидуальных технологических процессов представляется перспективным использование дополнительного набора специальных (достаточно простых для интерпретации формируемых оптических изображений) тестовых дифракционных структур (ТДС), фотошаблоны которых могут располагаться на свободных полях фотошаблонов изготавливаемых ДОЭ.

В качестве таких ТДС могут быть использованы:

1. бинарные и синусоидальные дифракционные решетки, дифракционные призмы;

Р и с. 1. Виды дифракционных решеток, с различной формой периода несущей

2. концентрические дифракционные решетки, обычные и цилиндрические дифракционные линзы.

Для рассмотренных типов ТДС имеются строгие аналитические зависимости, представляющие их выходные оптические отображения как функцию их характеристических геометрических параметров. Выбор упомянутых ТДС в качестве диагностических элементов обусловлен двумя основными причинами:

- сравнительной простотой идентификации, формируемых ими оптических изображений;
- микрорельеф широкого класса реальных ДОО, в первом приближении, может быть представлен в виде суперпозиции геометрических фрагментов представленных типов ТДС. На рис.1 приведены наиболее часто используемые дифракционные решетки [1].

Т а б л и ц а 1

Расчетные формулы для различных типов решеток

Тип базовой решетки $g_0(t)$	$\varphi_{\max}$	$B(\beta\alpha)$ для n дифракционного порядка
Синусоидальная; $\frac{1}{2} \cos(2\pi t)$	$\sim \pi$	$i^n J_n(\frac{1}{2} \varphi_{\max} \beta \alpha)$
Прямоугольная; 0,5 при $l \leq t < 0,5 + 1$ -0,5 при $0,5 + 1 \leq t < 1 + 1$ $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$	π	$\cos(\pi/2 \beta \alpha)$ при $n=0$ $2/\pi n \sin(\pi/2 \beta \alpha)$ при $n = \pm 1, \pm 3, \dots$ 0 при $\pm 2, \pm 4, \dots$
Пилообразная; $(t - 0,5 - 1)$ при $l \leq t < 1 + 1$ $l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$	2π	$(-1)^n \text{sinc}(\beta \alpha - n)$

В таблице 1 приведены расчетные формулы для различных типов базовых решеток, где g_0 – произвольная периодическая функция с периодом 1, принимающая значения $g_0(t) \in [-1,1]$; $\varphi_{\max} \in [0,2\pi]$ – максимальный сдвиг фаз на высоте микрорельефа; α – функция модуляции высоты микрорельефа; $\beta \in [0,1]$.

Кодирование амплитудного распределения в фазовое может осуществляться не только за счет модуляции высоты микрорельефа, но и за счет модуляции других параметров решетки (рис. 2-4).

Р и с. 2. Модуляция смещения центра штрихов дифракционного микрорельефа

Р и с. 3. Модуляция высоты штрихов дифракционного микрорельефа

Р и с. 4. Модуляция «скважности» штрихов дифракционного микрорельефа

Использование фотошаблонов ТДС контрастного и полутонного типов позволяет получить адекватное представление о реальном ДОО как с непрерывной фазовой функцией, так и со ступенчатой аппроксимацией последней.

Метод диагностического контроля качества индивидуальных технологических процессов с помощью ТДС основан на сравнительном анализе оптических изображений двух типов. К первому типу относятся изображения, полученные от реально участвующих в технологическом процессе ТДС, ко второму - изображения, формируемые идеальными (с геометрической точки зрения) структурами рассматриваемого типа [2]. При этом в качестве информативных параметров выступают угловое распределение и форма дифракционных максимумов, формируемых ТДС.

Выбор конкретных типов ТДС и их геометрического расположения на базовых фотошаблонах ДОО проводится с учетом специфических особенностей геометрии микрорельефа ДОО. В качестве примера на рис.5 представлен один из вариантов расположения ТДС на базовом фотошаблоне ДОО. Использование 2-х разнесенных групп ТДС необходимо для анализа точности совмещения фотошаблонов при использовании ступенчатой аппроксимации фазового микрорельефа ДОО.

Р и с. 5. Базовый фотошаблон ДОО (фотошаблон № 3 восьмиуровневой структуры фокусатора в отрезок) с ТДС двух типов бинарных решеток

3 Диагностика качества микрорельефа с помощью тестовых дифракционных структур. Выберем линейную ТДС (дифракционную решетку с периодом d при ширине штрихов b) в качестве базового объекта для разработки общих методологических принципов контроля качества технологических процессов, используемых при формировании микрорельефа ДОО. Не умаляя общности рассмотрения, остановимся на варианте изготовления ДОО отражающего типа. В этом случае распределение амплитуд дифрагировавших на ТДС волн в зависимости от угла φ имеет вид (считаем, что $d, b \gg \lambda$, λ - длина волны, т.е. соблюдены условия применимости приближения Френеля – Кирхгофа [3])

$$A = (A_o \sin \alpha \sin \beta) / (\alpha \sin \beta), \quad (1)$$

где: $\alpha = (\pi b / \lambda) \sin \varphi$; $\beta = (\pi d / \lambda) \sin \varphi$; N – число щелей; A_o - амплитуда, задаваемая одной щелью в направлении первичного пучка $\varphi = 0$.

Согласно (1) угловое положение главных максимумов определяется из условия

$$d \sin j_n = n\lambda, \quad (2)$$

где $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$

С целью обобщения (2) на ТДС других типов следует отметить, что такие факторы как форма штрихов, образующих решетку, материал основы и т.д. сказываются лишь на виде волны от отдельного штриха. Положение же главных максимумов определяется исключительно периодом решетки. В этой связи выражение (1) справедливо и для случая амплитудно-фазовых

ТДС, однако в этом случае множитель $\sin a / a$ необходимо заменить на выражение более общего вида $F(b, l, j)$, отражающее особенности геометрического профиля и оптические характеристики штриха [4].

С метрологической точки зрения представляет интерес значение угловой протяженности главных максимумов, определяемое из условия

$$\sin \varphi_{on} = -\sin \varphi_n = \lambda / dN, \quad (3)$$

где j_{on} - направляющая на минимум интенсивности, следующей за главным максимумом порядка n .

Как следует из (3), с ростом числа штрихов N угловая протяженность главных максимумов уменьшается и при $N \rightarrow \infty$ стремится к нулю.

В реальной технологической практике, учитывая ограничения габаритного характера на ТДС, приближение к условию $N \rightarrow \infty$ представляется проблематичным. В этой связи проведем оценку значений параметра $(j_{on} - j_n)$ для случая конечных (и достаточно малых) N , результаты которой представлены в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Зависимость угловой протяженности главного максимума (в градусах) от номера максимума n и количества штрихов N при $d / l = 10$

N	n					
	0	1	2	3	4	5
1	5,7	5,8	6,0	6,1	6,4	6,9
5	1,1	1,2	1,2	1,2	1,2	1,3
10	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7
20	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
50	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
100	0,05	0,07	0,08	0,06	0,06	0,06
φ_n	0	5,7	11,5	17,5	23,6	30,0

Примечание: В последней строке приведены значения углов φ_n (в градусах).

Из табличных данных следует, что при $n \geq 1$ точность определения угловых координат главных максимумов составляет $1 \div 2\%$ при выполнении условия $N \geq 100$. Приняв за основу указанную точность измерения, можно оценить минимальный размер ТДС (при $d / \lambda = 10$, $\lambda = 1 \text{ мкм}$, $N = 100$) величиной $L \cong 1 \text{ мм}$.

Период d определяется согласно (2) по экспериментальным значениям угловых положений главных максимумов. В тоже время следует, отметить, что для большинства практических случаев необходимость в контроле периода d отпадает, поскольку существующие в настоящее время технологические возможности создания фотошаблонов позволяют воспроизводить период с большой точностью. Поэтому рассматриваемая методика нацелена, прежде всего, не на определение периода d , а параметра b . Для этой цели удобно использовать не абсолютные значения интенсивностей главных максимумов (1), а отношение интенсивностей двух главных максимумов I_{nm} :

$$I_{nm} = I_n / I_m \quad (4)$$

В этом случае отпадает необходимость оценивания величины $I_0 = A_0^2$, которую трудно измерить с большой точностью, ввиду ее зависимости от дефектов фотошаблона, соотношения площадей ТДС и светового пятна, а также геометрического расположения пятна света относительно ТДС. При использовании выражения (4) следует избегать выбора нулевого порядка дифракции $n=0$, ввиду его большей относительной угловой протяженности $(j_{on} - j_n) / j_n$, что может явиться причиной появления дополнительной погрешности. Подстановка в выражение

(4) интенсивностей I_n и I_m в форме (1) приводит к появлению весьма громоздких, неудобных для практических целей выражений. В этой связи возникает вопрос о возможности и границах применимости более простого асимптотического приближения при $N \rightarrow \infty$.

В этом случае отношение интенсивностей I_{nm} имеет вид:

$$I_{nm} = m^2 (\sin^2(\pi n b / d)) / n^2 (\sin^2(\pi m b / d)). \quad (5)$$

Правомерность и условия применимости выражения (5) рассмотрены в работе [3], в которой приведена оценка параметра N , обеспечивающего заданную точность определения параметра b , в зависимости от угловой апертуры фотоприемника q . Конечным информативным параметром являлась величина $(b_\infty - b)$, где b_∞ - размер элемента, вычисленный по формуле (5); b - реальный размер элемента. Результаты оценки представлены на рис.6.

Р и с. 6. Зависимость сходимости b_∞ / d к b / d с ростом числа штрихов N ($b / d = 0,7; n = 1; m = 2$) при различных значениях апертурного фактора $\Delta = (d / \lambda) [\sin(\varphi_n + \theta) - \sin \varphi_n]$:
1 - 0,5; 2 - 0,3; 3 - 0,5; 4 - 0,02.

Как следует из рис.6, уже при $\Delta = 0,5$, что соответствует апертуре фотоприемника, равной угловому расстоянию между главными максимумами $n = 1$ и $m = 2$, величина расхождения $(b_\infty - b) / d$ составляет не более 1% при $N \geq 8$.

Определенный интерес представляют кривые 3 и 4, соответствующие значениям $\Delta = 0,05$ и 0,02, которые обеспечивают относительное расхождение порядка 0,1%.

Таким образом, использование асимптотического приближения следует считать правомерным при выборе апертурного угла фотоприемника q согласно условию

$$\theta = \arcsin[\sin \varphi_n + \Delta \lambda / d] - \varphi_n, \quad (6)$$

где значение апертурного фактора Δ следует выбирать в интервале $0,05 \div 0,5$ в зависимости от требуемой точности определения параметра b .

Как отмечалось выше, в экспериментальной практике следует использовать дифракционные максимумы с $n \geq 1$. Но и эти максимумы оказываются неэквивалентными (с точки зрения метрологической эффективности) при различных значениях параметра b / d . Согласно (5) оптимальная пара значений параметров n и m выбирается из условий:

$$n = 1, m = 2 \text{ при } b / d < 0,4 \text{ и } b / d > 0,6,$$

$$n = 1, m = 3 \text{ при } 0,4 < b / d < 0,6.$$

Результаты скалярного приближения практически совпадают с результатами точных расчетов до размеров элементов ТДС порядка длины волны. Сопоставительный анализ скалярного и векторного подходов [5] свидетельствует о том, что правомерность скалярного подхода сохраняется до $b \approx 0,5l$, внося погрешность не более 0,05l (при $l = 0,63 \text{ мкм}$; $b = 0,3 \text{ мкм}$, погрешность не более 0,03 мкм).

4 Экспериментальные исследования. Для используемой в качестве ТДС дифракционной решетки (для лазерного излучения с $\lambda = 0,63$ мкм), был изготовлен фотошаблон с периодом решетки 12 мкм. Методами фотолитографии [6] было изготовлено семь образцов фазовых дифракционных решеток с различной высотой микрорельефа: от 0,2 до 1,0 мкм. Профилограммы, полученные с помощью профилометра-профилографа 170311, представлены на рис. 7.

Р и с. 7. Профилограммы микрорельефа дифракционных решеток с высотой микрорельефа:
а – 0,2 мкм; б – 0,5 мкм; с – 1,0 мкм.

Положение максимумов, распределение и перераспределение интенсивностей представлены на рис. 8.

Р и с. 8. Положение максимумов и интенсивностей (качественное) для различных высот микрорельефа решетки в соответствии с рис. 7.

С использованием ТДС было изготовлено ряд многоуровневых (пяти- и восьмиуровневых) структур ДООЭ.

З а к л ю ч е н и е. Результаты работы подтверждают вывод об эффективности использования ТДС в качестве диагностических структур для контроля качества технологических процессов, используемых при формировании микрорельефа поверхности ДООЭ. На примере линейных ТДС показана возможность контроля размеров элементов ДООЭ с точностью порядка 0,1 мкм.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Методы компьютерной оптики. Под редакцией В.А.Сойфера. М.: Физматлит, 2000, 688с.
2. Волков В.В., Герасимов Л.Л. и др. Оптические методы измерения размеров элементов топологического рисунка БИС и СБИС. // Микроэлектроника. т.9. Вып.6. С. 554-563.
3. Борн В., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1973. 720 с.
4. Лансберг Г.С. Оптика. М.: Наука. 1976. 928с.
5. Sheng P. Application du laser a la mesure des longuers par interferometriks. RCA Rev., №39, 1978. P. 512.
6. Golub M.A., Rybakov O.E., Usplenjev G.V., Volkov A.V., Volotovskiy S.G. The technology of fabricating focusators of infrared laser radiation // Optics & Laser Technology, 1995. Vol. 25. № 4. P.215-218.