

Б. И. СПЕКТОР

(Новосибирск)

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ СИНТЕЗА ФАЗОВОЙ СТРУКТУРЫ КИНОФОРМОВ

Киноформные оптические элементы (КОЭ) по хорошо известным причинам [1] привлекают к себе внимание специалистов. Большинство применений киноформной оптики сводится к тому, что оптическая система включает одну поверхность, на которой тем или иным способом создан фазовый рельеф. Тем не менее существует возможность строить оптические системы, в которых все операции над световым потоком выполняются киноформными элементами. Однако такого рода задачи не могут быть эффективно решены без преодоления самого существенного недостатка КОЭ — ограниченной дифракционной эффективности (ДЭ). И если оптические системы, включающие одну поверхность КОЭ, все же удается использовать, то возможности создания и применения многокомпонентных или многопроходных систем на основе КОЭ не могут быть реализованы при ДЭ ниже 90—95%, поскольку можно считать, что $\eta_{\text{общ}} = \prod_{i=1}^N \eta_i$ или при $\eta_i = \eta$ $\eta_{\text{общ}} = \eta^N$, где N — количество КОЭ в системе, а η_i — ДЭ i -го КОЭ.

В [2] проанализированы зависимости ДЭ от числа уровней квантования фазы и от погрешностей выполнения фазового рельефа и теоретически показано, что для достижения ДЭ $\sim 95\%$ необходимо выполнить фазовый профиль с не менее чем 8—10 различными уровнями, а вообще говоря, и более. Кроме того, ДЭ снижается из-за неточности воспроизведения фазы и совмещения шаблонов. Таким образом, для повышения ДЭ необходимо, с одной стороны, повысить количество уровней квантования фазы, а с другой — это влечет за собой пропорциональный рост числа шаблонов и операций фотолитографии и травления, а значит, увеличение количества рассовмещений и снижение ДЭ относительно расчетного.

В настоящей работе рассматривается метод синтеза фазового профиля, основанный на известном принципе дихотомии, позволяющий значительно снизить количество шаблонов и технологических операций для достижения предельных значений ДЭ КОЭ.

Как показано в [2], фазовый профиль зон киноформной линзы (начиная со второй) с высокой точностью можно считать линейным. На рис. 1 штриховой линией показано сечение зон произвольного КОЭ шириной ρ_1, ρ_2 , в пределах которых набег фазы $\varphi(x)$ линейно изменяется от 0 до 2π . Причем плоскость сечения выбирается перпендикулярной плоскости КОЭ (или касательной к ней) и ориентирована вдоль максимального изменения фазы.

Технологической задачей изготовления КОЭ, в частности, является удаление материала из заштрихованных областей (см. рис. 1) либо его наращивание на подложку в незаштрихованных областях. Технологии позволяют создавать хорошо контролируемый рельеф только прямоуголь-

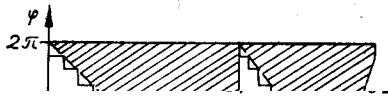


Рис. 1.

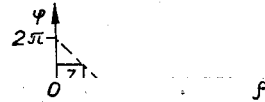


Рис. 2.

ного сечения. Следовательно, необходимо аппроксимировать линейную функцию ступенчатой с достаточной степенью точности. В [1, 3] технологически реализована такая аппроксимация. Проводится $(N-1)$ последовательных циклов технологических операций «фотолитография — травление» для получения N -ступенчатой аппроксимации фазового профиля. Форма шаблонов задается проекциями прямоугольников $1, 2, 3, \dots, N-1$ на ось x , а глубина травления в каждом технологическом цикле постоянна и пропорциональна $2\pi/N$ (рис. 2).

Ниже рассмотрим аппроксимацию фазового профиля ступенчатыми функциями с изменяющейся амплитудой (в отличие от описанного), которая и приводит к решению поставленной задачи.

Исходя из требований технологии определим бинарные положительные ступенчатые функции

$$S_k^\pm(x) = \frac{1 \pm r_k(x)}{2}, \quad (1)$$

где $\{r_k(x)\}$ — система функций Радемахера: $r_k(x) = \text{sign} \sin 2^k \pi x$, $x \in [0, 1]$.

На рис. 3 показаны линейные функции $\varphi^-(x)$, $\varphi^+(x)$ фазового профиля зон КОЭ шириной ρ :

$$\varphi^-(x) = 2\pi x/\rho; \quad \varphi^+(x) = 2\pi(1 - x/\rho). \quad (2)$$

Нетрудно видеть, что справедливо разложение

$$\varphi^-(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\pi}{2^k} S_k^-(x/\rho), \quad 0 \leq x \leq \rho \quad (3)$$

(действительно, $S_k^-(x/\rho)$ совпадает с α_k в двоичном разложении числа $\frac{x}{\rho} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\alpha_k}{2^k}$). Кроме того, в силу соотношения $S_k^+(x) + S_k^-(x) = 1$ получаем

$$\varphi^+(x) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2\pi}{2^k} S_k^+\left(\frac{x}{\rho}\right), \quad 0 \leq x \leq \rho. \quad (4)$$

В конкретных расчетах топологии КОЭ следует пользоваться аппроксимацией функций (2) частными суммами рядов (3) и (4):

$$\varphi^\pm(x) = \sum_{k=1}^M \frac{2\pi}{2^k} S_k^\pm\left(\frac{x}{\rho}\right), \quad (5)$$

2π — фазовая задержка КОЭ в пределах зоны шириной ρ , величина которого определяется типом КОЭ и соответствует глубине рельефа:

- а) пропускающий КОЭ: $2\pi \rightarrow \lambda/(n-1)$;
 б) отражающий КОЭ: $2\pi \rightarrow \lambda/2$;

n — коэффициент преломления; λ — длина волны рабочего излучения; $S_k^\pm(x)$ — функции пропускания шаблонов, соответствующие на рис. 3 проекции на ось x ; $2\pi/2^k$ — амплитуды $S_k^\pm(x)$ или с учетом (6) глубина

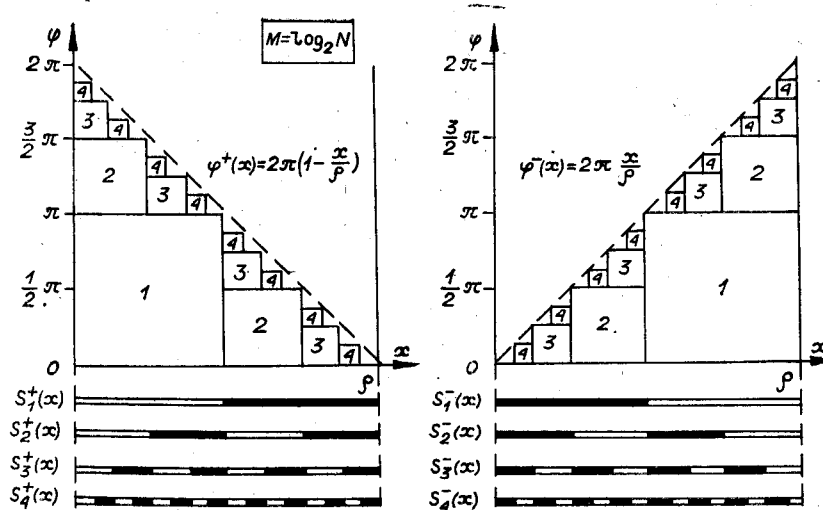


Рис. 3.

травления или высота наращивания. Причем функции пропускания шаблонов $S_k^\pm(x)$ выбираются с учетом типа фоторезиста (положительного или отрицательного) и вида дальнейшей технологии; M — число членов ряда, соответствующее числу шаблонов.

При создании КОЭ могут быть зоны, в которых функция фазового профиля значительно отклоняется от линейной. Это, например, 1-я и 2-я зоны киноформной линзы, корректоры и т. д. В этом случае (рис. 4) предлагается проводить кусочно-линейную аппроксимацию функции $\varphi(x)$. Учитывая, что для поля КОЭ, в пределах которого справедлива линейная аппроксимация рядом (5), уже выбраны соответствующие коэффициенты (глубина травления, высота наращивания), будем искать $x = \rho_1$ (см. рис. 4), удовлетворяющий уравнению $\varphi(x) = \pi$. Таким образом, определяется топология зоны $\varphi(x)$ в 1-м шаблоне КОЭ. Далее проводится кусочно-линейная аппроксимация $\varphi(x)$ относительно точки $\varphi(\rho_1)$ и оценивается максимальное отклонение Δ_1 . Если $\Delta_1 < 2\pi/2^M$, то построение топологии следующих шаблонов продолжается согласно ряду (5), а зона разбивается на две относительно ρ_1 . Если предыдущее неравенство несправедливо, то находят точки $\rho_{1/2}$ и $\rho_{3/2}$, соответствующие решениям уравнений $\varphi(x) = \pi \pm \pi/2$, и определяют топологию 2-го шаблона. При построении топологии следующих шаблонов операции повторяются. Легко показать, что для достижения хорошей аппроксимации обычно достаточно 1–2 шагов.

Очевидно, что в описываемом методе количество уровней квантования фазы N равно 2^M , где M — число членов ряда (5) и, следовательно, шаблонов. Таким образом, для достижения ДЭ $\sim 95\%$ теоретически достаточно 3 шаблонов [2]. Соответствующее число уровней квантования фазы 8.

Отметим, что если число уровней квантования фазы N отличается от $2l$, где $l = 1, 2, 3, \dots$, то минимальное необходимое число шаблонов определяется из выражения

$$M = \text{Ent}(\log_2 N) + 1,$$

при этом появляется многозначность в выборе топологии шаблонов и однозначный выбор можно осуществить

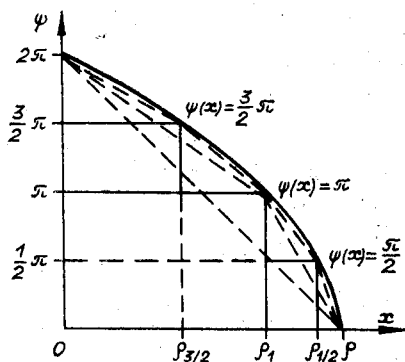


Рис. 4.

каким-либо дополнительным условием, например: «минимизация максимальной высоты наращивания» — или другим. На рис. 5 приведен пример 12-уровневого квантования и некоторые варианты (а — в) его реализации с помощью четырех шаблонов, причем сформулированному выше условию удовлетворяет вариант «в» (см. рис. 5). Поскольку наибольший интерес представляет возможность получения максимального N при минимуме шаблонов-операций, то не будем останавливаться на формализме этих вариантов разложения, хотя на практике при больших N этим можно воспользоваться.

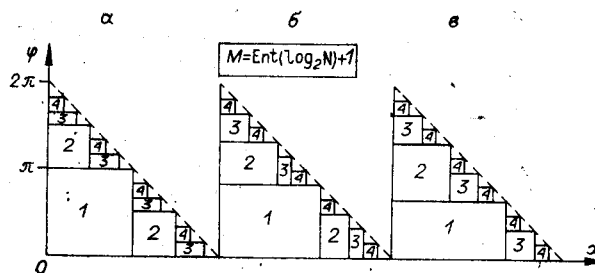


Рис. 5.

Описываемый метод является итерационным, т. е. имеется возможность продолжать технологические операции с любого M (5). Чувствительность же метода к рассовмещению шаблонов значительно выше и анализируется в [4]. Дело в том, что при рассовмещении шаблонов в конечной структуре могут возникать нежелательные «столбики» или «провалы».

С точки зрения перспективной реализации описываемого метода следует обратить внимание также на прямые (бесшаблонные) технологии. В работе [1] дан обзор технологических методов создания поверхностного рельефа КОЭ и рассматривается перспективная возможность прямого формирования фазового профиля при управлении параметрами технологического процесса по функции фазового профиля. Нам же представляется интересным использование принципа дихотомии для прямых технологий, т. е. функции $S_k^\pm(x)$ последовательно «накладываются» на материал при стабильных параметрах технологического процесса, которые изменяются лишь от цикла к циклу как коэффициенты ряда (5). Эта разница становится очевидной, если упомянуть о сравнении аналоговой с цифровой вычислительной техникой.

Для реализации прямых технологий характерно создание специализированных строителей, в которых материал подложки (возможно, находящийся в соответствующей среде) перемещается относительно сфокусированного пучка [1, 5] под контролем интерферометрических датчиков. Этот путь во многом решает проблему рассовмещения шаблонов и позволяет надеяться на возможность создания высококачественных КОЭ с ДЭ ~ 100%. Среди новейших микротехнологий, которые могут оказать влияние на прогресс в КОЭ, обращают на себя внимание лазерный отжиг, эпитаксия (газовая и жидкостная), причем процессы эпитаксии носят обратимый характер (рост — травление), легирование с последующим селективным травлением и некоторые другие. С точки зрения реализации этих технологий сильно возрастают требования к качеству и однородности подложек и, по-видимому, перспективно применение одного из самых совершенных и хорошо изученных кристаллов — кремния.

В заключение автор благодарит П. Е. Твердохлеба, М. Л. Аграповского и О. И. Потатуркина за полезные консультации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коронкевич В. П. и др. Киноформные оптические элементы: методы расчета, технология изготовления, практическое применение. — Автометрия, 1985, № 1.
2. Ленкова Г. А. Киноформы. Синтез фазовой структуры и допустимые погрешности. — Новосибирск, 1979. (Препринт/АН СССР, Сиб. отд-ние; 98).
3. D'Auria L., Huignard J. P., Roy A. M. and Spitz E. Photolithographic fabrication of thin film lenses. — Opt. Commun., 1972, v. 5, N 4, p. 232.

4. Пальчикова И. Г., Рябчун А. Г. О влиянии погрешностей изготовления киноформов на функцию зрачка.— Автометрия, 1985, № 6.
5. Спектор Б. И., Твердохлеб П. Е., Трубецкой А. В., Щербаченко А. М. Лазерная запись высокоинформативных изображений.— Там же.

Поступила в редакцию 4 июля 1985 г.

УДК 535.4 : 519.28

И. Г. ПАЛЬЧИКОВА, А. Г. РЯБЧУН
(Новосибирск)

О ВЛИЯНИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КИНОФОРМОВ НА ФУНКЦИЮ ЗРАЧКА

Технология изготовления киноформов с помощью фотолитографического процесса включает в себя подготовку комплекта фотошаблонов, топология которых переводится в рельеф подложки (стеклянной, кварцевой, германиевой и т. п.) путем химического, ионного или плазмохимического травления [1, 2]. Многоступенчатый рельеф формируется методом многоступенчатого травления, на каждом шаге производится фотолитография с помощью соответствующего шаблона. Если при каждой фотолитографии подложка травится на одинаковую глубину, равную $2\pi L/N$ (N — число ступеней рельефа, $L=1$), что возможно для любого N , то требуется $M_0 = N - 1$ шаблонов (случай I); если же $N = 2^m$ (m — целое), то число шаблонов для данного N можно резко уменьшить: $M_0 = \log_2 N = m$, но при этом глубина травления подложки $2\pi L/N$ зависит от порядкового номера фотолитографии M , поскольку $L = 2^{M-1}$ ($M = 1, 2, 3, \dots, M_0$) (случай II). Ошибки изготовления или совмещения фотошаблонов приводят к искажению световой волны после киноформа.

Определение действия такого искажения на качество изображения затрудняется тем, что при прохождении света через киноформ возникают различные дифракционные порядки, из которых интерес представляет лишь первый. В работе определяется влияние погрешностей изготовления или совмещения одного из фотошаблонов на функцию зрачка киноформа для первого дифракционного порядка для двух способов травления.

Пусть комплексная прозрачность оптического элемента $F(x, y) = \exp[j\varphi(x, y)]$, где x, y — координаты выходного зрачка. При изготовлении его в виде киноформа фазовое распределение $\varphi(x, y)$ моделирует-

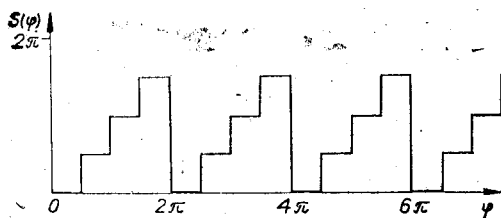


Рис. 1.

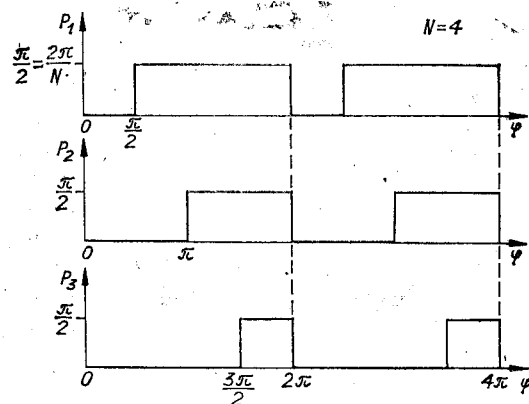


Рис. 2.