

## ТЕХНОЛОГИИ И ЭЛЕМЕНТЫ ФОТОНИКИ

УДК 621.315.592 : 772.99

А. Г. Поleshук

(Новосибирск)

## ДИФРАКЦИОННЫЕ ФИЛЬТРЫ С ПЕРЕМЕННЫМ ПРОПУСКАНИЕМ

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) могут быть использованы во многих научных и промышленных применениях для замены классических оптических компонентов. В ряде случаев такая замена позволяет придать существующим оптическим системам дополнительные полезные свойства. Описывается новое применение ДОЭ для плавной или ступенчатой регулировки интенсивности оптического излучения. Разработаны и исследованы дифракционные аналоги классических нейтральных светофильтров переменной плотности с линейным и круговым изменениями пропускания. Дифракционные фильтры представляют собой линейные или круговые решетки (амплитудные или фазовые) с постоянным периодом и дифракционной эффективностью, меняющейся вдоль решетки. В качестве выходного используется нулевой порядок дифракции, распространяющийся сквозь решетку без углового отклонения. В отличие от известных аналогов дифракционные фильтры позволяют изменять интенсивность проходящего светового потока по заданному закону, не имеют ограничения на мощность регулируемого светового потока и могут быть использованы в оптических системах как светоделители с регулируемым коэффициентом деления. Приводятся результаты испытаний кругового дифракционного фильтра, изготовленного методом прямой лазерной записи на пленке хрома. Диапазон изменения пропускания достигает 20 при угле поворота фильтра 340°. Обсуждена возможность использования фазового дифракционного фильтра в качестве модулятора излучения мощного технологического лазера.

**Введение.** Во многих применениях дифракционные оптические элементы (ДОЭ) могут успешно заменять обычные классические компоненты, а также значительно улучшать их эксплуатационные свойства, расширять области применения при одновременном снижении стоимости и трудоемкости изготовления. В настоящее время уже известно много примеров такой замены. Это, например, объективы и светоделители в лазерных головках считывания информации с дисков, асферические корректоры волновых фронтов, оптические шины данных [1—3] и другие.

В настоящей работе описывается еще одно новое применение ДОЭ для плавной или ступенчатой регулировки интенсивности оптического излучения [4]. Разработаны и исследованы дифракционные аналоги классических нейтральных фильтров переменной плотности. В отличие от известных аналогов дифракционные фильтры позволяют изменять интенсивность проходящего светового потока по заданному закону, не имеют ограничения на мощность регулируемого светового потока и могут быть использованы в оптических системах как светоделители с переменным коэффициентом деления.

1. **Поглощающий фильтр.** Для регулировки интенсивности проходящего оптического излучения широко применяются фильтры переменной плотности [5]. Классический светофильтр переменной плотности (рис. 1, а) состоит из оптического клина, изготовленного из однородного поглощающего вещества, и установленного последовательно дополнительного клина из прозрачного для оптического излучения вещества. Световое излучение частично поглощается

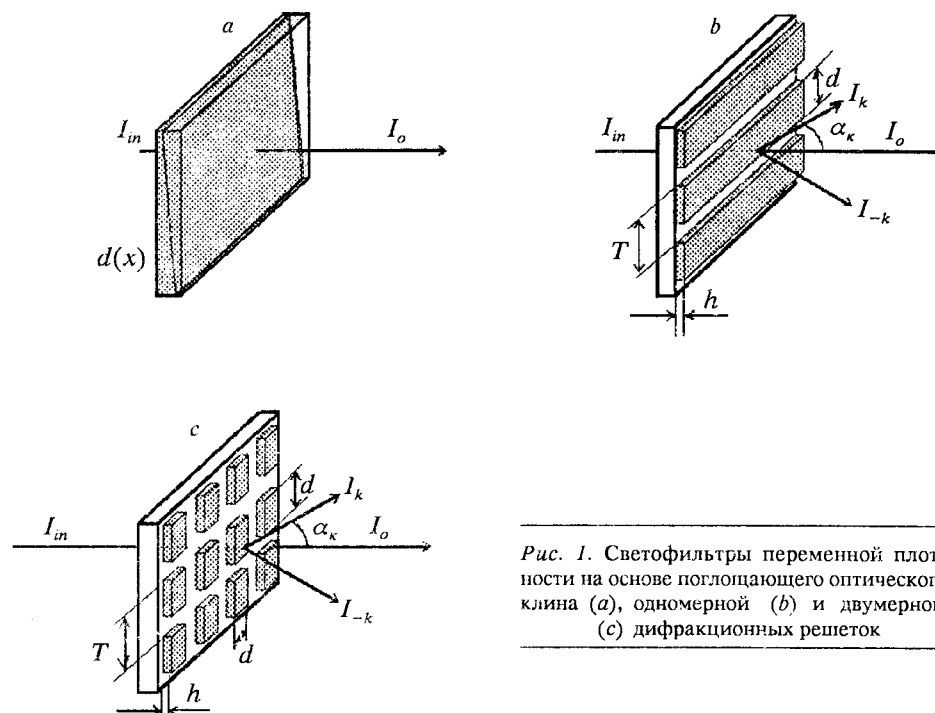


Рис. 1. Светофильтры переменной плотности на основе поглощающего оптического клина (а), одномерной (б) и двумерной (с) дифракционных решеток

веществом первого клина. Изменение толщины клина по одной из координат обеспечивает плавную регулировку проходящего светофильтра оптического излучения. В более дешевых конструкциях поверхностный слой создается, как правило, путем напыления на прозрачную подложку из оптического материала поглощающего слоя (обычно хрома) переменной толщины. Изменение толщины слоя по координате  $x$  обеспечивает плавную регулировку оптического излучения.

Интенсивность выходного излучения  $I_o$  связана с входным  $I_{in}$  экспоненциальным законом [5]. Коэффициент пропускания поглощающего фильтра определяется выражением

$$\eta = I_o/I_{in} = \exp[-\beta d(x)], \quad (1)$$

$\beta$  — коэффициент поглощения;  $d(x)$  — толщина поглощающего слоя в зависимости от координаты  $x$ . Линейное изменение толщины клина приводит к логарифмическому изменению пропускания фильтра (т. е. к линейному изменению оптической плотности). Однако такие фильтры имеют ряд недостатков. Главные из них:

- закон изменения коэффициента пропускания (1) нарушается, в частности, из-за явления интерференции в поглощающем слое;
- технически очень сложно обеспечить воспроизводимое напыление поглощающего слоя с заданным законом изменения толщины;
- поглощающие светофильтры переменной плотности оптического излучения не работают при больших плотностях мощности оптического излучения, так как имеют низкую лучевую стойкость. Поверхностный слой светофильтра нагревается и разрушается. Это делает невозможным использование таких светофильтров для управления излучением мощных технологических лазеров;

— слой поглощающего покрытия (например, хрома) имеет достаточно высокий коэффициент отражения (около 50—60 %), поэтому попадание отраженного излучения обратно в лазер приводит к нарушению его работы.

Использование методов и технологий дифракционной оптики позволяет создать фильтр, устраняющий или минимизирующий указанные недостатки.

2. Дифракционный фильтр. Световой поток, проходя дифракционную решетку (ДР), разлагается на ряд дифракционных порядков (рис. 1, *b*). Нулевой порядок с интенсивностью  $I_0$  не изменяет направления распространения, а боковые дифракционные порядки с интенсивностью  $I_k$  распространяются под углами  $\alpha_k = k\lambda/T$  к оптической оси, где  $k$  — номер дифракционного порядка;  $T$  — период штрихов решетки;  $\lambda$  — длина волны оптического излучения [5]. Интенсивность излучения  $I_0$  и фаза  $\Psi$  волнового фронта на выходе из одномерной ДР с прямоугольной формой штрихов в нулевом порядке ( $k = 0$ ) описываются выражениями (без учета потерь на отражение)

$$\begin{aligned} I_0 &= I_m |t(d/T)\exp(i\varphi) + [(T-d)/T]|^2 = \\ &= I_m [Q^2 t^2 + (1-Q)^2 + 2tQ(1-Q)\cos(\varphi)], \end{aligned} \quad (2a)$$

$$\Psi = \arctg [tQ\sin\varphi / (1-Q + tQ\cos\varphi)],$$

а двумерной решетки (рис. 1, *c*) с ячейками квадратной формы —

$$\begin{aligned} I_0 &= I_m |t(d/T)^2 \exp(i\varphi) + [(T-d)^2/T^2]|^2 = \\ &= I_m [Q^4 t^2 + (1-Q)^4 + 2tQ^2(1-Q)^2 \cos(\varphi)], \end{aligned} \quad (2б)$$

$$\Psi = \arctg [tQ^2 \sin\varphi / (1-Q^2 + tQ^2 \cos\varphi)],$$

где  $\varphi$  и  $t$  — соответственно фазовый сдвиг и амплитудный коэффициент пропускания штриха решетки;  $d$  — ширина штриха;  $Q = d/T$  — скважность одномерной и двумерной решеток. Фазовый сдвиг определяется глубиной  $h$  штрихов решетки:  $\varphi = h(n-1)2\pi/\lambda$ , где  $n$  — коэффициент преломления материала решетки.

Из выражений (2а), (2б) следует, что распределение интенсивности и фазы выходного излучения зависит от геометрических параметров штрихов решетки и длины волны света  $\lambda$ . Таким образом, изменяя эти параметры вдоль одной из координат решетки, например  $x$ , можно управлять величиной выходного излучения. На этом эффекте и основана работа предлагаемых фильтров. Нулевой порядок дифракции не изменяет направления распространения, не имеет ограничений по дифракционной эффективности (при  $d = 0$ ,  $I_0 = I_m$ ) и поэтому используется как выходной. Коэффициент пропускания такого фильтра

$$\eta(x) = I_0(x)/I_m(x) \quad (3)$$

определяется долей света, уходящего за счет дифракции из пучка нулевого порядка. Используемая в светофильтре ДР может быть как амплитудной, так и фазовой.

*Амплитудная решетка.* Если амплитудный коэффициент пропускания штрихов решетки  $t = 0$  (штрихи непрозрачные), то из выражения (2) следует, что коэффициент пропускания фильтра зависит только от изменения скважности штрихов решетки вдоль выбранной координаты. Для линейной амплитудной одномерной и двумерной решеток коэффициент пропускания определяется формулами, приведенными в таблице, соответственно ряды 1 и 2. Пропускание такого фильтра не зависит от длины волны.

На рис. 2 показаны варианты выполнения дифракционных фильтров на основе линейных одномерной (*a*), двумерной (*b*) и круговых (*c*, *d*) ДР. Фильтр на основе двумерной решетки (*b*) можно представить как произведение двух скрещенных под прямым углом одномерных решеток (*a*). Однако на выходе такого фильтра имеется значительно больше дифракционных порядков. Коэффициент пропускания такого фильтра приведен в таблице, ряд 2. Отношение величин максимального пропускания к минимальному (динамический

Номер ряда	Тип фильтра	Коэффициент пропускания	Погрешность размеров $\epsilon_d = \delta\eta/\delta d$	Погрешность глубины $\epsilon_h = \delta\eta/\delta h$ ( $k = 2\pi/\lambda$ )	Фазовый сдвиг $\Psi$ волнового фронта
1	Амплитудная одномерная решетка	$\eta(x) = [1 - Q(x)]^2$	$-\frac{2}{T} \left(1 - \frac{d}{T}\right)$	Нет	Нет
2	Амплитудная двумерная решетка	$\eta(x, y) = [1 - Q(x, y)]^4$	$-\frac{4}{T} \left(1 - \frac{d}{T}\right)^3$	Нет	Нет
3	Фазовая одномерная решетка	$\eta(x) = ([1 - 2Q(x)])^2$	$-\frac{4}{T} \left(1 - 2\frac{d}{T}\right)$	$-k(n-1)Q(1-Q) \times \sin[k(n-1)h]$	$\arctg\{Q\sin[k(n-1)h]/[1-Q + Q\cos(k(n-1)h)]\}$
4	Фазовая двумерная решетка	$\eta(x, y) = ([1 - 2Q^2(x, y)])^2$	$-\frac{8}{T^2} \left(1 - 2\frac{d^2}{T^2}\right)$	$-k(n-1)Q^2(1-Q)^2 \times \sin[k(n-1)h]$	$\arctg\{Q^2\sin[k(n-1)h]/[1-Q^2 + Q^2\cos(k(n-1)h)]\}$

диапазон) у такого фильтра выше, чем у одномерного. Фильтр с угловым изменением пропускания (с) представляет собой круговую дифракционную решетку (аксикон) с постоянным периодом по радиусу и скважностью  $Q(\varphi)$ , меняющейся в зависимости от угла поворота  $\varphi$ .

Такая конструкция фильтра более удобна для различных применений. Фильтр с круговым растром ячеек квадратной формы с изменяющейся по углу площадью показан на рис. 2, d. Такой фильтр имеет больший динамический диапазон и большее число дифракционных порядков на выходе. Возможен вариант выполнения углового фильтра с радиальными штрихами. Однако период такой решетки будет меняться от центра к периферии, приводя к изменению угла дифракции  $\alpha$ , а это не всегда удобно.

В общем случае функция пропускания дифракционного фильтра может изменяться заданным образом по обеим координатам. В этом случае фильтр представляет собой высокочастотный двумерный растр однотипных поглощающих или вносящих фазовый сдвиг элементов переменной площади. Такие

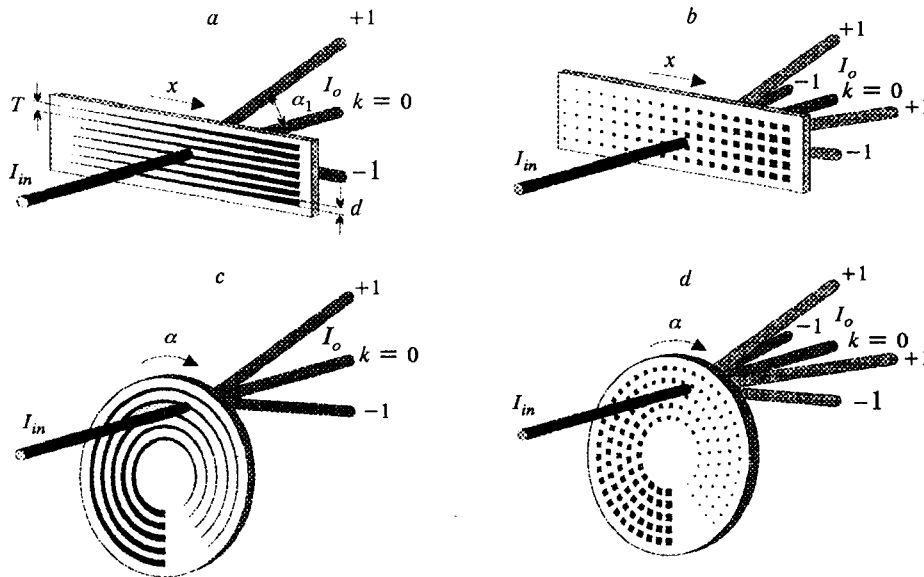


Рис. 2. Варианты выполнения дифракционных фильтров на основе линейной одномерной (a), двумерной (b) и круговых (c, d) дифракционных решеток

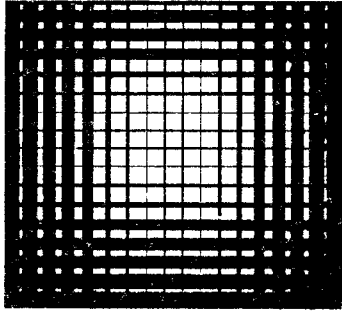


Рис. 3. Дифракционный фильтр с гауссовой функцией пропускания

бинарные маски легко изготавливаются и копируются методами литографии. Характеристики светового потока, прошедшего через фильтр, зависят от вида процедуры кодирования, так как на практике форма отсчетов отличается от  $\delta$  функций и имеет вид прозрачных участков (полосок для одномерного и квадратов или кругов различного размера для двумерного случаев) конечной ширины на не-

прозрачном фоне. Для кодирования полутонной функции наиболее часто используют частотно-импульсную или широтно-импульсную функции пропускания. В примерах фильтров на рис. 2 использована широтно-импульсная модуляция.

В качестве примера на рис. 3 показан вариант дифракционного фильтра с гауссовой зависимостью коэффициента пропускания:  $\eta(x, y) = \exp[-(x^2 + y^2)/\sigma^2]$ . Из выражения для коэффициента пропускания (см. таблицу, ряд 2) следует, что скважность решетки должна меняться в этом случае по закону:

$$Q(x, y) = 1 - \exp[-(x^2 + y^2)/4\sigma^2].$$

**Фазовая решетка.** Фазовая решетка не поглощает излучение ( $t = 1$ ), а перераспределяет его по дифракционным порядкам. Это позволяет придать светофильтру на основе фазовой решетки принципиально новые свойства, отсутствующие у классических аналогов: возможность управления (регулирования) большими мощностями: оптического излучения, например, технологических лазеров.

В фазовой решетке штрихи выполнены в виде рельефных углублений в поверхностном слое пластины. Форма рельефа может быть как прямоугольной, так и синусоидальной. Технически проще изготовить фазовую решетку с прямоугольным профилем штрихов, имеющих глубину  $h$ . Коэффициент пропускания светофильтра на основе фазовой одномерной и двумерной ДР зависит от скважности  $Q$  и фазового сдвига  $\varphi$ , вносимого штрихами, и определяется выражениями

$$\eta = (1 - Q)^2 + Q^2 + 2Q(1 - Q)\cos(\varphi), \quad (4a)$$

$$\eta = Q^4 t^2 + (1 - Q)^4 + 2tQ^2(1 - Q)^2\cos(\varphi). \quad (4б)$$

Штрихи решетки выполнены в виде углублений прямоугольной формы с глубиной в диапазоне от  $h = 0$  до  $h = (\lambda/2)/(n - 1)$  для светофильтра, работающего на пропускание, и до  $h = \lambda/4$  для светофильтра, работающего на отражение.

На рис. 4 показаны зависимости коэффициента пропускания  $\eta$  предлагаемых светофильтров от величины скважности  $Q$  для дифракционных фильтров на основе амплитудных (*a*) и фазовых (*б*) решеток. Коэффициент пропускания амплитудного фильтра плавно изменяется от  $\eta = 1$  до  $\eta = 0$  при изменении скважности от 0 до 1. Пропускание фазового фильтра имеет минимум при  $Q = 0,5$ . Видно, что при  $\varphi = \pi$  диапазон изменения пропускания светофильтра наиболее широкий: от  $\eta = 1$  (полное пропускание) при  $Q = 0$  до  $\eta = 0$  (отсутствие пропускания) при  $Q = 0,5$ . Для этого случая выражения для коэффициента пропускания светофильтра на основе одномерной и соответственно двумерной решеток приведены в таблице, ряды 3 и 4.

Если необходимо получить заданную функцию  $f(\theta)$  изменения коэффициента пропускания светофильтра в зависимости от координаты  $x$  или угла

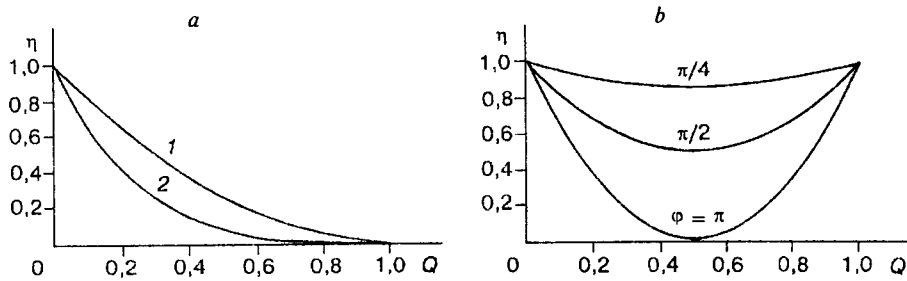


Рис. 4. Зависимости функции пропускания дифракционных фильтров на основе амплитудных (а) и фазовых (б) решеток

поворота  $\theta$ , то ширина штрихов  $d$  решетки кругового фильтра (см. рис. 2,  $d$ ) должна меняться по следующему закону:

$$d = T \frac{\sqrt{f(\theta)} - 1}{2}.$$

Наиболее часто на практике используется линейная или логарифмическая зависимость коэффициента пропускания светофильтра от угла поворота  $\theta$ . Например, для  $f(\theta) = \lg(\theta)$  получим  $\eta = \lg(\theta)$ , т. е. логарифмическую зависимость коэффициента пропускания светофильтра.

3. Погрешности. Фильтр должен ослаблять оптическое излучение на заданную величину и не вносить, по возможности, искажений волнового фронта. Имеются два основных источника погрешностей, вносимых фильтром в выходной световой поток.

*Коэффициент пропускания.* В классических фильтрах погрешность коэффициента пропускания обусловлена ошибкой в толщине слоя напыления поглощающего вещества (см. выражение (1)). Погрешность коэффициента пропускания дифракционных фильтров  $\epsilon_d$  обусловлена ошибками выполнения топологии решетки — ширины линии  $d$  для одномерной и размеров сторон прямоугольников для двумерной решеток. Погрешность  $\epsilon_h$  глубины  $h$  травления дифракционной структуры также изменяет коэффициент пропускания фильтра. Для лучшего разделения дифракционных порядков необходимо уменьшать период штрихов решетки  $T$ . Однако при малых размерах периода решетки ( $T < 10$  мкм) начинают сказываться погрешности изготовления, обычные для технологии микроэлектроники и дифракционной оптики, — это конечный размер записывающего пятна и шаг записи.

Для определения погрешностей  $\epsilon_d$  и  $\epsilon_h$  необходимо дифференцировать выражение для коэффициента пропускания (см. таблицу) по  $d$  и  $h$ . Соответствующие выражения  $\epsilon_h = \delta\eta/\delta h$  и  $\epsilon_d = \delta\eta/\delta d$  для фильтров различного типа приведены в таблице. Видно, что все варианты фильтров имеют максимальную чувствительность к изменению размеров топологии решетки при минимальных размерах элементов решетки.

Конечные размеры лазерного пучка, проходящего фильтр, приводят к появлению небольшой асимметрии интенсивности в выходном распределении излучения. Это вызвано изменением скважности решетки фильтра вдоль входной апертуры, которое приводит к искажению коэффициента пропускания. Аналогичный источник погрешностей имеет место и в классических фильтрах переменной плотности. Если рабочий радиус фильтра  $R$ , а размер апертуры входного пучка  $b$ , то при линейном законе коэффициента пропускания фильтра эта погрешность будет следующей:  $\epsilon = b\eta_{\max}/2\pi R\eta_{\min} \cdot 100\%$ . Для фильтра с параметрами  $R = 25$  мм,  $b = 2$  мм и  $\eta_{\max}/\eta_{\min} = 10$  асимметрия излучения на выходе составит:  $\epsilon = 10\%$ .

*Волновой фронт.* Дифракционная структура фильтра вносит искажения в форму волнового фронта выходного излучения, дифрагированного в верхние порядки. Постоянный фазовый сдвиг, который определяется выражением (2),

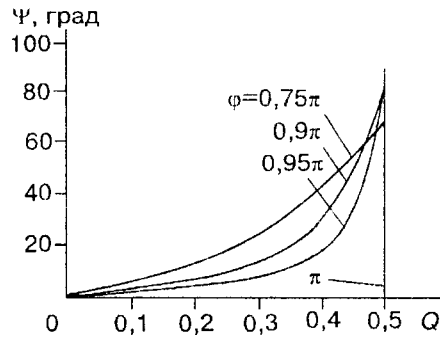


Рис. 5. Зависимость изменения фазового сдвига нулевого порядка дифракции от скважности одномерной решетки при нескольких значениях фазовой глубины решетки

вносится фазовой решеткой только в нулевой порядок дифракции [6] и зависит от скважности и фазовой глубины решетки. Амплитудная решетка фазового сдвига не вносит. Эти зависимости приведены на рис. 5. Фазовый сдвиг необходимо учитывать при применении дифракционного фильтра в интерференционных и голографических системах. Соответствующие выражения для фазовых сдвигов  $\Psi$ , вносимых фильтрами различных типов, приведены в таблице.

4. Изготовление фильтров. Описываемые фильтры представляют собой достаточно простые бинарные амплитудные и фазовые структуры. Их изготовление производится по технологии бинарной оптики: 1) изготовление первичного фотошаблона; 2) контактное копирование; 3) формирование рельефной структуры.

Наиболее критическими операциями являются изготовление фотошаблона и копирование. Это связано с тем, что площадь фильтра может быть достаточно большой (сотни  $\text{см}^2$ ), а минимальные размеры структуры фильтра видимого и УФ-диапазонов составляют 0,5—1  $\mu\text{м}$ .

Фотошаблоны линейных фильтров (см. рис. 2, *a, b*) предпочтительно изготавливать с помощью генераторов изображений, работающих в декартовой системе координат, а круговых (см. рис. 2, *d*) — с помощью записывающих устройств, работающих в полярной системе координат [7]. Высокая лучевая стойкость может быть достигнута только при изготовлении фильтров на подложках из кварца.

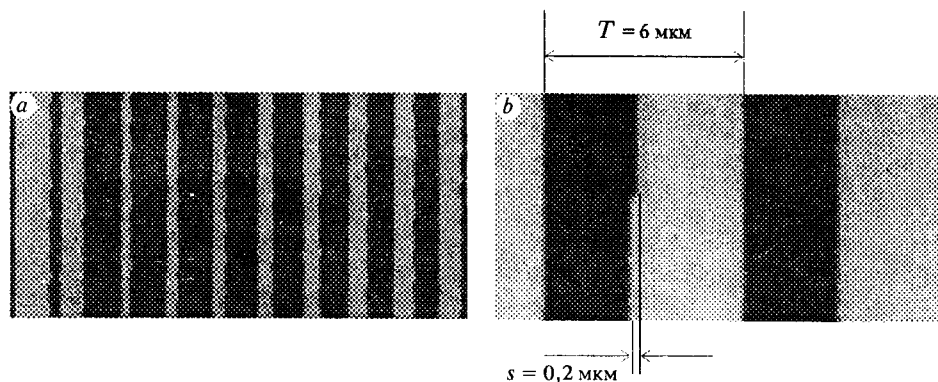


Рис. 6. Фрагменты хромовых фотошаблонов линейных дифракционных решеток с переменной скважностью

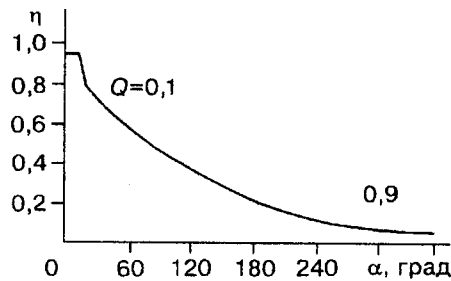


Рис. 7. Зависимость коэффициента пропускания кругового амплитудного фильтра от угла поворота

На рис. 6, *a*, *b* приведены фрагменты хромовых фотошаблонов линейной решетки с постоянным периодом ( $T = 6$  мкм) и шириной линий, изменяющихся от 1 до 5 мкм (*a*). Линейная решетка изготовлена на круговом лазерном генераторе изображений [7] по термохимической технологии. На рис. 6, *b* хорошо видна дискретность  $s$  перемещения записывающего лазерного луча (размер записывающего пятна 0,8 мкм), которая составляла  $s = 0,2$  мкм. Дискретность записи приводит к скачкообразному изменению коэффициента пропускания фильтра. Так, например, для фазового фильтра (см. таблицу, ряд 3) при  $T = 10$  мкм,  $d = 2$  мкм,  $s = 0,2$  мкм дискретность изменения пропускания составит:  $\Delta\eta = 0,05$ . Однако вследствие достаточно большого размера апертуры входного пучка эта дискретизация усредняется и не сказывается на изменении интенсивности выходного пучка.

На рис. 7 приведена типичная характеристика коэффициента пропускания амплитудного фильтра  $\eta$  (структура рис. 2, *c*, период  $T = 6$  мкм) в зависимости от угла поворота  $\alpha$ . Закон изменения скважности от угла поворота линейный. Видно, что наибольшие отличия коэффициента пропускания от расчетного (см. рис. 4, *a*) имеют место в области максимального пропускания, в начале угловой шкалы фильтра. Скачок пропускания связан с тем, что минимальная ширина штрихов решетки составляла около 0,6 мкм, а угловой сектор (около  $20^\circ$ ) не был записан. В рабочем диапазоне (около  $340^\circ$ ) при вращении фильтра пропускание изменялось от 0,8 до 0,05.

5. Применение. Дифракционные фильтры могут использоваться в тех же системах, что и классические аналоги. Однако наибольший интерес представляет их использование для регулировки излучения мощных импульсных или непрерывных лазеров. Это обусловлено отсутствием собственных потерь в фазовом фильтре. Лучевая стойкость бинарного ДОЭ незначительно отличается от лучевой стойкости материала подложки. Для кварца эта величина составляет 10—20 Дж/см<sup>2</sup>, в то время как хромовое покрытие классических фильтров разрушается при значительно меньших энергиях.

Дифракционные фильтры могут быть использованы в ИК-диапазоне для регулировки излучения мощных СО<sub>2</sub>-лазеров. Для этого фильтр выполняется отражательным с оптической глубиной рельефа  $h = \lambda/4$ .

#### ВЫВОДЫ

Предлагаемый светофильтр обеспечивает принципиально новые возможности применения, отсутствующие у известных аналогов: регулировку излучения с большой плотностью мощности в различных спектральных диапазонах. Это позволяет использовать предлагаемые светофильтры в лазерных технологических установках для регулировки выходного излучения.

По сравнению с известными светофильтрами переменной плотности предлагаемый светофильтр дешевле и проще в изготовлении. Фотолитографический метод позволяет изготавливать ДР с произвольной формой штрихов, а следовательно, формировать заданную функцию пропускания светофильтра.



Автор выражает благодарность В. П. Коронкевичу за полезное обсуждение работы и А. И. Мальшеву, В. П. Королькову, В. В. Черкашину за помощь в изготовлении дифракционных фильтров.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Burge J. H. A null test for null correctors: error analysis // Proc. SPIE. 1993. 1993. P. 86.
2. Коронкевич В. П., Пальчикова И. Г., Полещук А. Г. Считывание информации с компакт-дисков лазерной головкой с дифракционной оптикой // Квантовая электрон. 1988. 15, № 10. С. 2128.
3. Streible N. Diffractive optical elements for optoelectronics interconnections // Proc. SPIE. 1991. P. 1574.
4. Полещук А. Г. Голографические фильтры с переменным пропусканием // «Голография-96»: Мат-лы конф. Санкт-Петербург, Россия, 1996. С. 21.
5. Born M. Principles of Optics. N. Y.: Pergamon Press, 1964.
6. Burge J. H. Advance technology for measuring primary mirrors for astronomical telescopes: Diss. University of Arizona, 1993.
7. Koronkevich V. P., Kirianov V. P., Korol'kov V. P. et al. Fabrication of diffractive optical elements by direct laser writing with circular scanning // Proc. SPIE. 1995. 2363. P. 290.

*Поступила в редакцию 11 июня 1997 г.*

---

**Реклама продукции в нашем журнале — залог Вашего успеха!**