

## **Технология изготовления дифракционных оптических элементов методом плазмохимического травления для формирования точечных эталонных изображений**

© С.Б. Одинокоев, Г.Р. Сагатеян, А.Б. Соломашенко, Е.А. Дроздова

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Рассмотрен вариант конструкции дифракционных оптических элементов (ДОЭ), работающих на пропускание в составе оптических систем во втором порядке дифракции. Обоснована необходимость применения фазовых ДОЭ. Показана возможность применения фазовых ДОЭ, имеющих двухуровневую структуру при прямоугольном микропрофиле рабочей поверхности. Подтверждены возможности изготовления ДОЭ и голограммных оптических элементов (ГОЭ) с применением установки плазмохимического травления (ПХТ) Caroline 15 PE. Определены оптимальные режимы ПХТ для ДОЭ из щелочного стекла. Установлено, что максимальная глубина рельефа ДОЭ и ГОЭ соответствует максимальной селективности травления стекла относительно материала маски. При толщине хромовой маски 100 нм достигается глубина микрорельефа до 1,4 мкм, что обеспечивает повышение дифракционной эффективности ДОЭ и ГОЭ. Относительная интенсивность света во втором порядке дифракции может составлять 30 %, что позволит создавать новые изделия микрооптики.*

**Ключевые слова:** дифракция, оптический элемент, дифракционная решетка, профиль микрорельефа, глубина канавок, оптическое стекло, плазмохимическое травление, маска, селективность травления, режимы травления, дифракционная эффективность.

**Введение.** В оплотехнике [1] актуальной проблемой является разработка оптических подсистем, обеспечивающих формирование эталонного расположения нескольких точек в плоскости изображения на ПЗС-матрице при минимальных массогабаритных характеристиках (рис. 1). Пучок света от полупроводникового лазера 1 корректируется оптической системой 2, проходит через диафрагму, содержащую пять отверстий, и сформированные лучи, отражаясь от зеркала 3, попадают на дифракционный оптический элемент (ДОЭ) 4. При этом дифрагированные на ДОЭ лучи света попадают в зрачок прибора 5 таким образом, что на ПЗС-матрице 6 формируется эталонное расположение пяти точек. Наиболее эффективным способом решения проблемы нерасстраиваемости такого эталона является применение ДОЭ, работающего на пропускание света и содержащего несколько дифракционных решеток — по одной на каждую формируемую точку (рис. 2). Конструктивно ДОЭ устроен следующим образом.

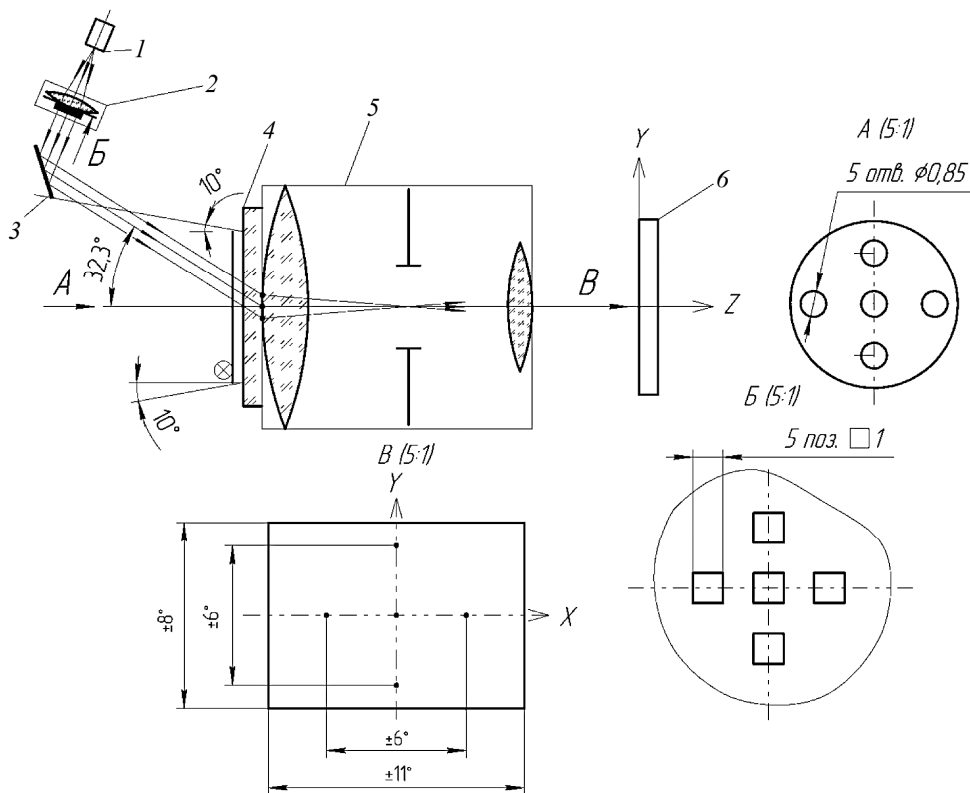


Рис. 1. Схема оптической подсистемы для формирования эталонного расположения точек [1]

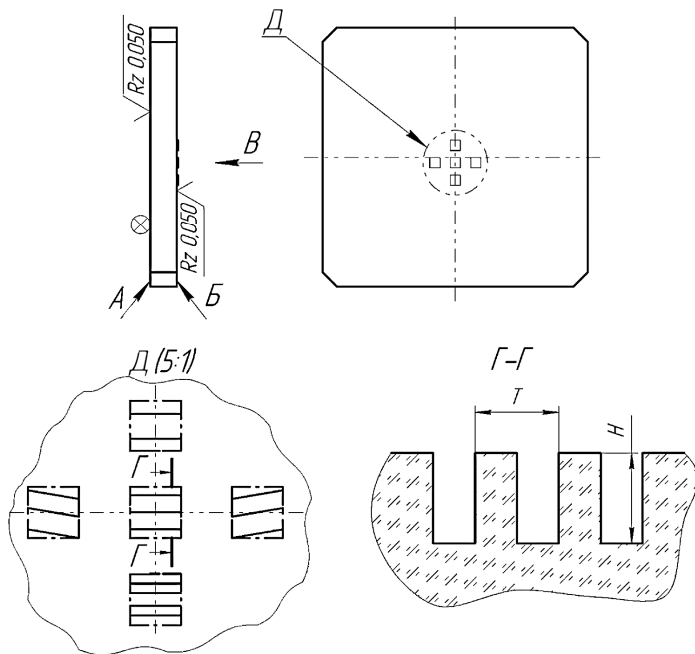


Рис. 2. Конструкция ДОЭ

Три дифракционные решетки расположены одна над другой так, что их периоды различны и дифрагированные лучи пересекаются в одной точке в центре зрачка. Через эту же точку должны пройти и два дифрагированных луча, прошедших через две боковые дифракционные решетки ДОЭ. Это достигается наклонным, направленным навстречу друг другу расположением линий в этих дифракционных решетках.

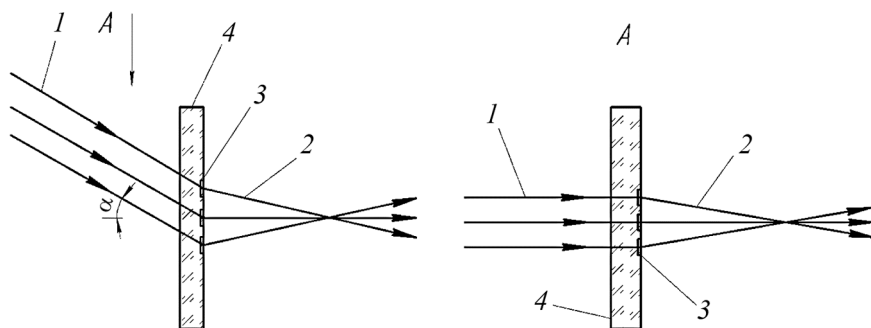
Разрабатываемый ДОЭ должен работать в ненулевом порядке дифракции, а нулевой порядок дифракции должен быть максимально подавлен. В то же время ДОЭ должен быть оптически прозрачным, чтобы минимизировать экранирование наблюдаемого с помощью оптической системы звездного неба. Два этих требования обуславливают необходимость применения именно фазового (а не амплитудного) ДОЭ (см. рис. 2).

Требуемый микрорельеф рабочей поверхности ДОЭ может быть создан методом плазмохимического травления (ПХТ) [2]. Согласно современным разработкам в области ПХТ изделий микрооптики, в качестве оптического материала используется кварцевое стекло, т. е. химически чистый плавленный кварц [3].

В данной работе на основе предварительных исследований [4] предлагается применять преломляющие (работающие на пропускание) голограммные оптические элементы (ГОЭ) и ДОЭ из щелочного стекла, идентичного по своим оптическим характеристикам стеклу К8. При этом в качестве исходной заготовки ДОЭ используется заготовка фотошаблона (ФШ), применяемого в технологии производства интегральных микросхем (ИМС). На одну из сторон заготовки ФШ ИМС наносится слой хрома — химически стойкого материала толщиной 40...200 нм, который можно использовать в качестве материала маски при реализации процесса ПХТ.

**Теоретическое обоснование.** Схема формирования точечного эталонного изображения приведена на рис. 3. Видно, что создаваемый ДОЭ должен работать в ненулевом порядке спектра, т. е. его дифракционные решетки являются фактически пропускающими эшелеттами — фазовыми дифракционными решетками, обладающими способностью концентрировать дифрагированное излучение в спектре определенного (не нулевого) порядка.

В настоящее время эшелетты, работающие на отражение, изготавливают нарезанием на поверхности металла специальными резцами треугольного микропрофиля, создающего дополнительную разность хода в пределах каждого периода решетки [5]. Поскольку ДОЭ из оптического стекла должен работать на пропускание, то нарезание микрорельефа на его рабочей поверхности резцами невозможно. Такие изделия микрооптики могут быть получены на основе применения метода ПХТ [2], позволяющего формировать на обрабатываемой

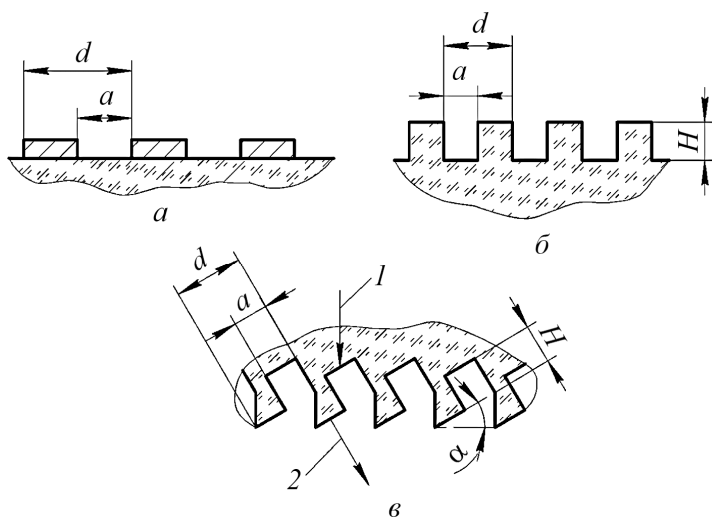


**Рис. 3.** Схема формирования точечного эталонного изображения:

1 — падающие параллельные пучки; 2 — дифрагированные пучки; 3 — дифракционные решетки; 4 — ДОЭ

поверхности узкие (шириной менее 1 мкм) щели относительно большой (1...2 мкм) глубины. Недостатком данного метода является возможность формирования только бинарного микрорельефа, т. е. применительно к дифракционным решеткам прямоугольного микропрофиля рабочей поверхности, не характерного для эшелетта.

Однако при наклонном падении света на дифракционную решетку [6] бинарный прямоугольный микрорельеф фазовой решетки ведет себя как профиль, близкий к пилообразному, что позволяет изготовить эшелетт методом ПХТ (рис. 4).



**Рис. 4.** ДОЭ, работающий как пропускающий эшелетт (а), заготовка ДОЭ (б) и эквивалентный эшелетт (в):  
1, 2 — падающий и дифрагированный лучи

Для концентрации энергии излучения в заданном направлении необходимо выполнение следующих двух условий [7]:

- направление нулевого порядка от отдельного преломляющего

элемента должно совпадать с направлением на максимум требуемого порядка от всей решетки;

- направление на спектр нулевого порядка от всей решетки должно совпадать с направлением минимума при дифракции на отдельном преломляющем элементе.

Для анализа первого условия запишем уравнение дифракционной решетки

$$d (\sin \alpha + \sin \beta) = n\lambda, \quad (1)$$

где  $d$  — период дифракционной решетки;  $\alpha$  — угол падения;  $\beta$  — угол требуемого порядка дифракции;  $n$  — номер порядка;  $\lambda$  — длина волны.

Порядок дифракции разрабатываемого ДОЭ определяется габаритными ограничениями, накладываемыми на конструкцию оптической системы. Оптимальным с энергетической точки зрения является вариант с работой в первом порядке дифракции. Однако в этом случае требуемый период дифракционной решетки  $d \approx 0,7$  мкм. Изготовление маски с таким малым периодом в настоящее время технически невозможно без применения методов нанотехнологии или использования явления поверхностных плазмонов. Поэтому в качестве рабочего для разрабатываемого ДОЭ был принят второй порядок дифракции.

Рассмотрим падение луча на центральную дифракционную решетку ДОЭ (см. рис. 3). В этом случае  $\beta = 0$  (перпендикулярность к рабочей плоскости ДОЭ требуемого направления на дифракционный максимум). Для работы на втором порядке дифракции ( $n = 2$ ) формула (1) примет вид

$$d \sin \alpha = 2\lambda. \quad (2)$$

Формула (2) задает однозначную взаимосвязь между требуемым углом падения  $\alpha$  и периодом  $d$  дифракционной решетки. Так, для  $\alpha = 30^\circ$  при длине световой волны  $\lambda = 0,65$  мкм  $d = 2,6$  мкм.

Продолжая анализировать первое условие для концентрации энергии эшелеттом, установим закономерности формирования излучения нулевого порядка от отдельного преломляющего элемента. Очевидно, что в данном случае излучение будет дифрагировано на фазовой решетке с прямоугольным профилем (рис. 5, а).

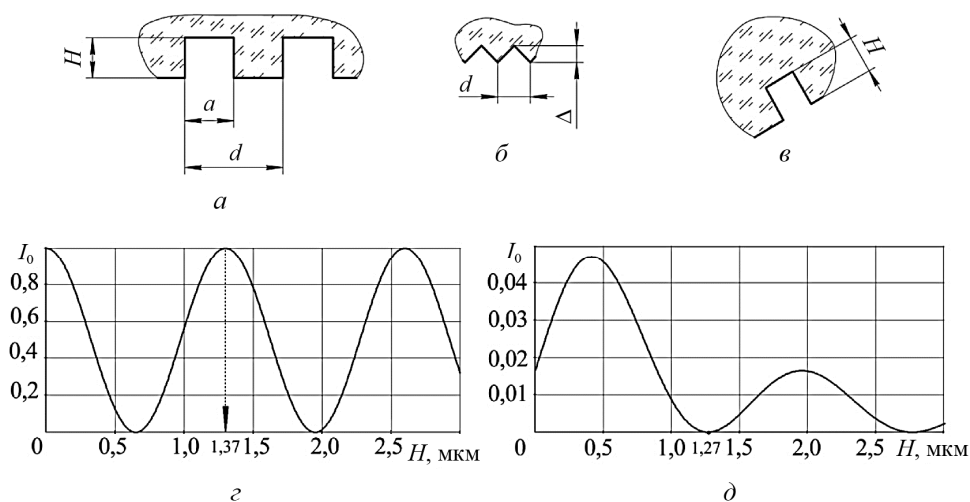
Относительная интенсивность излучения  $I_0$  для нулевого порядка дифракции при  $\lambda = 0,65$  мкм в этом случае имеет следующий вид [8]:

$$I_0 = (1 - \epsilon^2) \cos^2 \left[ \pi(n-1) \frac{H}{\lambda} \right] + \epsilon^2, \quad (3)$$

где  $\varepsilon$  — коэффициент асимметрии прямоугольной фазовой решетки, рассчитываемый по формуле

$$\varepsilon = 1 - \frac{a}{d/2};$$

$n$  — показатель преломления стекла.



**Рис. 5.** Фазовые дифракционные решетки с прямоугольным (а), треугольным (б) и эквивалентным (в) профилем, а также соответствующие (z, d) относительные интенсивности нулевого порядка

На рис. 5, б представлена зависимость  $I_0(H)$  для  $n = 1,5$ ,  $\lambda = 0,65$  мкм и  $\varepsilon = 0$ , из которой следует, что максимум относительной спектральной эффективности в нулевом порядке дифракции достигается при  $H = 1,3$  мкм. Таким образом, требуемая глубина  $H$  канавок прямоугольного профиля, формируемая методом ПХТ (см. рис. 4, б),

$$H = \frac{\lambda}{n-1}. \quad (4)$$

Согласно второму условию для концентрации энергии эшелеттом в направлении луча  $I$  (см. рис. 4, z) должен быть расположен минимум интенсивности излучения, дифрагированного отдельным элементом.

Моделью для представленной на рис. 4, z эквивалентной схемы является эшелетт фазовой дифракционной решетки с треугольным профилем (см. рис. 5, б). Сопоставляя рис. 5 и рис. 4, z, можно считать, что глубина  $\Delta$  треугольного рельефа такой фазовой решетки

$$\Delta = d \sin \alpha + H \cos \alpha. \quad (5)$$

Минимум интенсивности излучения для нулевого порядка дифракции на отдельном элементе профиля [8]:

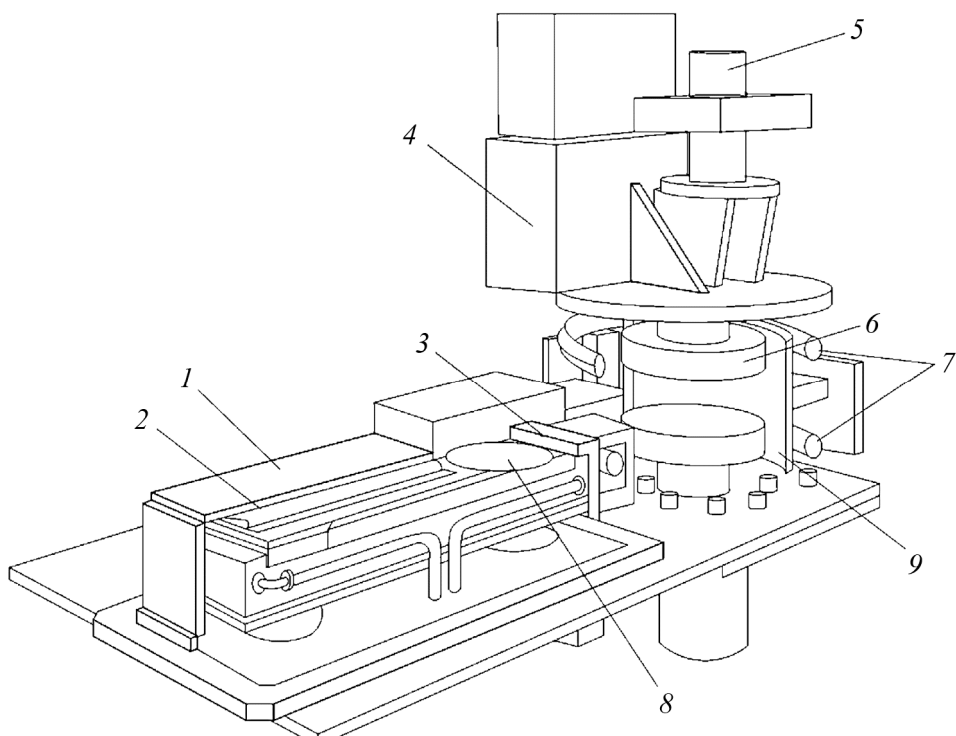
$$I_0 = \left\{ \frac{\sin [\pi(n-1)\Delta/\lambda]}{\pi(n-1)\Delta/\lambda} \right\}^2, \quad (6)$$

где  $\Delta$  — глубина рельефа (рис. 5, б), рассчитываемая по формуле (5).

На рис. 5, д приведена зависимость  $I_0(H)$  для  $n = 1,5$ ,  $\lambda = 0,65$  мкм,  $\alpha = 30^\circ$  и  $d = 3$  мкм, из которой так же, как и для предыдущего случая, следует, что минимум интенсивности излучения нулевого порядка дифракции отдельного элемента профиля достигается при глубине травления  $H = 1,3$  мкм (см. рис. 4, в). Совпадение требуемой глубины травления  $H = 1,3$  мкм как для максимализации интенсивности излучения в требуемом направлении дифракции (см. рис. 5, з), так и для минимизации интенсивности излучения в направлении нулевого порядка для решетки в целом (см. рис. 5, д), свидетельствует о том, что пропускающий свет эшелетт для работы во втором порядке спектра может быть получен методом ПХТ.

**Выбор технологического оборудования для ПХТ оптического стекла.** Из способов создания плазмы, являющейся источником положительно заряженных ионов и химически активных радикалов, обеспечивающих удаление обрабатываемого материала в процессе ПХТ, наиболее оптимальным для оптического стекла — неорганического диэлектрического материала — является высокочастотный индуктивный разряд. Такой разряд позволяет регулировать подводимую мощность, а следовательно, и температуру плазмы, в широких пределах, обеспечивая одновременно достаточное число свободных электронов в плазме для компенсации положительного заряда на диэлектрической обрабатываемой детали. На основании экспериментальных исследований электрофизических характеристик подобного оборудования [9] установлен ряд закономерностей формирования токов (ионного, электронного) и напряжений (в частности, напряжений смещения) в рабочей камере. Однако эти исследования не позволяют устанавливать непосредственную аналитическую взаимосвязь между электрофизическими параметрами установки и выходными параметрами процесса ПХТ, например глубиной микрорельефа на сформированной функциональной поверхности ДОЭ и ГОЭ.

В качестве оборудования для реализации процесса ПХТ применительно к изготовлению ДОЭ и ГОЭ выбрана установка плазмохимического травления Caroline 15 PE [10], которая применяется в микроэлектронике при производстве интегральных микросхем на кремниевых пластинах диаметром 200 мм. Особенности конструктивного устройства этой установки представлены на рис. 6.



**Рис. 6.** Установка плазмохимического травления Caroline 15 PE:  
 1 — шлюз; 2 — манипулятор; 3 — затвор; 4 — согласующее устройство; 5 — лазерный измеритель глубины травления; 6 — антенна; 7 — катушки индуктивности;  
 8 — носитель заготовки; 9 — корпус камеры

При выборе этой установки в качестве оборудования для разработки технологии изготовления ДОЭ-ГОЭ из щелочного стекла (основной компонент состава шихты при варке такого стекла — диоксид кремния) были учтены сообщения о положительных результатах ее применения при изготовлении деталей из монокристаллического кварца. Некоторые результаты экспериментальных исследований по применению установки Caroline 15 PE для протравливания монокристаллического кварца на большие глубины — свыше 200 мкм — представлены в работе [11] без подробного описания условий и режимов операции ПХТ. В частности, не раскрыт материал маски, способ ее получения и толщина, необходимая для травления на глубину порядка десятков микрометров.

**Экспериментальные исследования по изготовлению фазовых ДОЭ.** Заготовки ДОЭ получали высверливанием из заготовок ФШ из щелочного стекла, применяемых для изготовления ИМС (ФШ ИМС). Таким образом, материалом фазовых ДОЭ являлось щелочное стекло. Для размещения заготовок ДОЭ диаметром 35 мм на столике установки Caroline 15 PE, предназначенном для кремни-



евых пластин диаметром 200 мм, был разработан специальный экранирующий носитель.

При разработке технологии изготовления ДОЭ исследовали влияние времени травления  $t$  на достигаемую глубину канавок дифракционных решеток при ПХТ заготовок фазовых ДОЭ с хромовой маской.

На установке ПХТ Caroline 15 PE использовали следующий режим травления: расход травящего газа (фреон  $\text{CF}_4$ )  $C_{\text{CF}_4} = 2,4$  л/ч, плазмообразующего газа (аргон)  $C_{\text{Ar}} = 0,8$  л/ч, газа, охлаждающего столик (гелий),  $C_{\text{He}} = 1,2$  л/ч; ток подмагничивания в катушках, охватывающих камеру с плазмой,  $I = 2,0$  А; мощность, подаваемая на антенну,  $P_a = 250$  Вт и подаваемая на столик,  $P_{\text{ст}} = 250$  Вт; частота вращения  $n$  ротора турбомолекулярного насоса — 100 % номинальной. При работе установки Caroline 15 PE условия процесса ПХТ, связанные с функционированием двух высокочастотных генераторов с согласующими устройствами, нагружаемыми соответственно на антенну и столик, формируются непосредственно в ходе процесса. К этим условиям относятся: фактические мощности на антенне и столике (причем в обоих случаях фиксируются мощности падающей и отраженной волн); напряжение  $U$  автосмещения на столике; давление  $p$  в рабочей камере.

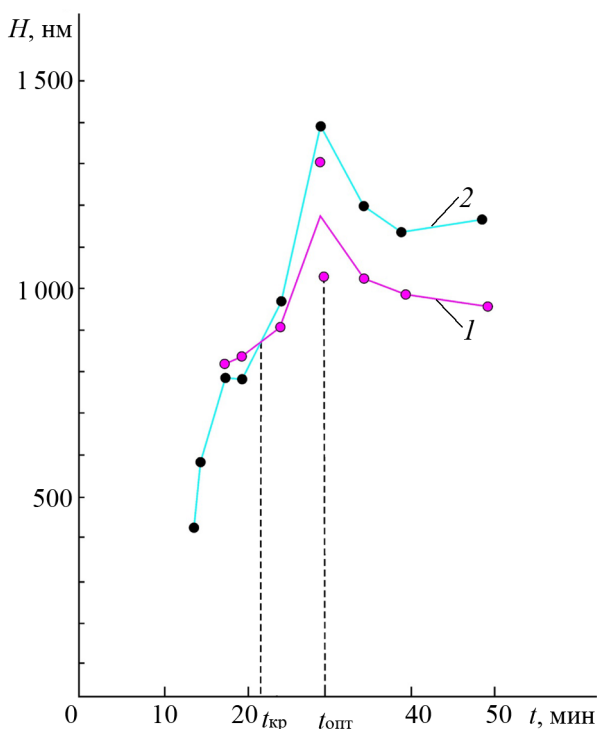
Полученные на основе профилографических исследований, проведенных на профилографе-профилометре 1500- $\alpha$  Kasaka laboratory (Япония), результирующие зависимости влияния продолжительности процесса ПХТ на глубину канавок дифракционных решеток представлены на рис. 7. Глубину профиля определяли на двух этапах изготовления ДОЭ: после ПХТ (кривая 1) и после кислотного травления для удаления остатков хромовой маски (кривая 2).

Обе кривые 1 и 2 имеют максимум при продолжительности ПХТ  $t_{\text{опт}} = 30$  мин, т. е. при продолжительности ПХТ  $t < t_{\text{опт}}$  глубина канавок дифракционной решетки с увеличением продолжительности ПХТ возрастает, а при  $t > t_{\text{опт}}$  — уменьшается.

При  $t < t_{\text{кр}}$  глубина канавок дифракционной решетки после ПХТ превышает глубину канавок после кислотного травления, а при  $t > t_{\text{кр}}$  оказывается меньше, т. е. в последнем случае кислотное травление приводит к увеличению глубин канавок дифракционной решетки. В момент  $t = t_{\text{кр}}$  глубина канавок дифракционной решетки после кислотного травления не изменяется.

При  $t > t_{\text{кр}}$  с увеличением продолжительности ПХТ разность между глубиной канавок после ПХТ и после кислотного травления увеличивается.

Анализ представленных на рис. 7 результатов исследования влияния продолжительности ПХТ на глубину рельефа фазовой дифрак-



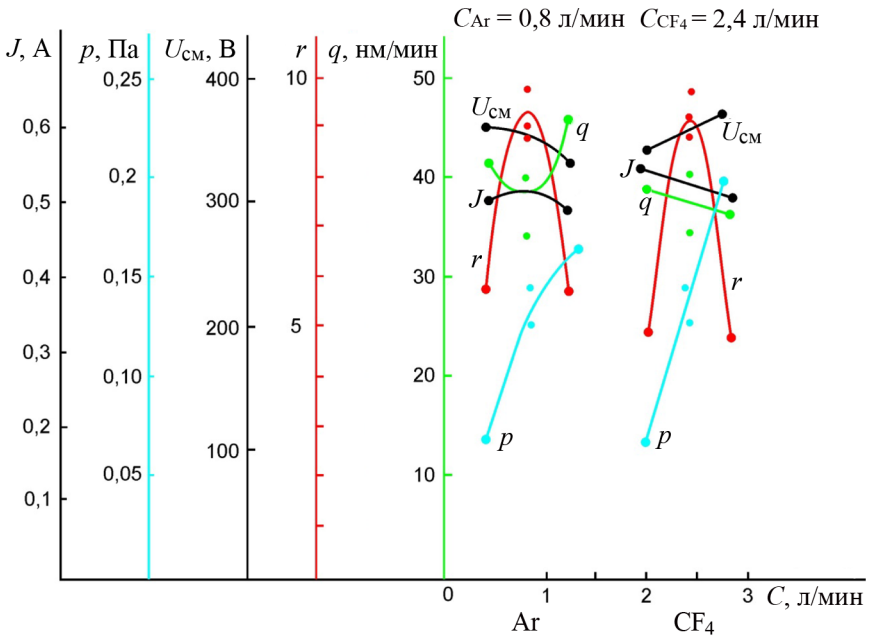
**Рис. 7.** Зависимости глубины канавок  $H$  дифракционных решеток от продолжительности  $t$  ПХТ:

1 — после ПХТ; 2 — после кислотного травления, следующего за ПХТ

ционной решетки позволяет утверждать, что для достижения максимальной глубины травления оптического стекла единственным определяющим параметром является селективность его травления относительно материала маски. ПХТ оптического стекла следует проводить на наиболее рациональном (оптимальном) режиме. Оптимальным является тот режим, который обеспечивает максимум селективности травления. При этом под селективностью травления понимают отношение скоростей травления стекла и материала маски.

Для определения оптимального режима ПХТ провели серию экспериментов с использованием в качестве материала маски оксида железа. Образцы для этих исследований высверливали из готовых ФШ, применяемых в производстве ИМ. Маска для ПХТ соответствовала непрозрачным участкам ФШ.

Исследовали влияние соотношения расходов плазмообразующего (аргон) и химически активного (фреон) газов на ряд выходных параметров ПХТ. Результаты экспериментов представлены в виде зависимостей на рис. 8. Эти зависимости получены при фиксации прочих условий процесса (мощности на антенне и столике, ток подмагничивания, расход гелия, скорость турбомолекулярного насоса) на тех же



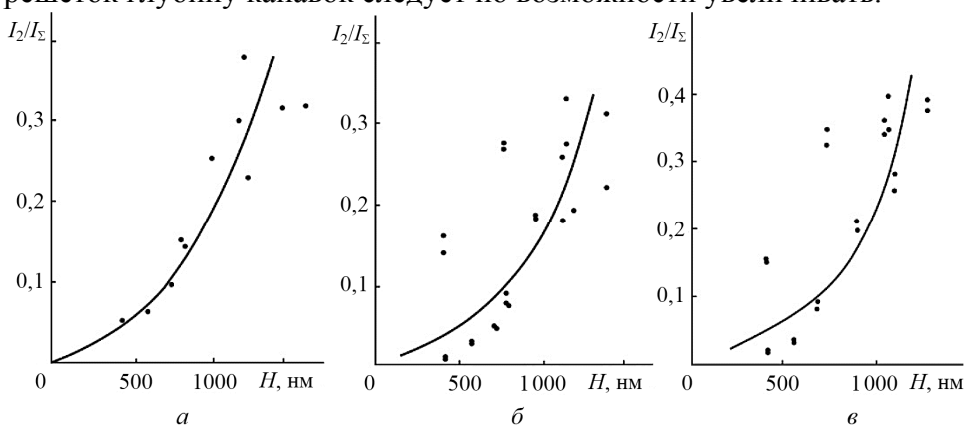
**Рис. 8.** Зависимости производительности  $q$ , селективности  $r$  травления, напряжения смещения  $U_{см}$ , анодного тока  $J$  и давления вакуума  $p$  в камере от расходов аргона  $C_{Ar}$  и фреона  $C_{CF_4}$

уровнях, что и в предыдущих экспериментальных исследованиях (см. рис. 7). На рис. 8 видно, что зависимости селективности  $r$  травления от расходов как аргона, так и фреона носят ярко выраженный экстремальный характер, т. е. имеют максимумы. Оптимальный режим ПХТ стекла на установке Caroline 15 PE соответствует расходу аргона  $C_{Ar} = 0,8$  л/ч при одновременном расходе фреона  $C_{CF_4} = 2,4$  л/ч.

Практическое применение ПХТ обусловлено необходимостью изготавливать именно фазовые дифракционные решетки, которые в отличие от обычных (амплитудных) дифракционных решеток обеспечивают повышенную дифракционную эффективность. Экспериментальные исследования дифракционной эффективности дифракционных решеток ДОЭ с различной глубиной канавок, изготовленных с применением ПХТ, проводили на специально разработанном оптическом стенде. С помощью специального измерительного прибора измеряли интенсивности пучков нулевого, первого, второго, третьего и минус первого порядков дифракции при наклонном падении света.

Для амплитудных дифракционных решеток дифракционная эффективность уменьшается в наибольшей степени при переходе ко второму и более высоким порядкам дифракции. Следовательно, наиболее актуальным является вопрос определения оптимальной глубины канавок дифракционных решеток, обеспечивающей максимальность энергии во втором порядке дифракции.

Полученные зависимости дифракционной эффективности как доли интенсивности пучка света второго порядка  $I_2$  дифракции в общей интенсивности света  $I_\Sigma$ , прошедшего через ДОЭ, от глубины  $H$  канавок дифракционной решетки с различными периодами  $d$  представлены на рис. 9. Видно, что парциальная доля второго порядка дифракции может достигать и даже превышать 30 %. Установленные эмпирически зависимости (см. рис. 9) указывают также на то, что для повышения дифракционной эффективности фазовых дифракционных решеток глубину канавок следует по возможности увеличивать.



**Рис. 9.** Зависимости отношения интенсивности света пучка второго порядка дифракции  $I_2$  и суммы интенсивностей  $I_\Sigma$  пучков нулевого, первого, второго, третьего и минус первого порядков дифракции от глубины  $H$  канавок дифракционных решеток:

$a$  —  $d = 2$  мкм;  $b$  —  $d = 2,5$  мкм;  $v$  —  $d = 3$  мкм

### Обсуждение результатов экспериментальных исследований.

Повышение дифракционной эффективности фазовых дифракционных решеток во втором порядке дифракции с увеличением глубины канавок дифракционной решетки (см. рис. 9) можно объяснить уменьшением относительной интенсивности излучения для нулевого порядка дифракции [8]. В общем случае в соответствии с теорией дифракции света на фазовых дифракционных решетках с идеально прямоугольным профилем микрорельефа относительная интенсивность нулевого порядка дифракции должна изменяться волнообразно, достигая минимума (для рассмотренных условий) при глубине канавок 700, 1400 нм и т. д. Однако на практике полученная форма микрорельефа дифракционной решетки отличается от идеально прямоугольной, поскольку на краях выступов формируются радиусы скруглений, а стенки микрорельефа не вертикальны, а наклонены под углом до  $30^\circ$  к вертикали.

Таким образом, номинально прямоугольная форма микрорельефа фазовых дифракционных решеток на практике приближается к треугольной, а для такой формы микрорельефа в соответствии с теорией

дифракции [8] относительная спектральная интенсивность нулевого порядка дифракции с увеличением глубины канавок дифракционной решетки, изменяясь волнообразно, тем не менее стремится к нулю. Поэтому для повышения дифракционной эффективности фазовых дифракционных решеток глубину канавок следует по возможности увеличивать.

Как отмечалось выше, максимально достигаемая при ПХТ глубина канавок дифракционной решетки определяется главным образом селективностью травления оптического стекла относительно материала маски. В связи с этим исключительную важность приобретают максимумы в зависимостях  $r = f(C_{Ar})$  и  $r = f(C_{CF_4})$  (см. рис. 8). Из приведенных зависимостей наиболее легко объяснимыми являются зависимости возрастания давления  $p$  вакуума при возрастании расходов аргона и фреона. Объяснение характеров других зависимостей затруднено, что связано с коренными различиями в физической сущности процессов, сопровождающих присутствие в плазме атомов аргона и молекул фреона. Если атомы аргона в высокочастотной плазме распадаются на положительно заряженные ионы и электроны, то молекулы фреона в той же плазме приобретают лишь неспаренные электроны, превращаясь в радикалы (хотя, конечно, также возможно и образование из молекулы фреона свободных электронов и сложных положительно и отрицательно заряженных ионов).

Соответственно увеличение расхода аргона приводит как к увеличению плотности электронов в плазме, что обуславливает уменьшение напряжения  $U_{см}$  автосмещения на столике, так и к увеличению ионного тока через обрабатываемую заготовку ДОЭ, что приводит к росту производительности  $q$  травления стекла. Наличие минимума в зависимости производительности травления стекла от расхода аргона объясняется уменьшением длины свободного пробега ионов аргона в ускоряющем электрическом поле с увеличением плотности плазмы: при повышенной концентрации аргона превалирует физическое разрушение стекла ионами аргона, что сопровождается также и интенсификацией разрушения материала маски и снижением селективности  $r$  травления; при пониженной концентрации аргона его ионы успевают приобрести в ускоряющем электрическом поле энергию, достаточную для интенсификации физического разрушения как обрабатываемой поверхности стекла (увеличение производительности  $q$  травления), так и экранирующей маски, что также приводит к снижению селективности  $r$  травления.

Обнаруженные закономерности и особенности взаимосвязи достижимой глубины травления оптического стекла с продолжительностью процесса ПХТ могут быть объяснены следующим образом.

1. В момент  $t = t_{\text{опт}}$  (см. рис. 7) происходит практически полное удаление хромовой маски — на защищенных маской участках могут оставаться лишь отдельные, не связанные между собой остатки маски в виде островков. Если бы направление вектора скорости всех ионов и радикалов плазмы было исключительно вертикальным (перпендикулярным обрабатываемой поверхности), то с этого момента изменение глубины канавок не происходило бы. Однако поскольку для реализованного режима ПХТ характерны и другие направления векторов скоростей ионов и радикалов (активных частиц), то вершины микропрофиля фазовой дифракционной решетки срабатываются интенсивнее. До дна микропрофиля дифракционной решетки долетают не все частицы, которые могли бы попасть туда при вертикальном потоке, а до вершин микропрофиля — все, летящие на них при вертикальном потоке частиц и некоторые из частиц, летящих наклонно. Из-за более интенсивного срабатывания вершин микропрофиля глубина канавок уменьшается с увеличением времени травления при  $t > t_{\text{опт}}$ .

Таким образом, можно считать, что максимум селективности  $r$  травления стекла наблюдается при минимизации производительности  $q$  травления. При этом для достижения требуемой глубины травления следует увеличивать продолжительность процесса травления, учитывая, что зависимость достижимой глубины травления от длительности ПХТ имеет сложный характер (см. рис. 7).

2. Процесс ПХТ характеризуется не только удалением подвергаемых обработке материалов (стекла и хрома), но и ростом пленки на обрабатываемой поверхности (это проявление полимеризации в плазме в практике плазмохимических процессов называют «высадкой»). По существующим представлениям, растущая пленка является полимером — фторопластом (поэтому указанный паразитный процесс носит и более точное название — полимеризация), который образуется из фреона. Удаление обрабатываемых материалов происходит из-под растущей пленки полимера. Пленка растет и на хrome, и на стекле, и при этом скорость роста пленки на хrome может быть выше или ниже скорости роста пленки на стекле. Одновременно скорость травления стекла намного выше скорости травления хрома. В момент времени  $t = t_{\text{кр}}$  оказывается, что толщина пленки на стекле точно равна сумме двух толщин: толщины остаточного слоя хрома и толщины пленки, выросшей на хrome. Поэтому в результате кислотного травления глубина канавок дифракционной решетки не изменяется. До тех пор, пока  $t < t_{\text{кр}}$ , толщина остаточного слоя хрома в сумме с толщиной выросшей на нем пленки полимера превышают толщину пленки полимера, выросшей на стекле. Поэтому в результате кислотного травления глубина канавок дифракционной решетки

уменьшается. Если же  $t > t_{кр}$ , то толщина пленки полимера, выросшей на стекле, превышает суммарную толщину остаточного слоя хрома и пленки, выросшей на хrome. Это приводит к увеличению глубины канавок дифракционной решетки после выполнения операции кислотного травления.

3. С увеличением продолжительности ПХТ толщина пленки, высаженной на обрабатываемой поверхности стекла в результате протекания паразитной реакции полимеризации фреона, монотонно увеличивается, асимптотически приближаясь к некоторой предельной величине, соответствующей равенству скоростей роста и стравливания этой пленки. Если процесс ПХТ является избыточно продолжительным, т. е. таким, при котором защитная маска хрома уже полностью удалена, то при кислотном травлении, следующем после ПХТ, происходит удаление лишь этой пленки. Поэтому разница между глубинами канавок дифракционной решетки до и после кислотного травления с увеличением излишней продолжительности ПХТ монотонно возрастает.

На основании анализа и объяснения физической сущности обнаруженных экспериментальными методами закономерностей и особенностей процесса ПХТ, можно сформулировать выводы и рекомендации по построению технологии ПХТ при изготовлении ДОЭ.

**Заключение.** Теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность создания фазовых ДОЭ, работающих на пропускание света и обеспечивающих максимизацию интенсивности в заданном ненулевом порядке дифракции. В частности, для щелочного стекла, аналогичного по оптическим характеристикам стеклу К8, максимум интенсивности света с длиной волны  $\lambda = 0,65$  мкм во втором порядке дифракции, имеющем направление  $30^\circ$ , обеспечивается при глубине  $H = 1,3$  мкм канавок дифракционных решеток прямоугольной формы. Такие канавки могут быть получены методом ПХТ на установке Caroline 15 PE.

Установлено, что с увеличением глубины канавок до 1,5 мкм дифракционная эффективность фазовой дифракционной решетки, изготовленной методом ПХТ, возрастает монотонно; для повышения дифракционной эффективности следует стремиться к максимально возможной глубине канавок дифракционной решетки в указанном диапазоне.

Для достижения расчетной глубины канавок фазовых дифракционных решеток как методом автоматического получения размера, так и методом пробных процессов и замеров необходимо учитывать соотношение продолжительности  $t$  ПХТ с критической продолжительностью  $t_{кр}$ . Если  $t < t_{кр}$ , то в результате следующего за ПХТ кислотного

го травления, проводимого для удаления остатков маски, глубина канавок уменьшится, а если  $t > t_{кр}$ , увеличится.

Для достижения максимальной глубины канавок фазовой дифракционной решетки необходимо соблюдать условие  $t = t_{опт}$ , где  $t_{опт}$  — оптимальная продолжительность процесса ПХТ. При большей или меньшей продолжительности ПХТ относительно  $t_{опт}$  глубина канавок фазовой дифракционной решетки будет меньше максимально достижимой.

Полностью использовать возможности, предоставляемые за счет толщины и материала маски, можно, обеспечивая путем подбора оптимального режима процесса ПХТ максимальную селективность травления оптического стекла относительно материала маски. Так, при травлении щелочного стекла через хромовую маску на установке Caroline 15 PE максимум селективности травления наблюдается на следующем режиме: мощность, подаваемая на антенну,  $P_a = 250$  Вт и подаваемая на столик,  $P_{ст} = 250$  Вт; ток подмагничивания в катушках, охватывающих камеру с плазмой,  $I = 2,0$  А; частота вращения  $n$  ротора турбомолекулярного насоса равна номинальной; расход травящего газа (фреон  $CF_4$ )  $C_{CF_4} = 2,4$  л/ч, плазмообразующего газа (аргон)  $C_{Ar} = 0,8$  л/ч, газа, охлаждающего столик (гелий),  $C_{He} = 1,2$  л/ч.

*Работа выполнена при проведении НИР по соглашению № 14.В37.21.0739 от 24 августа 2012 г. между Министерством образования и науки Российской Федерации и МГТУ им. Н.Э. Баумана о представлении гранта в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009—2013 годы.*

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Колосов М.П., Гебгарт А.Я., Карелин А.Ю. О роли положения зрачков в нерасстраиваемых оптических системах угломеров с каналом геометрического эталона. *Оптический журнал*, 2012, т. 79, № 2, с. 48–53.
- [2] Казанский Н.Л., Колпаков В.А., Колпаков А.И. Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа. *Микроэлектроника*, 2004, т. 33, № 3, с. 209–224.
- [3] Казанский Н.Л., Колпаков В.А. *Формирование оптического микрорельефа во внекатодной плазме высоковольтного газового разряда*. Москва, Радио и связь, 2009, с. 117–169.
- [4] Одинокоев С.Б., Сагатеян Г.Р. Технология изготовления дифракционных и голограммных оптических элементов с функциональным микрорельефом поверхности методом плазмохимического травления. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение*, 2010, № 2, с. 92–104.
- [5] Малышев В.И. *О методах использования дифракционных решеток-эшелетт в космической ИК-спектроскопии (обзор литературы и рекомендации)*. Москва, Изд-во ФИАН, 1993, 52 с.



- [6] Ландсберг Г.С. *Элементарный учебник физики. Т. 3: Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика.* Москва, Наука, 1985, 656 с.
- [7] Балясников Н.М., Лукашевич Я.К., Варфоломеев А.А., Стрельников Ю.П. *Способ изготовления вогнутых дифракционных решеток со ступенчатым профилем штрихов.* Пат. 1799161 Российская Федерация, 10.05.1995.
- [8] Рожков О.В., Тимашова Л.Н. Воспроизведение цветокодированной фазо-оптической записи в системах отображения информации. *Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана*, 1979, № 309, с. 21–36.
- [9] Дудин С.В. Исследования и разработка технологических систем на базе ВЧ индукционного разряда для реактивного ионно-плазменного травления микро- и наноструктур. *Физическая инженерия поверхности*, 2009, т. 7, № 3, с. 171–194.
- [10] Берлин Е.В., Двинин С.А., Морозовский Н.И., Сейдман Л.А. Реактивное ионно-плазменное травление и осаждение: установка Каролина 15. *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*, 2005, № 8, с. 78–80.
- [11] Берлин Е.В., Сейдман Л.А. *Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии.* Москва, Техносфера, 2010, 544 с.

Статья поступила в редакцию 03.07.2013

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Одинокоев С.Б., Сагатеян Г.Р., Соломашенко А.Б., Дроздова Е.А. Технология изготовления дифракционных оптических элементов методом плазмохимического травления для формирования точечных эталонных изображений. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, вып. 9.

URL: <http://engjournal.ru/catalog/pribor/optica/922.html>

**Одинокоев Сергей Борисович** родился в 1950 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1973 г. по специальности «Оптико-электронные приборы». Д-р техн. наук, профессор кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области оптико-голографических систем. e-mail: [odinokov@bmstu.ru](mailto:odinokov@bmstu.ru)

**Сагатеян Гайк Рафаэлович** родился в 1953 г., окончил Ереванский политехнический институт (Государственный инженерный университет Армении — ГИУА) в 1975 г. по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». Д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии приборостроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области технологий изготовления прецизионных изделий приборостроения. e-mail: [h\\_sagatelyn@mail.ru](mailto:h_sagatelyn@mail.ru)

**Соломашенко Артем Борисович** родился в 1987 г., окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. Аспирант кафедры «Лазерные и оптико-электронные системы» НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 15 статей и одного патента в области оптико-электронных приборов и голографии.

**Дроздова Екатерина Андреевна** родилась в 1987 г., окончила Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения в 2010 г. Инженер НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана.