

## Экспериментальные исследования процесса плазмохимического травления стекла при изготовлении дифракционных и голограммных оптических элементов # 05, май 2012

DOI: 10.7463/0512.0408094

Одинокоев С. Б., Сагатеян Г. Р., Гончаров А. С., Ковалев М. С.,  
Соломашенко А. Б., Вереникина Н. М.

УДК.00000 535.42 ; 621.794.5

Россия, МГТУ им.Н.Э.Баумана

[odinokov@bmstu.ru](mailto:odinokov@bmstu.ru)

### Введение

Дифракционные оптические элементы (ДОЭ) – изделия микрооптики, которые, как следует из их названия, используют явление дифракции, устраняя хроматические aberrации лучше, чем линзы или другие оптические детали. Поскольку щелевые дифракционные решетки (дифракционные решетки амплитудного типа) перекрывают часть света для формирования его дифракции, они не так эффективны, как дифракционные решетки фазового типа [1], в которых решетка имеет пилообразную или двухуровневую форму и не преграждает путь свету.

Функциональный микрорельеф рабочей поверхности фазовых ДОЭ, а также более сложных аналогичных деталей – голограммных оптических элементов (ГОЭ) – создают локализованным микровытравливанием неорганического оптического стекла через защитную химически стойкую маску. В качестве наиболее эффективного способа создания функционального микрорельефа фазовых ДОЭ-ГОЭ в настоящее время рассматривается реактивное ионно-плазменное (плазмохимическое) травление (ПХТ). Однако, аналитические исследования процесса ПХТ [2] в

настоящее время не дают достаточного количества информации для технологического проектирования операций ПХТ применительно к конкретному технологическому оборудованию.

Изложенное свидетельствует об актуальности исследований, направленных на создание технологических процессов изготовления ДОЭ-ГОЭ с применением современного оборудования, в наибольшей степени подходящего для реализации процесса ПХТ применительно к оптическому стеклу. Такие исследования должны носить в основном экспериментальный характер с аналитическим обоснованием разрабатываемых на их основе режимов выполнения технологических операций ПХТ.

Научная новизна представленной статьи заключается в том, что в ней впервые на основании проведенных экспериментальных исследований:

- установлена взаимосвязь между дифракционной эффективностью работающих на пропускание света фазовых дифракционных решеток и глубиной микрорельефа на функциональной поверхности детали;
- установлены зависимости глубины микрорельефа на функциональной поверхности фазовых дифракционных решеток от основных факторов процесса плазмохимического травления.

Кроме того, впервые экспериментально установлено, что зависимости глубины микрорельефа от продолжительности травления, а также селективности травления от расхода плазмообразующих и функциональных газов имеют максимумы.

Практическая ценность выполненной работы заключается в том, что на основании полученных результатов теперь можно назначать научно обоснованные режимы операции плазмохимического травления оптического стекла с технологическим обеспечением требуемых показателей качества изделий.

Изложенные в статье результаты позволили выпустить установочные партии новых изделий, в составе которых применяются принципиально

новые дифракционные оптические элементы и голограммные оптические элементы.

## **1. Выбор технологического оборудования для плазмохимического травления (ПХТ) оптического стекла**

Из способов создания плазмы, являющейся источником положительно заряженных ионов и химически активных радикалов, обеспечивающих удаление обрабатываемого материала в процессе ПХТ, наиболее подходящим для оптического стекла – неорганического диэлектрического материала – представляется применение высокочастотного индуктивного разряда. Такой разряд позволяет регулировать подводимую мощность, а, следовательно, и температуру плазмы, в широких пределах, обеспечивая одновременно достаточное количество свободных электронов в плазме для компенсации положительного заряда, скапливаемого на диэлектрической обрабатываемой детали. Экспериментальные исследования электрофизических характеристик подобных установок [3] позволили установить ряд закономерностей формирования токов (ионного, электронного) и напряжений (в частности – напряжения смещения) в рабочей камере. Однако эти исследования не позволяют устанавливать непосредственную аналитическую взаимосвязь между электрофизическими параметрами установки и выходными параметрами процесса ПХТ – такими, например, как глубина микрорельефа на сформированной функциональной поверхности ДОЭ-ГОЭ.

В качестве оборудования для реализации процесса ПХТ применительно к изготовлению ДОЭ-ГОЭ была выбрана установка плазмохимического травления Caroline 15 PE [4], которая применяется в микроэлектронике при производстве интегральных микросхем на кремниевых пластинах диаметром 200 мм. Особенности конструктивного устройства этой установки представлены на рис. 1.

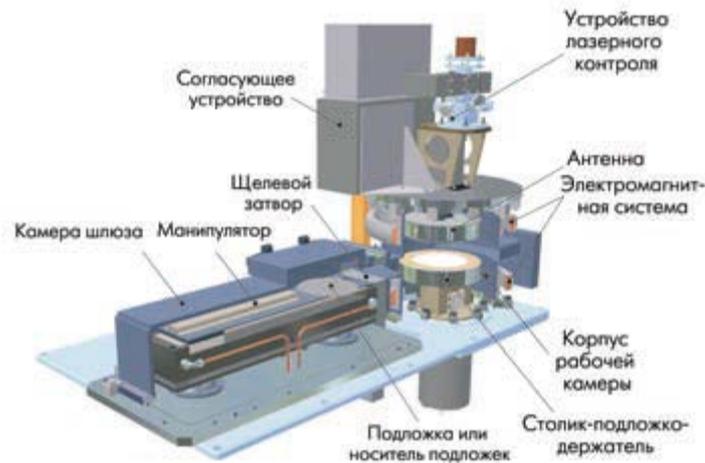


Рис. 1. Установка плазмохимического травления Caroline 15 PE

При выборе этой установки в качестве оборудования для разработки технологии изготовления ДОЭ-ГОЭ из оптического стекла (основной компонент состава шихты при варке такого стекла – диоксид кремния) были приняты во внимание 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 [5] без подробного описания условий и режимов операции ПХТ. В частности, не раскрыт материал маски, способ её получения и толщина, необходимая для травления на глубины порядка десятков микрон.

Результаты наших предварительных экспериментальных исследований по применению установки Caroline 15 PE для ПХТ оптического стекла с использованием хрома и оксида железа в качестве материалов маски, а в качестве исходных заготовок – заготовок фотошаблонов, предназначенных для производства интегральных микросхем, представлены в работе [6].

## 2. Экспериментальные исследования по изготовлению фазовых дифракционных оптических элементов (ДОЭ) и голограммных оптических элементов (ГОЭ)

Заготовки ДОЭ-ГОЭ получали высверливанием из заготовок фотошаблонов, применяемых для изготовления интегральных микросхем. Таким образом, материалом фазовых ДОЭ-ГОЭ являлось стекло, применяемое для изготовления таких фотошаблонов. По своим оптическим характеристикам оно соответствует стеклу марки К8. Для размещения заготовок ДОЭ-ГОЭ диаметром 35 мм на столике установки Caroline 15 PE, предназначенном для кремниевых пластин диаметром 200 мм, был разработан специальный экранирующий носитель.

Ниже изложены результаты экспериментальных исследований технологической операции ПХТ при изготовлении ДОЭ.

Исследовали влияние времени травления  $t$  на достигаемую глубину канавок дифракционных решеток при реализации операции плазмохимического травления заготовок фазовых ДОЭ с хромовой маской.

На установке плазмохимического травления Caroline 15 PE устанавливали следующий режим травления: расход травящего газа (фреон  $\text{CF}_4$ ) –  $C_{\text{CF}_4} = 2,4$  л/мин; расход плазмообразующего газа (аргон) –  $C_{\text{Ar}} = 0,8$  л/мин; расход газа, охлаждающего столик (гелий) –  $C_{\text{He}} = 1,2$  л/мин; ток подмагничивания в катушках, охватывающих камеру с плазмой,  $I = 2,0$  А; мощность, подаваемая на антенну, -  $P_a = 250$  Вт; мощность, подаваемая на столик, -  $P_{cm} = 250$  Вт; скорость вращения  $n$  ротора турбомолекулярного насоса – 100 % от номинальной.

При работе установки Caroline 15 PE условия процесса плазмохимического травления, связанные с функционированием двух высокочастотных генераторов со своими согласующими устройствами, нагружаемыми соответственно на антенну и столик, формируются в ходе самого процесса травления. К этим условиям относятся: фактические мощности на антенне и столике, причем в обоих случаях фиксируются

величины мощностей падающей и отраженной волн; напряжение автосмещения на столике  $U$ ; давление в рабочей камере  $p$ ; ток анода лампы генератора столика  $I_{a.cm}$ .

Продолжительности процессов ПХТ при проведении экспериментальных исследований, а также величины формировавшихся условий травления приведены в табл. 1.

Таблица 1.

Условия проведения экспериментальных исследований по выявлению влияния продолжительности процесса ПХТ на достигаемую глубину травления

Образец	Продолжительность травления $t$ , мин	Давление $p$ , Па	Мощность на антенне $P_a$ , Вт *	Мощность на столике $P_{cm}$ , Вт *	Напряжение автосмещения $U$ , В	Ток анода генератора столика $I_{a.cm}$ , А
5PC7	14	0,047- 0,06	227/7 -228/7	253/14 - 254/8	369 - 381	0,42 - 0,54
5PC12	18	0,0067	231/7 - 231/8	253/5 - 254/11	355 - 360	0,49 - 0,51
5PC5	20	0,0067-0,02	223/8 - 226/6	255/7 - 256/7	349 - 367	0,40 - 0,48
5PC9	25	0,0067	225/8 - 226/8	254/7 - 255/14	342 - 352	0,49 - 0,54
5PC1	30	0,033-0,060	231/8 - 232/7	253/4 - 253/6	321 - 352	0,45 - 0,50
5PC16	30	0,0067	231/9 - 232/8	253/8 - 254/9	343 - 348	0,51 - 0,52
5PC15	35	0,020-0,087	228/9 - 229/9	253/6 - 255/10	345 - 378	0,46 - 0,49
5PC13	40	0,18 - 0,27	226/9 - 228/7	253/6 - 255/24	340 - 354	0,48 - 0,55
5PC14	50	0,12 - 0,23	226/8 - 230/9	252/6 - 255/13	349 - 362	0,48 - 0,51
* - В числителе приведена величина мощности падающей волны, а в знаменателе величина мощности отраженной волны						

Полученные на основе профилографических исследований, проведенных на профилографе-профилометре мод. 1500-  $\alpha$  Kasaka laboratory /

Япония результирующие графики зависимости влияния продолжительности процесса ПХТ на глубину канавок дифракционных решеток представлены на рис. 2 .

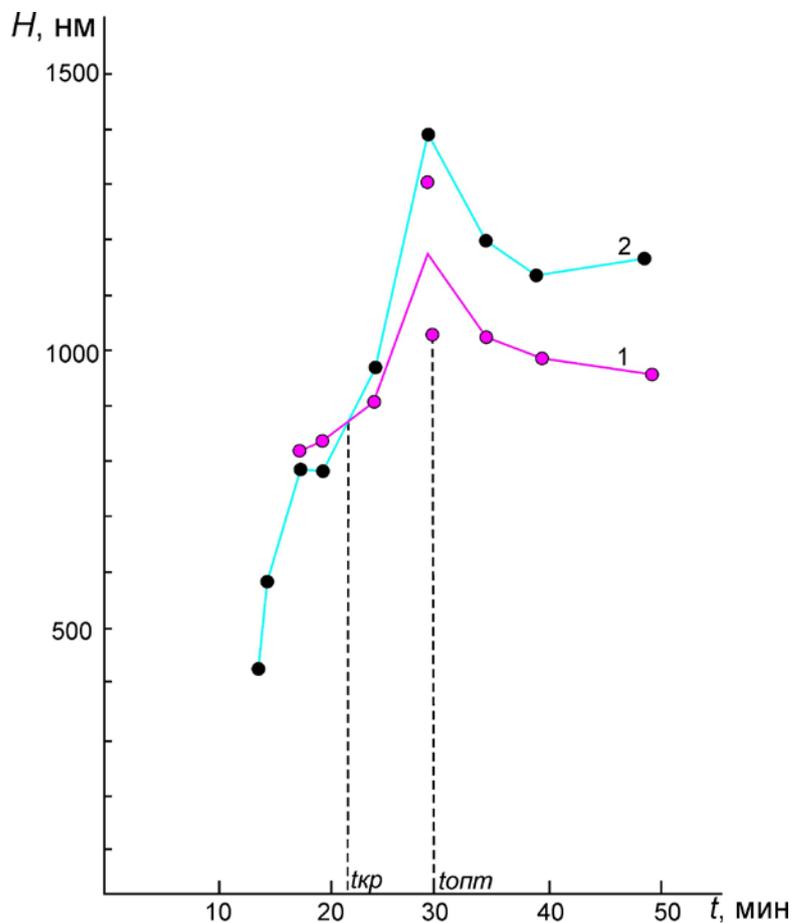


Рис. 2. Зависимости глубины канавок  $H$  дифракционных решеток от продолжительности  $t$  операции плазмохимического травления (ПХТ), получаемой после операции ПХТ (кривая 1) и после операции кислотного травления, следующей за операцией ПХТ (кривая 2)

Глубина профиля определялись на двух этапах изготовления ДОЭ: 1) после реализации собственно операции ПХТ; 2) после операции кислотного травления, которая производилась для удаления остатков хромовой маски.

На рис. 2 графику зависимости глубины канавок дифракционных решеток, измеренной на ДОЭ непосредственно после операции ПХТ, соответствует ломанная кривая 1, а ломанная кривая 2 соответствует графику

зависимости глубин канавок дифракционных решеток, получаемых после выполнения операции кислотного травления, следующей за операцией ПХТ на тех же образцах ДОЭ.

Из рассмотрения кривых 1 и 2 на рис. 2 можно заметить следующие закономерности и особенности относительно характера влияния продолжительности операции ПХТ на формируемую глубину канавки дифракционной решетки.

1) Обе кривые 1 и 2 имеют максимум глубины канавок при продолжительности процесса ПХТ  $t_{onm} = 30$  мин. Иными словами при продолжительности процесса ПХТ  $t < t_{onm}$  глубина канавок дифракционной решетки с увеличением продолжительности процесса ПХТ возрастает, а при продолжительности процесса ПХТ  $t > t_{onm}$  глубина канавок дифракционной решетки с увеличением продолжительности процесса ПХТ уменьшается.

2) При продолжительности процесса ПХТ  $t < t_{кр}$  глубины канавок дифракционной решетки, измеренные после операции ПХТ, превышают глубины тех же канавок, измеренные после операции кислотного травления, а при продолжительностях процесса ПХТ  $t > t_{кр}$  глубины канавок дифракционных решеток, измеренные после операции ПХТ, оказываются меньше глубин тех же канавок, измеренных после операции кислотного травления. Иными словами, в последнем случае операция кислотного травления приводит к увеличению глубин канавок дифракционной решетки. В момент  $t = t_{кр}$  глубина канавок дифракционной решетки после выполнения операции кислотного травления не изменяется.

3) Для продолжительностей процесса ПХТ  $t > t_{кр}$  с увеличением продолжительности процесса ПХТ разница между глубинами канавок после ПХТ и после кислотного травления увеличивается.

Анализ представленных на рис. 2 результатов исследования влияния продолжительности операции ПХТ на глубину рельефа фазовой дифракционной решетки позволяет утверждать, что для достижения максимальной глубины травления стекла единственным определяющим

параметром является селективность травления стекла относительно материала маски. Операцию ПХТ оптического стекла следует производить 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 маски.

Для нахождения оптимального режима ПХТ произвели серию экспериментов с использованием в качестве материала маски оксида железа. Образцы для этих исследований высверливали из готовых фотошаблонов, применяемых в производстве интегральных микросхем. Маска для операции ПХТ соответствовала непрозрачным участкам фотошаблона.

Исследовали влияние соотношения расходов плазмообразующего (аргон) и химически активного (фреон) газов на целый ряд выходных параметров процесса ПХТ. Результаты указанной серии экспериментов представлены в виде множества графиков на рис. 3. Эти зависимости получены при фиксации прочих условий процесса (мощности на антенне и столике, ток подмагничивания, расход гелия, скорость турбомолекулярного насоса) на тех же уровнях, что и в предыдущих экспериментальных исследованиях, результаты которых приведены в табл. 1 и на рис. 2.

Из рассмотрения графиков на рис. 3 видно, что зависимости интересующего нас параметра – селективности травления  $r$  - от расходов как аргона, так и фреона, носят ярко выраженный экстремальный характер, т.е. имеют максимумы. Можно считать установленным оптимальный режим ПХТ стекла на установке Caroline 15 PE – он соответствует расходу аргона  $C_{Ar} = 0,8$  л/мин при одновременном расходе фреона  $C_{CF_4} = 2,4$  л/мин.

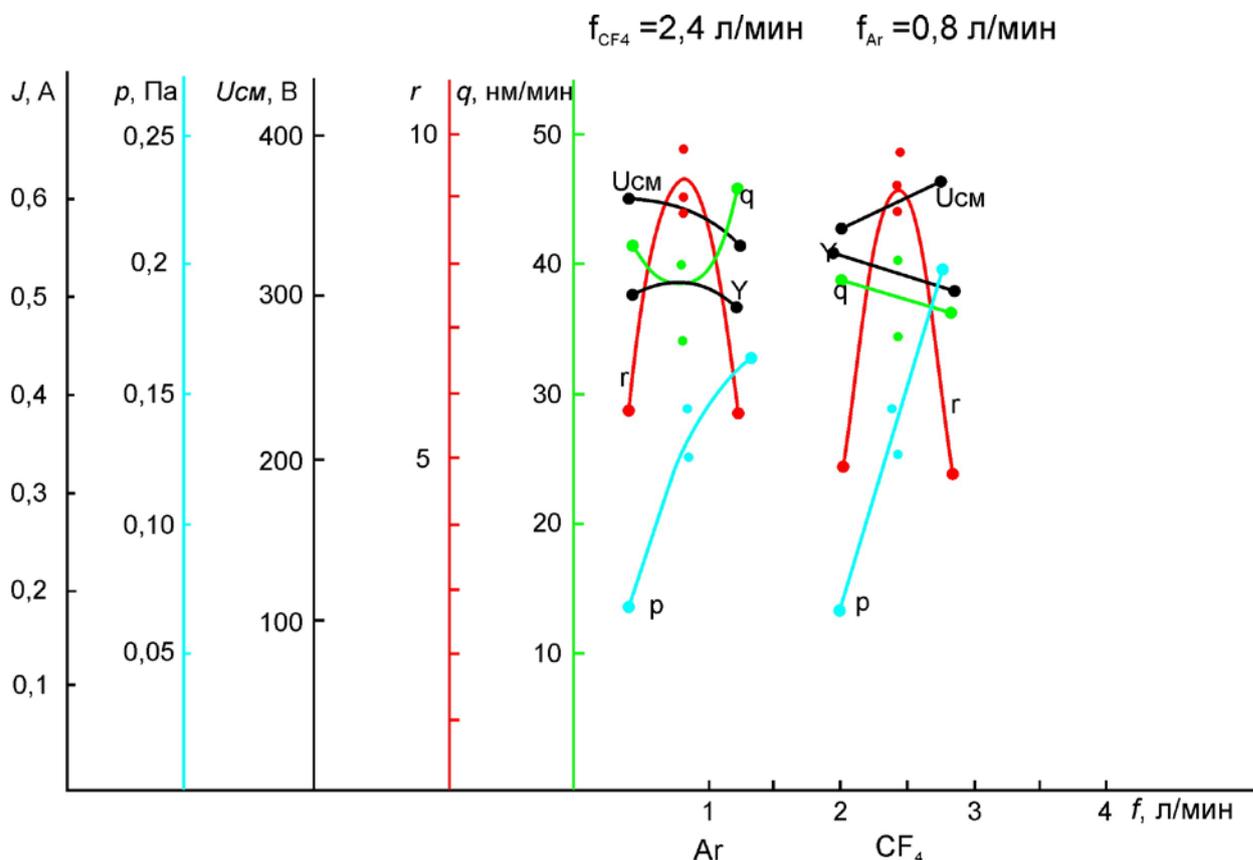


Рис. 3. Зависимости производительности  $q$  и селективности  $r$  травления, а также напряжения смещения  $U_{см}$ , анодного тока  $J$  и давления вакуума  $p$  в камере от расходов  $f$  аргона (Ar) и фреона ( $CF_4$ )

Практическое применение операции плазмохимического травления 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 метода ПХТ, производили на специально созданном оптическом стенде. При помощи специального измерительного прибора конструкции МГТУ им. Н.Э. Баумана измеряли интенсивности пучков 0-го, 1-го, 2-го, 3-го и -1-го («минус первого») порядков дифракции.

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 2-го порядка дифракции в общей интенсивности света, прошедшего через ДОЭ, от глубины канавок дифракционной решетки с различными периодами  $d$  представлены на рис. 4, из рассмотрения которого видно, что парциальная доля второго порядка дифракции может достигать и даже превышать 30 %.

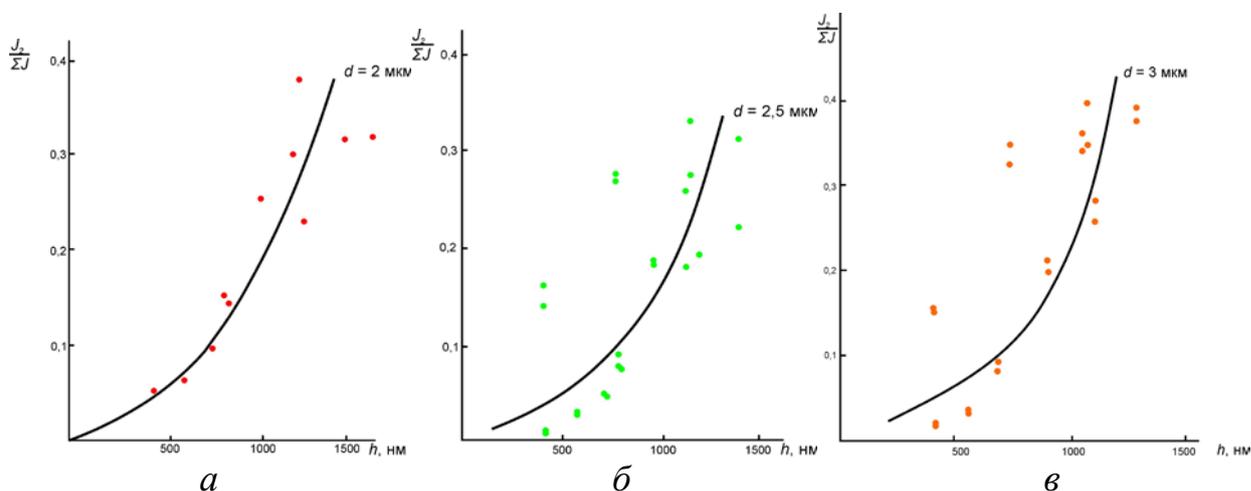


Рис. 4. Зависимости отношения интенсивности света пучка 2-го порядка дифракции  $I_2$  к сумме интенсивностей пучков 0-го, 1-го, 2-го, 3-го и -1-го порядков дифракции от глубины  $h$  канавок дифракционных решеток периодом  $d = 2$  мкм (а);  $d = 2,5$  мкм (б) и  $d = 3$  мкм (в)

Установленные эмпирически зависимости, представленные графиками на рис. 4, указывают также на то, что для повышения дифракционной эффективности фазовых дифракционных решеток глубину канавок следует по возможности увеличивать.

### 3. Обсуждение результатов экспериментальных исследований

Повышение дифракционной эффективности фазовых дифракционных решеток во 2-м порядке дифракции с увеличением глубины канавок дифракционной решетки (см. рис. 4) можно объяснить уменьшением относительной спектральной интенсивности излучения для нулевого порядка дифракции [7]. В общем случае, в соответствии с теорией дифракции света на фазовых дифракционных решетках с идеально прямоугольным профилем микрорельефа относительная спектральная интенсивность нулевого порядка дифракции должна изменяться волнообразно, достигая минимума (для наших условий) при глубинах канавок 700 нм, 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 [7] 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 уже было отмечено 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 обнаруженные максимумы в зависимостях  $r = f(C_{Ar})$  и  $r = f(C_{CF_4})$  (см. рис. 3), объяснить

которые помогают графики других зависимостей, представленные том же рисунке.

Среди этих графиков наиболее легко объяснимыми являются возрастания давления вакуума  $p$  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 неспаренность электронов, 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 автосмещения  $U_{см}$  на столике, так и к увеличению ионного тока через обрабатываемую заготовку ДОО, 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 травления  $q$ ), так и экранирующей маски, что также приводит к снижению селективности травления  $r$ .

Таким образом, можно считать, что максимум селективности травления стекла  $r$  наблюдается при минимизации скоростей травления  $q$ . При этом

для достижения требуемой глубины травления следует увеличивать продолжительность процесса травления, учитывая то обстоятельство, что зависимость достижимой глубины травления от длительности процесса ПХТ имеет сложный характер (см. рис. 2).

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

1) В момент  $t = t_{onm}$  (см. рис. 2) 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 изменения 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 срабатывают 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  $t > t_{onm}$ .

2) Процесс ПХТ характеризуется не только удалением подвергаемых обработке материалов (стекла и хрома), но и ростом пленки на обрабатываемой поверхности (это явление 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 травливания стекла намного выше скорости травливания хрома. В момент времени  $t = t_{кр}$  оказывается, что толщина пленки на стекле равна в точности 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  $t < t_{кр}$  толщина остаточного слоя хрома в сумме с толщиной выросшей на нем пленки полимера превышает 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 операции 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 травливания этой пленки. Если операция ПХТ является избыточно продолжительной, т.е. такой, при которой защитная маска хрома уже полностью удалена, то на операции кислотного травления, следующей после операции ПХТ, происходит удаление лишь этой пленки. Поэтому разница между глубинами канавок дифракционной решетки до и после операции кислотного травления с увеличением продолжительности операции ПХТ монотонно возрастает.

## Заключение

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

1) Для достижения расчетной глубины канавок фазовых дифракционных решеток как методом автоматического получения размера, так и методом пробных процессов и замеров, необходимо учитывать соотношение продолжительности  $t$  операции ПХТ с величиной критической продолжительности  $t_{кр}$ . Если  $t < t_{кр}$ , то в результате операции кислотного травления, следующей за операцией ПХТ и имеющей целью удаление остатков маски, глубина канавок уменьшится, а если  $t > t_{кр}$ , - то увеличится.

2) Установлено, что с увеличением глубины канавок до 1,5 мкм дифракционная эффективность фазовой дифракционной решетки, изготовленной методом плазмохимического травления, возрастает монотонно – для повышения дифракционной эффективности следует добиваться максимально возможной глубины канавок дифракционной решетки.

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

4) Полностью использовать возможности, предоставляемые толщиной и материалом маски, можно, обеспечивая за счет подбора оптимального режима процесса ПХТ максимальность селективности  $r$  травления оптического стекла относительно материала маски.

Результаты законченных исследований по тематике плазмохимического травления оптического стекла применяются в ОАО «Геофизика-Космос» при изготовлении дифракционных оптических элементов, ООО «Новые оружейные технологии» при изготовлении голограммных оптических элементов и планируются к применению на ряде предприятий, производящих изделия микрооптики.

Данная работа выполнена при проведении НИР по Государственному контракту № П950 от 27.05.2010 в рамках реализации Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009 – 2013 годы.

### Литература

1. Технология создания ДОЭ / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Сойфер, Г.В. Успенев // Методы компьютерной оптики / под ред. В.А. Сойфера, М., 2000. С. 239-310.
  2. Волков А.В., Казанский Н.Л., Колпаков В.А. Расчет скорости плазмохимического травления кварца. – Компьютерная оптика. – Вып. 21, 2001. – С. 121 – 125.
  3. Дудин С.В. Исследования и разработка технологических систем на базе ВЧ индукционного разряда для реактивного ионно-плазменного травления микро- и наноструктур. – Физическая инженерия поверхности. – Т.7, №3, 2009. – С. 171 – 194.
  4. Берлин Е., Двинин С., Морозовский Н., Сейдман Л. Реактивное ионно-плазменное травление и осаждение: установка Каролина 15. – Электроника: Наука, Технология, Бизнес. - № 8, 2005. – С. 78 -80.
  5. Берлин Е. В. , Сейдман Л. А. Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии. – М.: Техносфера, 2010. – 544 с.
  6. Одинокоев С. Б., Сагателян Г. Р. Технология изготовления дифракционных и голограммных оптических элементов с функциональным
- 
- <http://technomag.edu.ru/doc/408094.html>

микрорельефом поверхности методом плазмохимического травления. - Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер. Приборостроение. - № 2, 2010. - С. 92-104.

7. Рожков О.В., Тимашова Л.Н. Воспроизведение цветокодированной фазооптической записи в системах отображения информации. – Труды МВТУ им. Н.Э.Баумана. - № 309, 1979. – С. 21 – 36.

---

---

## Experimental studies of plasma-chemical etching of glass when manufacturing diffraction and hologram optical elements

# 05, May 2012

DOI: 10.7463/0512.0408094

Odinokov S.B., Sagatelyan G.R., Goncharov A.S., Kovalev M.S.,  
Solomashenko A.B., Verenikina N.M.

Russia, Bauman Moscow State Technical University

[odinokov@bmstu.ru](mailto:odinokov@bmstu.ru)

The authors consider capabilities of manufacturing diffraction and hologram optical elements (DOE and HOE) with the use of the “Caroline 15 PE” machine. The purpose of the work was to increase the quality of binary DOE-HOE which is defined mainly by depth of the regular profile on the functional surface. It is shown that the maximum of this depth corresponds to the maximum of the etching selectivity of glass concerning a mask material. It is established that at thickness of chromic mask of 100 nanometers the PE method reaches depth of surface to 1,4 microns. It allows to increase the diffraction efficiency of DOE-HOE. Relative intensity of light in the second order of diffraction is 30 %; it allows to create new products of micro-optics.

---

Publications with keywords: [diffraction](#), [glass](#), [plasma etching](#), [selectivity](#), [microoptics](#)

Publications with words: [diffraction](#), [glass](#), [plasma etching](#), [selectivity](#), [microoptics](#)

---

### References

1. Volkov A.V., Kazanskii N.L., Soifer V.A., Usplen'ev G.V. Tekhnologiya sozdaniia DOE [The technology of creation of diffraction optical elements (DOE)]. In book: *Metody komp'iuternoi optiki* [Methods of computer optics]. Moscow, Fizmatlit, 2000. C. 239-310.2000. – S. 239 – 310.
2. Volkov A.V., Kazanskii N.L., Kolpakov V.A. Raschet skorosti plazmokhimicheskogo travleniia kvartsa [The calculation of the rate of plasma chemical etching of quartz]. *Komp'iuternaia optika*, 2001, no. 21, pp. 121-125.
3. Dudin S.V. Issledovaniia i razrabotka tekhnologicheskikh sistem na baze VCh induktsionnogo razriada dlia reaktivnogo ionno-plazmennogo travleniia mikro- i nanostruktur [Research and development of technological systems based on high-frequency induction

<http://technomag.edu.ru/doc/408094.html>

discharge for reactive ion-plasma etching of micro-and nanostructures]. *Fizicheskaiia inzheneriia poverkhnosti*, 2009, vol. 7, no. 3, pp. 171-194.

4. Berlin E., Dvinin S., Morozovskii N., Seidman L. Reaktivnoe ionno-plazmennoe travlenie i osazhdenie: ustanovka Karolina 15 [Reactive ion-plasma etching and deposition: plant Carolina 15]. *Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes* [Electronics: Science, Technology, Business], 2005, no. 8, pp. 78-80.

5. Berlin E. V., Seidman L.A. *Ionno-plazmennye protsessy v tonkoplachnoi tekhnologii* [Ion-plasma processes in thin-film technology]. Moscow, Tekhnosfera, 2010. 544 p.

6. Odinkov S. B., Sagatelian G. R. Tekhnologiya izgotovleniia difraktsionnykh i gologrammnykh opticheskikh elementov s funktsional'nym mikrorel'efom poverkhnosti metodom plazmokhimicheskogo travleniia [Technology of Manufacturing of Diffraction and Hologram Optical Parts with Functional Microrelief of Surface by Method of Plasmochemical Etching]. *Vestnik MGTU im. N. E. Baumana. Ser. Priborostroenie* [Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrumentation], 2010, no. 2, pp. 92-104.

7. Rozhkov O.V., Timashova L.N. Vosproizvedenie tsvetokodirovannoi fazoopticheskoi zapisi v sistemakh otobrazheniia informatsii [Reproduction of color-coded phase-optical recording of the information display systems]. *Trudy MVTU im. N.E.Baumana* [Proc. of the Bauman MSTU], 1979, no. 309, pp. 21-36.