

УДК 535.42:533.915:621.794.4

С. Б. Одинокоев, Г. Р. Сагатеян

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИФРАКЦИОННЫХ И ГОЛОГРАММНЫХ ОПТИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ С ФУНКЦИОНАЛЬНЫМ МИКРОРЕЛЬЕФОМ ПОВЕРХНОСТИ МЕТОДОМ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ

Экспериментально решена проблема создания на поверхности деталей из оптического стекла, являющегося диэлектрическим материалом, бинарного функционального микрорельефа методом плазмохимического травления на серийной установке Caroline 15 PE. Получены зависимости скорости и селективности травления стекла от основных факторов процесса. Установлен режим, обеспечивающий полирующее травление оптического стекла. Обоснован и представлен технологический процесс изготовления соответствующих оптических деталей.

E-mail: h_sagatelyan@mail.ru

Ключевые слова: компьютерная голография, дифракционные оптические элементы, плазмохимия, оптическое стекло.

Совершенствование конструкций современных оптических систем на основе использования таких деталей, как дифракционные решетки, фазовые транспаранты, дифракционные оптические элементы (ДОЭ), голограммные оптические элементы (ГОЭ) требует новых технологических разработок [1]. Отличительной особенностью деталей указанного класса является то, что для их изготовления необходимо формировать микропрофиль высотой до 1 мкм, с заданными геометрическими параметрами как по глубине, так и по поверхности, причем элементы профиля имеют характерные размеры вдоль поверхности, соизмеримые с длиной световой волны (≤ 20 мкм).

Особый интерес представляет изготовление указанных деталей из оптического (неорганического) стекла. В этом случае для формирования микрорельефа неприемлемы как лезвийные и абразивные методы обработки материалов резанием, так и методы обработки материалов давлением. Неприемлемы также и методы жидкостного химического травления, поскольку оно отличается изотропностью, не обеспечивая требуемых точностных характеристик микропрофиля. В настоящее время для обработки материалов при изготовлении подобных деталей применяют методы квантовой технологии, предполагающей использование управляемых пучков частиц для формирования поверхностей

заданного рельефа. Такая технология позволяет создавать управляемые технологические комплексы [2].

Наиболее полно удовлетворяет предъявленным требованиям реактивное ионное травление [3, 4], при котором осуществляется бомбардировка материала заготовки направленным потоком ионов и ненаправленным потоком радикалов, получаемых при диссоциации в плазме технологического газа, содержащего химически активные компоненты с энергиями ионов, не превышающими 20...200 эВ. Травление оптического стекла, состоящего в основном из двуоксида кремния (SiO_2), осуществляется во фторсодержащей плазме атомами фтора и фторсодержащими радикалами CF_x . При этом продуктами в газовой фазе являются SiF_4 и молекулы CO , образующиеся путем окисления радикалов CF_x кислородом, содержащимся в стекле. Поэтому адсорбции радикалов и пассивирования поверхности не происходит. В случае пассивации поверхности заготовки за счет осаждения полимерной пленки возможна полная остановка травления.

Перспективным представляется применение разновидности реактивно-ионного травления, которая называется плазмохимическим травлением (ПХТ). Основным отличием методов ионно-плазменной обработки от ионно-лучевой является местоположение обрабатываемой детали относительно среды, в которой создаются ионы рабочего газа. При обработке ионными пучками, создаваемыми автономными ионными источниками, обрабатываемая деталь отделена от области газоразрядной плазмы. При ионно-плазменной обработке деталь помещается непосредственно в газоразрядную плазму, являющуюся источником бомбардирующих ионов.

Оптические стекла имеют важнейшую особенность — они являются диэлектриками. Поэтому имеющиеся наработки в области плазмохимии [5–8] не могут быть напрямую использованы в качестве руководящих материалов для создания технологических процессов изготовления деталей микрооптики методами ПХТ. Тем не менее в настоящее время появились сообщения [9] о получении на стекле “Пирекс” канавок глубиной и шириной 2 мкм при помощи плазмохимического метода. Кроме того, в тонких слоях оксида кремния (диэлектрик), выращенного на кремнии (полупроводник), методом плазмохимии получают канавки шириной 240 нм, глубиной 2 мкм и с вертикальными стенками (не более 5°) [10]. Появились сообщения об изготовлении киноформных изделий плазмохимическим методом [11].

Изложенное свидетельствует об исключительной актуальности проведения экспериментально-аналитических исследований по данной тематике.

Объектом исследования являются оптические стекла — диэлектрические многокомпонентные материалы. Поскольку при бомбардировке

используются заряженные частицы, так как их легко ускорить до требуемой энергии, то при бомбардировке диэлектрика встает вопрос о нейтрализации поверхностного заряда, накапливающегося на заготовке. Этот вопрос можно решить, применяя систему с самоподдерживающимся высокочастотным разрядом [12] и с искусственным поддержанием разряда с помощью ВЧ и магнитного полей [13], [14]. Для эффективной работы ВЧ генераторов необходимо их согласование с рабочей камерой.

Экспериментальные исследования. Эксперименты проводили на установке Caroline 15 PE производства ЗАО “ЭСТО-Вакуум”, используя “трансформаторно-связанную плазму” (ТСР-разряд) [15–17]. Достоинствами установки являются: высокая концентрация создаваемой плазмы (порядка 10^{12} см^{-3}), низкий ее потенциал относительно заготовки, возможность независимого регулирования плотности плазмы и энергии ионов подачей отдельного смещения на подложку и высокая степень равномерности ионного тока на подложку большого диаметра.

Основные технические характеристики установки Caroline 15 PE

Предельный вакуум в рабочей камере, Па	$1,5 \cdot 10^{-4}$
Рабочая частота на антенне, МГц	13,56
Частота напряжения смещения, МГц	13,56
Мощность, подаваемая на столик, Вт	До 499
Рабочий столик	Изолированный, водоохлаждаемый, с подачей гелия под подложку
Диаметр столика, мм	220
Диапазон рабочих давлений, Па	0,01–20,0

Главная особенность установки Caroline 15 PE — большой размер столика, предусматривающий обработку заготовок диаметром 200 мм. Такой диаметр оптических деталей с микротопологическим рельефом на этапе отработки технологии неприемлем. Поэтому было изготовлено специальное приспособление — блок, позволяющий подвергать ПХТ образцы требуемого размера. Конструкция блока приведена на рис. 1.

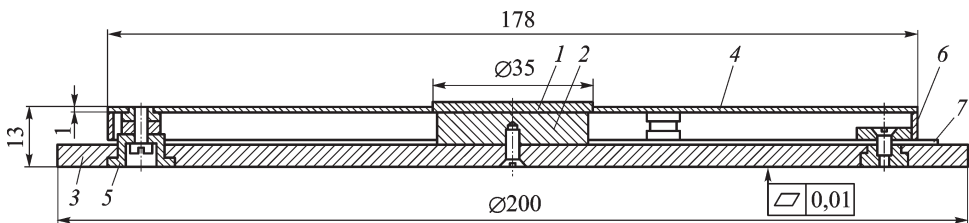


Рис. 1. Конструкция дополнительного блока к установке Caroline 15 PE для реализации процесса ПХТ стекла

Образец 1 устанавливают на металлический постамент 2, привинченный к металлическому основанию блока 3. Экранирование столика обеспечивает металлический экран 4 с отверстием, соответствующим подвергаемому обработке образцу по конфигурации и размеру. Экран привинчен к основанию с обеспечением электрической развязки благодаря применению керамических втулок 5. Для предотвращения образования плазмы между экраном и основанием, к экрану приварена юбка 6 в форме кольца. Между юбкой и основанием для предотвращения короткого замыкания проложены дистанционные керамические прокладки 7.

При работе установки высокочастотное напряжение столика сообщается образцу через основание 3 и постамент 2, а к экрану 4 за счет конструктивного устройства установки подводится надежное заземление. Благодаря этому переменный ток между плазмой и столиком протекает только через образец.

Кроме того, основание 3 обеспечивает охлаждение блока гелием при работающей установке. Для эффективности этого охлаждения поверхность основания, контактирующая со столиком, должна быть доведена с обеспечением отклонений от плоскостности не более 10 мкм.

Для проведения экспериментов использовали образцы из боросиликатного стекла диаметром 35 и толщиной 2,5 мм с масками из хрома. Образцы изготовляли высверливанием из пластины — заготовки фотошаблона при помощи алмазного трубчатого сверла. На одной пластине размещалось четыре образца.

Применяли два метода изготовления масок: метод лазерного окисления слоя хрома; метод электронно-лучевой литографии.

При исследованиях влияния основных факторов процесса ПХТ на выходные параметры подлежащий травлению профиль представлял собой бинарную шахматную структуру с размерами клеток 20×20 мкм и 10×10 мкм.

Перечень факторов, оказывающих влияние на выходные характеристики процесса ПХТ, приведен в табл. 1.

Применяя метод лазерного окисления слоя хрома для записи изображения 128×128 клеток размерами 20×20 мкм, изготовили образцы с толщиной маски 200 нм для предварительных экспериментов, реализация которых позволила установить следующее.

Получение микрорельефа при изготовлении деталей с применением ПХТ следует осуществлять за две операции. Первая операция — собственно ПХТ, при котором формируется требуемая глубина впадин микрорельефа. Вторая операция — жидкостное травление, при котором происходит удаление остатков маски. Такая структура этапа получения микрорельефа деталей обусловлена тем обстоятельством,

Перечень факторов процесса ПХТ

Фактор	Примечания
Мощность на антенне P_a , Вт	Излучается в плазму
Мощность на столике $P_{ст}$, Вт	Создает напряжения смещения
Скорость вращения турбины, %	Относительно максимальной
Ток подмагничивания I , А	В опоясывающем соленоиде
Расход аргона f_{Ar} , л/мин	Плазмообразующий газ
Расход фреона f_{CF_4} , л/мин	Химически активный газ
Расход гелия f_{He} , л/мин	Охлаждение столика
Напряжение смещения $U_{см}$, В	Формируется в процессе ПХТ
Давление p , Па	Формируется в процессе ПХТ

что при полном удалении маски уже на операции ПХТ вскрываемые из-под маски участки поверхности детали оказываются матовыми.

Предварительными экспериментальными исследованиями также было установлено, что при толщине хромовой маски $h = 200$ нм методом ПХТ, целенаправленно изменяя режим обработки, удается достичь глубин травления стекла $H = 270 \dots 380$ нм. При этом скорость травления составляет $v_{тр} = 10,7 \dots 13,5$ нм/мин, а селективность травления стекла относительно хрома $r = 1,34 \dots 1,91$.

Для поиска рациональных режимов и достижения большей глубины профиля провели два эксперимента по плану 2².

В первом эксперименте выявляли влияния факторов установленной мощности на антенне P_a и на столике $P_{ст}$.

Изображения в виде квадратов на образцах состояли из клеток размерами 20×20 мкм. Размер квадрата 128×128 клеток. На каждом образце размещалось по четыре квадрата. Исходную толщину хромового покрытия на основе профилографических исследований оценили как 65 нм.

Матрица планирования эксперимента и его результаты представлены в табл. 2, где введены следующие обозначения: x_1 — кодированное значение установленной мощности на антенне P_a (при $x_1 = +1$ $P_a = 350$ Вт; при $x_1 = -1$ $P_a = 250$ Вт); x_2 — кодированное значение установленной мощности на столике $P_{ст}$ (при $x_2 = +1$ $P_{ст} = 200$ Вт; при $x_2 = -1$ $P_{ст} = 100$ Вт); H — глубина травления, нм; $v_{тр}$ — скорость травления стекла при ПХТ, нм/мин; r — селективность травления стекла относительно хрома; t — продолжительность процесса ПХТ, мин.

Условия проведения эксперимента, т.е. значения не подвергавшихся варьированию факторов, следующие: скорость турбины 100 %; 1,75 А — ток подмагничивания; 0,3 л/мин, 2,7 л/мин и 1,2 л/мин — расходы аргона, фреона и гелия соответственно.

Матрица планирования и результаты первого эксперимента 2²

№ опыта	x_1	x_2	x_1x_2	H , нм	$v_{тр}$, нм/мин	r	$U_{см}$, В	p , Па	t , мин
1	+1	+1	+1	220	12,94	3,38	-264	0,82	17
2	-1	+1	-1	273	9,10	4,2	-297	0,77	30
3	+1	-1	-1	76	3,43	1,17	-136	1,0	30
4	-1	-1	+1	115	3,83	1,77	-144	0,93	30

Полученные уравнения регрессии имеют вид:

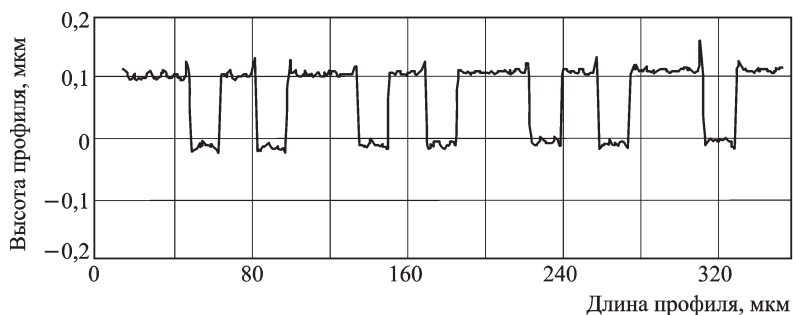
$$\begin{aligned}
 H &= 171 - 23x_1 + 75,5x_2 - 3,5x_1x_2; \\
 v_{тр} &= 7,325 + 0,86x_1 + 3,695x_2 + 1,06x_1x_2; \\
 r &= 2,63 - 0,355x_1 + 1,16x_2 - 0,055x_1x_2; \\
 U_{см} &= -210,25 + 10,25x_1 - 70,25x_2 + 6,25x_1x_2; \\
 p &= 0,88 + 0,03x_1 - 0,085x_2 - 0,005x_1x_2.
 \end{aligned} \tag{1}$$

Анализируя уравнения регрессии (1), можно заключить, что сама по себе скорость травления стекла $v_{тр}$ возрастает с увеличением как мощности на антенне, так и мощности на столике. Однако влияние исследуемых факторов на другие параметры носит разнонаправленный характер: увеличению глубины H и селективности r травления способствует повышение установленной мощности на столике $P_{ст}$ от 100 Вт до 200 Вт, а также снижение установленной мощности на антенне P_a от 350 Вт до 250 Вт.

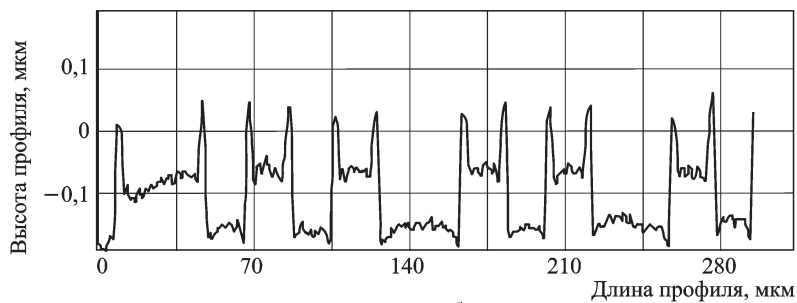
Такой характер влияния факторов объясняется тем, что с ростом мощности ВЧ излучения, вводимого в плазму, возрастает скорость травления не только стекла, но, по-видимому, и хрома — материала маски.

Рассмотрение параметров, формируемых непосредственно в процессе ПХТ, а именно напряжения автосмещения на столике $U_{см}$ и давления p в рабочей камере, показывает, что эти параметры хорошо коррелируются с основным целевым параметром ПХТ — селективностью травления r . О повышении селективности травления могут свидетельствовать увеличение напряжение автосмещения и уменьшение давления.

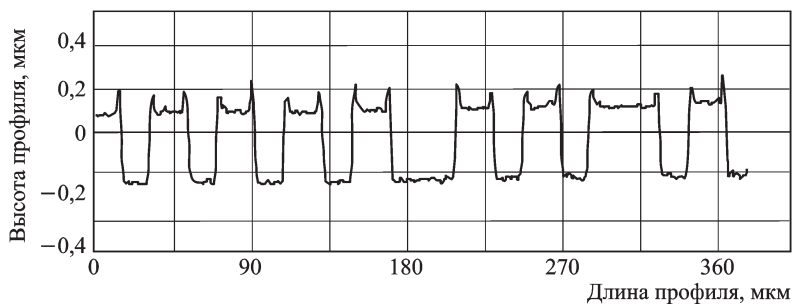
Об особенностях протекания процессов в зоне взаимодействия плазмы с образцом можно судить по результатам профилографических исследований, приведенных на рис. 2. Так, при реализации опыта с $P_a = 350$ Вт и $P_{ст} = 100$ Вт (рис. 2, б) образуются выступы по краям вершин профиля и углубления в местах переходов впадин профиля в вертикальные стенки.



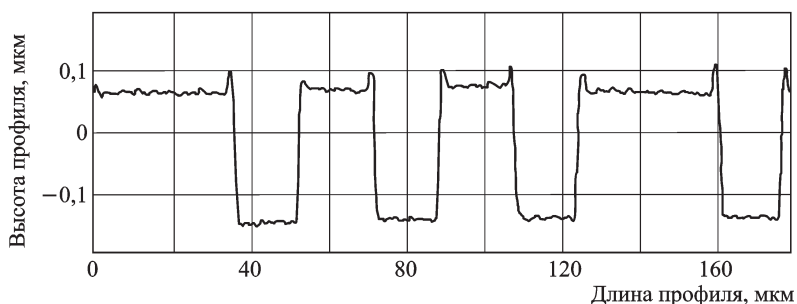
a



б



в



г

Рис. 2. Профилограммы образцов после проведения опытов № 4 (*a*), № 3 (*б*), № 2 (*в*) и № 1 (*г*) первого эксперимента

Можно видеть, что если профиль состоит из относительно плоских вершин, имеющих выступы по краям, то продолжительность процесса ПХТ избыточная. Образование выступов объясняется тем, что представляющий собой маску хром, расположенный на вершинах профиля,

в процессе ПХТ стравливается неравномерно: скорость травления хрома оказывается выше в центральных зонах вершин профиля и ниже — по краям вершин.

Причин появления этого эффекта может быть две. Первая причина может быть связана с особенностями формирования записываемого рисунка. Возможно, что вначале очерчивается контур, а затем луч лазера или электронный луч, сканируя, заполняет очерченный контур импульсами излучения. В этом случае стойкость слоя по контуру окажется выше, чем в сердцевине контура.

Однако более весомой представляется вторая причина, которая может быть связана с принципиальными особенностями процесса ПХТ — на краю очерченного контура вершины профиля скорость травления ниже, чем в центре контура. Это может происходить, если процессы физического и химического разрушений материала в некоторой рассматриваемой точке при ПХТ определяются воздействием атомов, ионов и радикалов не только на эту точку, но и на точки, находящиеся в ее окрестности.

Другой особенностью микропрофиля (см. рис. 2, б) является наличие углублений в местах перехода дна впадины в вертикальную стенку выступа. Формирование таких углублений объясняют рикошетирующим положительно заряженных ионов, атомов и радикалов от вертикальных стенок профиля. В местах сочленения дна с вертикальной стенкой на дно воздействуют не только частицы, вектор перемещения которых был направлен собственно в область, ограниченную площадкой дна, но и те частицы, которые пролетели бы мимо площадки дна, если бы она не была окружена вертикальной стенкой. Учитывая особенность режима опыта (см. рис. 2, б), можно утверждать, что эта характерная особенность микрорельефа формируется при максимизации хаотичности движения в плазме положительно заряженных ионов аргона и фторсодержащих радикалов.

Во втором эксперименте, проведенном по плану 2², исследовали влияния факторов тока подмагничивания I и расхода фреона (CF_4).

Здесь изображения в виде квадратов на образцах состояли из клеток размерами 10×10 мкм, а размер каждого из четырех квадратов на образце составлял 256×256 клеток. На каждом образце размещалось по четыре квадрата, а исходная толщина хромового покрытия составляла 110 нм.

Матрица планирования второго эксперимента и его результаты представлены в табл. 3; здесь обозначено: x_1 — кодированное значение тока подмагничивания I (при $x_1 = +1$ $I = 2,0$ А, а при $x_1 = -1$ $I = 1,5$ А); x_2 — кодированное значение расхода фреона f_{CF_4} (при $x_1 = +1$ $f_{\text{CF}_4} = 3,0$ л/мин, а при $x_1 = -1$ $f_{\text{CF}_4} = 2,4$ л/мин).

Матрица планирования и результаты второго эксперимента 2²

№ опыта	x_1	x_2	x_1x_2	H , нм	$v_{тр}$, нм/мин	r	$U_{см}$, В	p , Па	t , мин
1	+1	+1	+1	354	17,27	3,22	-324	0,74	20
2	-1	+1	-1	354	17,27	3,22	-267	0,75	20
3	+1	-1	-1	395	11,29	3,59	-279	0,73	35
4	-1	-1	+1	367	18,35	3,34	-330	0,74	20

Условия проведения этого эксперимента, т.е. значения не подвергавшихся варьированию факторов, следующие: 250 Вт — мощность на антенне; 200 Вт — мощность на столике; 100 % — скорость турбины; 0,3 л/мин и 1,2 л/мин — расход аргона и гелия.

Получены следующие уравнения регрессии:

$$\begin{aligned}
 H &= 367,5 + 7x_1 - 13,5x_2 - 7x_1x_2; \\
 v_{тр} &= 16,045 - 1,765x_1 + 1,225x_2 + 1,765x_1x_2; \\
 r &= 3,3425 + 0,0625x_1 - 0,1225x_2 - 0,0625x_1x_2; \\
 U_{см} &= -300,0 - 1,5x_1 + 4,5x_2 - 27,0x_1x_2; \\
 p &= 0,73 + 0,005x_1 + 0,015x_2 - 0,01x_1x_2.
 \end{aligned} \tag{2}$$

Решая эти уравнения, можно прийти к заключению, что увеличению таких целевых характеристик процесса ПХТ, как глубина травления H и селективность r способствует снижение расхода фреона f_{CF_4} от 3,0 до 2,4 л/мин, а также увеличение тока подмагничивания I от 1,5 А до 2,0 А. Кроме того, можно считать установленным, что влияние тока подмагничивания усиливается при снижении расхода фреона.

С указанными целевыми характеристиками процесса хорошо коррелирует формируемое на столике установки автосмещения напряжение $U_{см}$. В то же время исследуемые во втором эксперименте факторы практически не влияют на формируемое в вакуумной камере давление p .

Из уравнений регрессии (2) следует, что для увеличения глубины травления и его селективности следует выбирать режимы, характеризующиеся низкой скоростью травления.

Результаты профилометрических исследований образцов, применявшихся во втором эксперименте, приведены на рис. 3. Можно видеть, что характер микрорельефа стабилизирован с обеспечением возможности получения требуемого детерминированного функционального профиля с вертикальными стенками, плоскими вершинами и впадинами. При этом режим опыта, результаты которого представлены на рис. 3, а, обеспечивает полирующее травление и поэтому может быть рекомендован в качестве рационального.

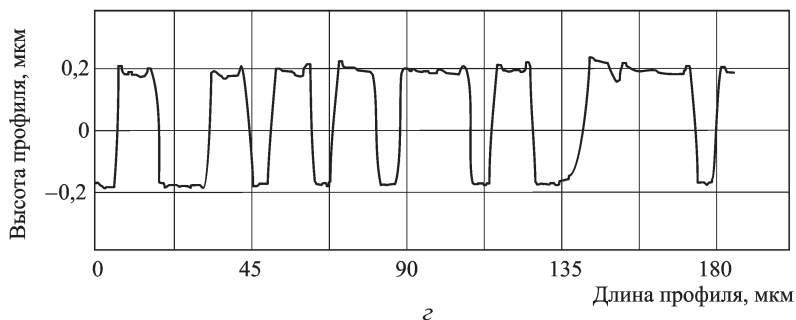
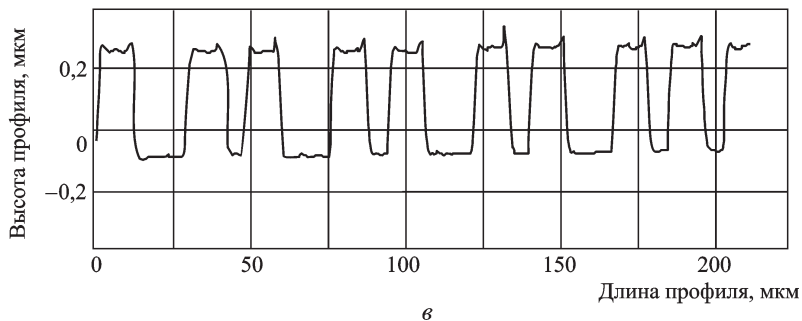
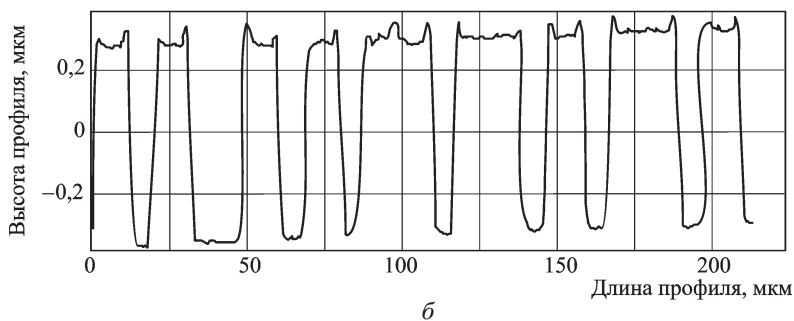
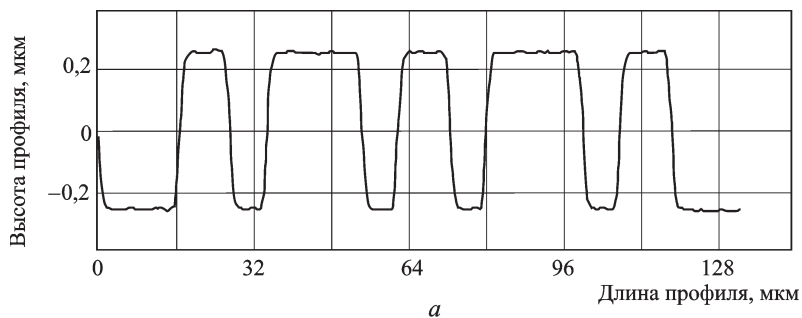


Рис. 3. Профилограммы образцов после проведения опытов № 4 (а), № 3 (б), № 2 (в) и № 1 (г) второго эксперимента в соответствии с табл. 3

На основе применения результатов проведенных экспериментов был разработан технологический процесс изготовления деталей микрооптики с бинарной топологией функциональной поверхности. Этот технологический процесс внедрен для производства изделия — бинарного фазового транспаранта, содержавшего шахматную клетчатую

двухуровневую структуру со случайным распределением клеток при равенстве суммарных площадей клеток на каждом уровне. Размер клеток составлял 10×10 мкм при числе клеток 256×256 в каждом изделии.

Для опытной партии изделий требуемая глубина рельефа составляла 647 ± 5 нм. Исходя из уравнений регрессии (1) и (2), для расчета глубины H и селективности r травления для опытной партии образцов выбрали заготовки фотошаблонов с исходной толщиной хромового покрытия 200 нм.

Для данного изделия применяли режим полирующего травления при следующих условиях: 250 Вт и 200 Вт — мощность на антенне и столике; 60 % — скорость турбины; 2 А — ток подмагничивания; 0,4 л/мин, 3,0 л/мин и 1,2 л/мин — расходы азота, фреона и гелия соответственно; 313 В — напряжение смещения; 1 Па — давление.

Рассчитывая по формулам (1) и (2) ожидаемую скорость травления, установили продолжительность первой операции травления: $t = 30$ мин.

В результате измерений установили, что глубина профиля после данной операции, представляющая собой сумму глубины протравы в стекле и остаточной толщины хромовой маски, составила $H = 550$ нм. Имея ориентировочную скорость травления для данного режима $v_{\text{тр}} = 18,3$ нм/мин, рассчитали требуемую продолжительность второй операции в целях достижения требуемой глубины рельефа: $t = 7$ мин.

Повторным измерением на профилографе установили, что глубина профиля после второй операции, включающая в себя глубину протравы в стекле и остаточную толщину хромовой маски, составила $H = 680$ нм.

Остатки хромовой маски удалили кислотным травлением. Результаты замеров профилограммы после кислотного травления показали, что глубину профиля можно оценить как $H = 650$ нм. Следовательно, цель, заключающаяся в том, чтобы получить расчетную глубину рельефа $H = 647 \pm 5$ нм, была достигнута.

Таким образом, установлен режим полирующего ПХТ с последующим кислотным травлением, обеспечивающий получение требуемой глубины профиля поверхности на основе установленных скорости $v_{\text{тр}} = 17,5$ нм/мин и селективности $r = 3,8$ относительно хромовой маски ПХТ.

Заключение. Обобщая результаты проведенных исследований, можно утверждать, что создана технология изготовления специальных деталей дифракционной оптики из оптического боросиликатного стекла, характеризующихся наличием на рабочей поверхности функционально детерминированной топологии с бинарным микрорельефом.

В качестве оборудования рекомендуется применять отечественную установку ПХТ Caroline 15 PE. Для обеспечения возможности реализации процесса ПХТ на оптическом стекле, являющемся диэлектриком, разработан блок специальной конструкции, снабженный заземленным экраном.

Для сохранения полированности участков поверхности заготовки, находящихся под маской, рекомендуется после операции ПХТ удалять остатки маски кислотным травлением. При этом для получения глубин профиля более 400 нм рекомендуется применять хромовую маску с исходной толщиной 200 нм.

Полирующее травление боросиликатного стекла обеспечивается при следующем режиме, который можно рекомендовать в качестве рационального: мощность на антенне составляет 250 Вт; мощность на столике — 200 Вт; в качестве плазмообразующего газа применяются аргон с расходом 0,3 л/мин или азот с расходом 0,4 л/мин; расход химически активного газа — фреона (тетрафторида углерода) — составляет 2...3 л/мин.

При полирующем травлении стекла можно обеспечивать скорость травления до 20 нм/мин при селективности травления стекла относительно хрома до 3,8.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Т е х н о л о г и я создания ДОО / В кн.: Методы компьютерной оптики. – М.: Физматлит, 2003. – С. 238–309.
2. П л а з м е н н а я технология в производстве СБИС / Под ред. Н. Айнспрука и Д. Брауна: Пер. с англ. – М.: Мир, 1987.
3. F l a m m D. L., D o n e l l y V. M. Basic Principals of Plasma Etching // VISA Electronics. Microstructure Science. N.-Y.: Academic Press. 1985. Vol. 8. – P. 190–251.
4. P e r r y A. J., B o s w e l l R. W. Fast anisotropic etching of silicon in an inductively coupled plasma reactor // Appl. Phys. Lett. 55(2), 10 July 1989.
5. С л о в е ц к и й Д. И. Гетерогенные реакции в галогенсодержащей плазме // Химия плазмы. – 1989. – Вып. 15. – С. 208–265.
6. F l a m m D. L., D o n e l l y V. M. The disign of plasma etchants // Plasma Chemistry and Plasma Processing. – 1981. Vol. 4. – P. 317–363.
7. И в а н о в с к и й Г. Ф., П е т р о в В. И. Ионно-плазменная обработка материалов. – М.: Радио и связь, 1986.
8. W i n t e r s H. F., C o b u r n J. W. Surface science aspects of etching reactions // Surface Science Reports. North Holland. – 1992. – Vol. 14. – P. 161–269.
9. E t c h i n g of Pyrex glass substrate by unductively coupled plasma reactive ion etching for micro-nanofluidic devices // J. Vac. Sci. Technol. B 24(6), Nov/Des 2006. – P. 3162–3164.
10. H i g h selectivity plasma etching of silicon dioxide with a dual frequency 27/2 MHz capacitive radio frequency discharge // J. Vac. Sci. Technol. B 14(5), Sep/Oct 1996. – P. 3276–3282.
11. G l a s s diffractive optical elements (DOEs) with complex modulation DLC thin Film Coated // Materials Research. – 2008. – Vol. 11, No. 3. – P. 341–345.

12. Norström H. // Vacuum. – 1980. – Vol. 30. – P. 225.
13. Penning S. M., Moubals J. H. A. // Proceeding Konink I. Ned. Akad. Wetenschap. – 1940. – Vol. 43. – P. 41.
14. Davidse P. D., Halsell L. J. // Journ. Appl. Phys. – 1966. – Vol. 37. – P. 574.
15. Берлин Е. В., Двинин С. А., Михеев В. В. Распределение плотности плазмы в цилиндрической разрядной камере // Вестник МГУ им. М.В. Ломоносова. – 2004.
16. Двумерные распределения плотности плазмы в газовом разряде низкого давления / Е.В. Берлин, С.А. Двинин, В.В. Михеев // Физика плазмы. – 2004. – № 12. – С. 1043–1051.
17. Пат. № 2171555 РФ. Источник ионов высокой плотности / Берлин Е.В. Приоритет от 06.03.00.

Статья поступила в редакцию 23.12.2009



Сергей Борисович Одинокоев родился в 1950 г., окончил в 1973 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор около 150 научных работ в области оптоэлектронной обработки информации и голографии.

S.B. Odinoikov (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1973, assoc. professor of the “Laser and Optoelectronic Systems” department of the Bauman Moscow State Technical University. Member of the Rozhdestvensky Optical Society. Author of about 150 publications in the field of holography and optoelectronic information processing.



Гайк Рафаэлович Сагателян родился в 1953 г., окончил Ереванский политехнический институт в 1975 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры “Технология приборостроения” МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 110 научных работ в области прецизионной обработки.

G.R. Sagatelyan (b. 1953) graduated from the Yerevan Polytechnic Institute in 1975. D. Sc. (Eng.), professor of “Technology of Instrument Engineering” department of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 110 publications in the field of precision processing.