

СОЗДАНИЕ ДОЭ ДЛЯ ФОРМИРОВАНИЯ ТОЧЕЧНЫХ ЭТАЛОННЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Одинокоев С.Б., Сагатеян Г.Р., Ковалёв М.С., Соломашенко А.Б., Дроздова Е.А.
МГТУ им. Н.Э. Баумана

Аннотация

Обоснована возможность формирования изображения в виде пяти расположенных крестообразно точек при помощи дифракционного оптического элемента (ДОЭ), содержащего пять работающих во втором порядке дифракции при наклонном падении света фазовых дифракционных решёток с прямоугольным профилем, занимающих суммарно не более 1% площади ДОЭ. Рассмотрены возможности изготовления ДОЭ с использованием установки плазмохимического травления «Caroline 15 PE». Установлено, что при глубине поверхностного микрорельефа до 1,4 мкм и наклонном падении света достигается дифракционная эффективность ДОЭ до 0,3–0,35 во втором порядке дифракции.

Ключевые слова: оптическое стекло, бинарный микрорельеф, наклонное падение света, глубина канавок, фазовые дифракционные решётки, плазмохимическое травление, дифракционная эффективность.

Введение

Для ряда оптических приборов, которые широко используются в качестве датчиков систем ориентации космических аппаратов, в частности – нерасстраиваемых оптических угломеров [1], актуальной является проблема разработки оптических подсистем, обладающих минимальными массогабаритными характеристиками. Проведённые МГТУ им. Н.Э. Баумана совместно с ОАО «НПП «Геофизика-Космос» научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы имели целью разработать конструкцию канала геометрического эталона, альтернативную коллиматору с зеркально-призменной системой в виде единого моноблока [2]. Дальнейшее совершенствование углоизмерительного прибора в ОАО «НПП «Геофизика-Космос» [3] осуществлялось на основе модернизации блока осветителя. В то же время наши исследования были направлены на совершенствование работы высокоточных угломеров [4], которая неразрывно связана с каналом геометрического эталона, обеспечивающего формирование эталонного расположения нескольких точек в плоскости изображения на ПЗС-матрице.

Требуемое расположение точек показано в позиции «Вид В» на рис. 1.

На этом же рисунке схематически представлен рассматривавшийся нами вариант нерасстраиваемого геометрического эталона (НГЭ), обеспечивающий требуемое расположение точек.

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 ДОЭ 4. Дифрагированные на ДОЭ лучи света попадают в зрачок прибора 5 таким образом, что на ПЗС-матрице 6 формируется эталонное расположение пяти точек.

По нашему мнению, такая схема по сравнению с альтернативно возможными [1–4] вариантами схемного решения НГЭ обеспечивает минимальные габариты, а следовательно, и массу этого важнейшего оптического канала. Действительно, как видно из рассмотрения схемы рис. 1, габарит подсистемы НГЭ

определяется расстоянием от плоскости ДОЭ до плоскости зеркала, которое не должно попадать в поле зрения. Минимальность этого расстояния, в свою очередь, определяется максимально достижимым углом падения света на ДОЭ.

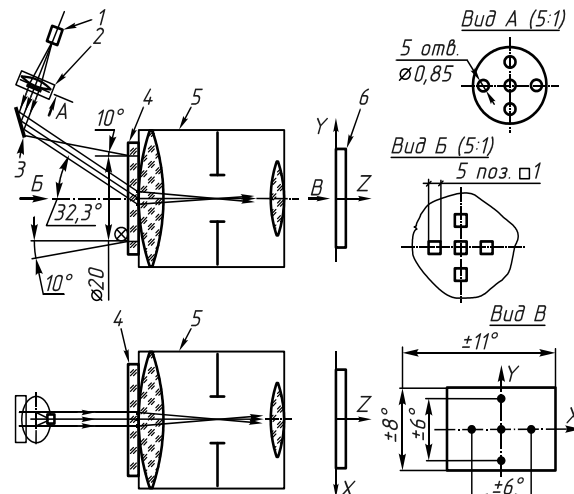


Рис. 1. Схема оптической подсистемы для формирования эталонного расположения точек

Очевидна и минимизация массы канала НГЭ, поскольку множество оптических деталей (линз и призм) заменяется единственной деталью – подлежащим разработке ДОЭ.

1. Обоснование оптической схемы ДОЭ

Приступая к созданию разрабатываемого ДОЭ, следует в первую очередь рассмотреть возможность применения мультифокальных сложно-дифракционных линз Френеля [5]. Из рассмотрения схемы на рис. 1 видно, что канал НГЭ должен иметь лишь одну фокальную плоскость, совпадающую с плоскостью входного зрачка оптической системы (ОС). В то же время техническое решение, изложенное в статье [5], предполагает создание множества фокальных плоскостей вдоль оси z рассматриваемой ОС. Следовательно, создание требуемого множества эталонных точек в данной ОС, предусматривающей фиксированное расположение плоскости ПЗС-

матрицы, за счёт многоуровневой и многофокусной линзы Френеля невозможно.

По той же причине нам представляется излишним формирование трёхмерных периодических картин, например, в соответствии с техническим решением, изложенным в статье [6]. Конечно, можно было бы использовать формируемую виртуальную кристаллическую решётку лишь с одной кристаллографической плоскостью, однако принятая в работе [6] за основу дамманновская дифракционная решётка в качестве ДОЭ формирует дифракционную картину, отличающуюся от картины, требуемой в нашем случае, – в поле зрения будет наблюдаться излишнее количество эталонных точек. Кроме того, для бинарного фазового рельефа такого ДОЭ вряд ли можно обеспечить одинаковую яркость в каждой из точек наблюдаемой картины, а создание многоступенчатого фазового рельефа сопряжено со множеством технологических проблем. К этому следует добавить, что математическое моделирование работы предлагаемого ДОЭ, результаты которого приведены в работе [6], указывает на наличие в формируемой картине, помимо требуемых эталонных точек, также и других зон повышенной освещённости, что для рассматриваемого класса оптических приборов категорически неприемлемо.

Весьма интересна идея применения сегментированных ДОЭ [7]. Действительно, если бы в качестве реперных элементов в поле зрения необходимо было наблюдать не эталонные точки, а некие ограничивающие линии – прямые и полуокружности, – то, конечно, использование на ДОЭ нескольких имеющих бинарную структуру унифицированных зон (сегментов), формирующих эти линии, было бы одним из вариантов решения нашей задачи. Однако нам необходимо формировать именно точки, а это требование приводит к вырождению оригинального технического решения, предложенного авторами работы [7].

Таким образом, появляется необходимость рассмотрения возможностей, предоставляемых многопорядковыми ДОЭ, фокусирующими в набор линий, расположенных в различных фокальных плоскостях вдоль оптической оси [8]. В частном случае вместо линий фокусаторы могут формировать и точки, а каждый из порядков микрорельефа фазового ДОЭ может обеспечивать формирование своей точки, которую и можно использовать в качестве эталонной. Однако в качестве одного из недостатков такого технического решения, как уже было указано выше, следует отметить исключительную технологическую сложность получения многоуровневого фазового микрорельефа ДОЭ.

Наконец, в качестве искомого ДОЭ с бинарной структурой рабочей поверхности следует отметить разработанный Н.Л. Казанским и Р.В. Скидановым бинарный расщепитель луча [9], созданный для решения поставленной нами задачи. Единственным принципиальным недостатком этого технического решения применительно к решению рассматриваемой задачи является следующее обстоятельство: для формирования достаточно ярких неразмытых опорных точек без паразитных засветок поля зрения фазовый ДОЭ в со-

ответствии с [9] должен иметь существенную площадь, и, следовательно, он будет занимать недопустимо большую часть обзорного окна прибора (на рис. 1 это окружность диаметром 20 мм). Минимальность площади, занимаемой дифрагирующими элементами ДОЭ, и их оптическая прозрачность (это достигается применением именно фазового, а не амплитудного транспаранта) – наипервейшее требование, предъявляемое к НГЭ оптического угломера, наблюдающего звёздное небо с космического летательного аппарата.

В связи с изложенным, наиболее эффективным способом решения проблемы создания НГЭ является применение ДОЭ, работающего на пропускание света и содержащего несколько дифракционных решёток – по одной на каждую формируемую точку (рис. 2).

Конструктивно рассматриваемый ДОЭ устроен следующим образом. Три дифракционные решётки, расположенные друг под другом по вертикали, содержат горизонтальные линии дифракционных решёток. При этом периоды дифракционных решёток различны и выбраны с таким расчётом, чтобы дифрагированные лучи пересеклись в одной точке в центре зрачка. Через эту же точку должны пройти и два дифрагированных луча, прошедших через две боковые дифракционные решётки ДОЭ. Это достигается наклонным, направленным навстречу друг другу расположением линий в этих дифракционных решётках.

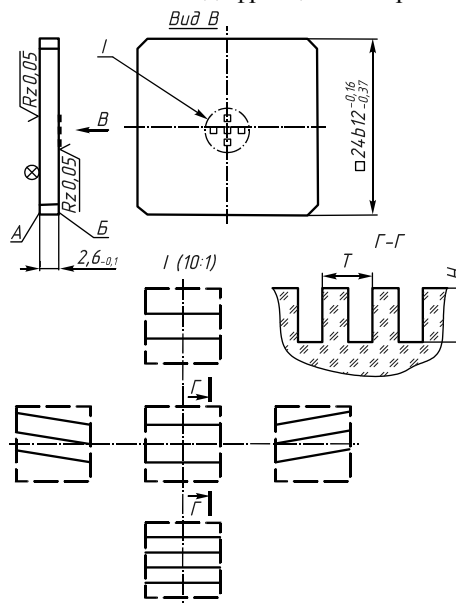


Рис.2. Конструкция ДОЭ

Как можно видеть из рассмотрения рис. 3, на котором представлен описанный ход лучей, создаваемый ДОЭ должен работать в ненулевом порядке спектра, т.е. его дифракционные решётки являются фактически пропускающими эшелеттами – фазовыми дифракционными решётками, обладающими способностью концентрировать дифрагированное излучение в спектре определённого (не нулевого) порядка.

В настоящее время известны лишь эшелетты, работающие на отражение, изготовленные нарезанием на поверхности металла специальными резцами треуголь-

ного микропрофиля, создающего дополнительную разность хода в пределах каждого периода решётки [10].

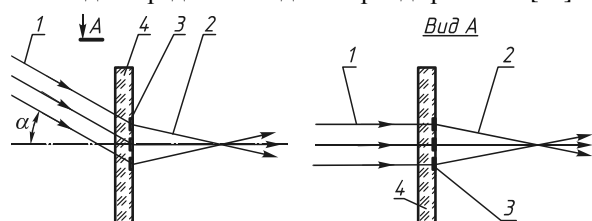


Рис. 3. Схема работы ДОЭ для формирования точечного эталонного изображения: 1 – падающие параллельные пучки; 2 – диффракционные пучки; 3 – диффракционная решётка; 4 – ДОЭ

Диффракционные решётки, изготавливаемые на оптическом стекле методом нарезания канавок микро-резцами, в действительности предусматривают нанесение на поверхность собственно стекла методами напыления в вакууме пластичных материалов, таких как алюминий, хром, титан и др., с последующей обработкой резцами в условиях, как правило, поверхностного пластического деформирования [11].

Известно применение станков с ЧПУ для изготовления диффракционных оптических элементов методами обработки резанием бескислородной меди [12]. Однако эти разработки могут быть применимы лишь к пластичным материалам – металлам или пластмассам (в том числе оптически прозрачным), поскольку обработка материалов резанием основана на удалении обрабатываемого материала в виде стружки, а сам процесс стружкообразования есть не что иное, как пластическое деформирование обрабатываемого материала в зоне резания. Хрупкие материалы, к которым относится и оптическое неорганическое стекло, не претерпевают пластической деформации – их обработка резанием сопровождается образованием так называемой стружки надлома – фактически микропорошка, частицы которого образовались диспергированием обрабатываемого материала за счёт пересечения микротрещин. Обработанная поверхность при этом обязательно матовая, что для рассматриваемого класса оптических деталей неприемлемо.

Конечно, ряд материалов, в том числе и стекло, в микрообъёмах проявляют свойство пластичности. Однако нарезание показанного на рис. 2 профиля резцами на поверхности детали из оптического неорганического стекла представляется нам невозможным по следующим причинам:

1) для стружкообразования необходимо, чтобы радиус закругления при главной режущей кромке (т.е. радиус между передней и главной задней поверхностями резца) был меньше, чем глубина резания. В нашем случае этот радиус не должен превышать величины порядка 0,1 мкм. Сама по себе заточка режущей части инструмента из алмаза до такой величины радиуса скругления проблематична. При нарезании же множества канавок диффракционной решётки в таком относительно твёрдом материале, как неорганическое стекло, неизбежен износ инструмента, проявляющийся в том числе в виде затупления

главной режущей кромки, что будет приводить к изменениям геометрических характеристик канавок и прекращению процесса стружкообразования;

2) для образования оптически прозрачной обработанной поверхности обрабатываемый материал должен удаляться в виде сливной стружки, а она образуется лишь при определённых режимах резания, в частности, при высокой скорости резания – $v > 100$ м/мин. Предположить, что на длине резания 1 мм будет обеспечена такая скорость резания, весьма затруднительно;

3) требуемые диффракционные решётки носят принципиально локализованный по отношению ко всей поверхности оптической детали характер. Поэтому резец, прежде чем формообразовать собственно канавки диффракционной решётки, должен быть вдавлен на глубину, обеспечивающую в дальнейшем процесс стружкообразования. Такая кинетика резания применительно к обработке неорганического стекла представляется нереализуемой;

4) можно было бы сформировать области необходимых нам диффракционных решёток в виде квадратных выступов размером 1×1 мм, удалив резанием излишки стекла по всей остальной поверхности детали. Однако это привело бы к недопустимому ухудшению качества поверхности, с которой снята стружка, относительно качества изначального полирования;

5) даже в случае, если удастся обработкой резанием с зональным удалением материала на глубину порядка 1 мкм обеспечить удовлетворительное качество обработанной оптически прозрачной, не дающей искажений поверхности (это вся поверхность ДОЭ, кроме участков диффракционных решёток), мы столкнёмся с проблемами прочности. Ширина канавки, а следовательно, и режущей части резца, составляет порядка 1 мкм. С учётом того обстоятельства, что неорганическое стекло – материал относительно твёрдый, формирующаяся сила резания будет такой, что даже природный алмаз шириной в 1 мкм не обеспечит прочности инструмента. Тем более не будет обеспечена прочность формирующих диффракционную решётку выступов шириной 1 мкм из неорганического стекла.

Изложенные причины дают основание утверждать, что создаваемый ДОЭ, который должен работать на пропускание, будучи изготовленным из неорганического оптического стекла нарезанием микро-рельефа на его рабочей поверхности, резцами получен быть не может.

Такие изделия микрооптики могут быть созданы на основе метода плазмохимического травления (ПХТ), о наличии опыта применения которого к стеклу и кварцу без уточнения деталей сообщается в работе [13]. Диффракционные решётки методом ПХТ создавались на поверхности монокристаллического кремния [14], а также алмазной плёнки [15]. Эти работы указывают на важность выбора материала маски и её толщины для обеспечения требуемых характеристик ДОЭ. Наиболее интересны для решения нашей задачи, особенность которой заключается в том, что в

качестве материала ДОЭ должно быть применено щелочное стекло, результаты исследований по ПХТ кварца, приведённые в работе [16].

С этой точки зрения весьма интересны результаты, полученные при напылении на кварц хрома на установке «Каролина Д-12А» с последующим ионно-реактивным травлением на установке УТП ПДЭ-125-009 «Интра» [17]. Кроме того, сообщается о применении установок «Оратория» и «Каролина 15» для ПХТ стекла [18]. Тем не менее объём имеющейся в этой области информации недостаточен для изготовления требуемого ДОЭ без предварительного конструкторско-технологического анализа.

Метод ПХТ обладает целым рядом достоинств, позволяющих формировать на обрабатываемой поверхности узкие (шириной менее 1 мкм) щели относительно большой (1–2 мкм) глубины. Для создания дифракционных решёток ДОЭ в соответствии с рис. 2, которые должны обеспечивать ход лучей в соответствии со схемой, представленной на рис. 3, фазовый микрорельеф должен в общем случае иметь сложную трёхмерную структуру. Существуют разработки, позволяющие аппроксимировать требуемый микрорельеф ступенчатым профилем, который создают последовательным проведением операций ПХТ через маски, формируемые набором фотошаблонов. Эти разработки применимы к ДОЭ, работающим как на отражение [19], так и на пропускание [20]. Особенность этого способа заключается в необходимости обеспечивать совмещение фотошаблонов – процедуры, реализованной в микроэлектронике применительно к полупроводниковым пластинам. Такие литографы не предусматривают возможности экспонировать фоторезист на стеклянных пластинах произвольного размера. Поэтому с уменьшением периода дифракционной решётки до величин менее 10 мкм совмещение фотошаблонов превращается в весьма труднопреодолимую проблему.

Выходом из этой ситуации могли бы стать нанотехнологические методы, основанные, например, на применении плазмонов [21, 22] для создания маски, толщина которой в каждой точке соответствовала бы требуемой глубине травления в этой точке для создания небинарного фазового микрорельефа. Однако эти методы к настоящему времени недостаточно проработаны для применения при изготовлении серийных изделий.

Поэтому для решения нашей задачи следует исходить из того, что методом ПХТ с практической точки зрения мы сможем сформировать лишь бинарный микрорельеф, т.е. дифракционные решётки будут иметь прямоугольный микропрофиль рабочей поверхности, не характерный для эшелетта.

2. Теоретическое обоснование

Можно утверждать, что при наклонном падении света на дифракционную решётку [24] бинарный прямоугольный микрорельеф фазовой решётки работает как рельеф, близкий к пилообразному, что позволяет создать эшелетт, изготовленный методом плазмохимического травления (рис. 4).

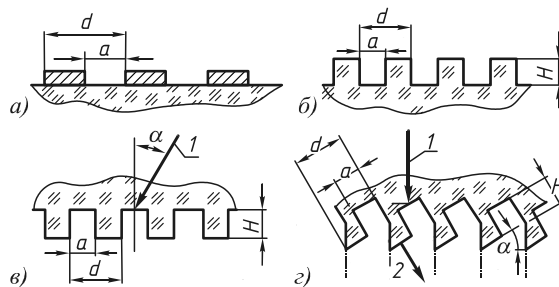


Рис. 4. Схема изготовления ДОЭ, работающего как пропускающий эшелетт (1 и 2 – падающий и дифрагированный лучи): создание маски (а); плазмохимическое травление (б); падение луча на фазовую решётку (в); эквивалентный эшелетт (г)

Известно [10], что для концентрации энергии излучения в заданном направлении необходимо выполнение двух условий, которые применительно к рассматриваемому случаю можно сформулировать следующим образом:

1) направление нулевого порядка от отдельного преломляющего элемента должно совпадать с направлением на максимум требуемого порядка от всей решётки;

2) направление на спектр нулевого порядка от всей решётки должно совпадать с направлением минимума при дифракции на отдельном преломляющем элементе.

Для анализа первого условия запишем уравнение дифракционной решётки

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

где d – период дифракционной решётки; α – угол падения; β – угол требуемого порядка дифракции; m – номер порядка; λ – длина волны.

Ограничимся рассмотрением падения луча на центральную дифракционную решётку ДОЭ (рис. 3). Здесь $\beta = 0$ (перпендикулярность к рабочей плоскости ДОЭ требуемого направления на дифракционный максимум). Для работы на втором порядке дифракции ($m = 2$) формула (1) запишется в виде:

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

Выражение (2) задаёт однозначную взаимосвязь между требуемым углом падения α и периодом дифракционной решётки. Так, для $\alpha = 30^\circ$ при длине волны $\lambda = 0,65$ мкм период дифракционной решётки должен составлять $d = 2,6$ мкм.

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

Относительная сила света в нулевом порядке дифракции I_0 в этом случае описывается выражением [25, 26]:

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

где ε – коэффициент асимметрии прямоугольной фазовой решётки, определяемый по формуле

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

n – показатель преломления стекла; H – глубина фазового микрорельефа прямоугольной формы.

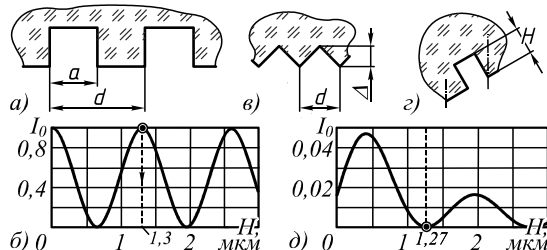


Рис. 5. Фазовые дифракционные решётки с прямоугольным (а), треугольным (б) и эквивалентным (в) профилем, а также соответствующие (б, г) относительные спектральные интенсивности нулевого порядка

На рис. 5б показан график зависимости $I_0(H)$ для $n=1,5$ и $\varepsilon=0$, из которого следует, что максимума относительной спектральной эффективности в нулевом порядке дифракции можно достичь при $H=1,3$ мкм. Таким образом, требуемую глубину H канавок прямоугольного профиля, формируемую методом плазмохимического травления (рис. 5г), следует определять по вытекающей из выражения (3) формуле:

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

Перейдём к рассмотрению второго условия для концентрации энергии эшелеттом, которое в данном случае сводится к тому, что в направлении луча 1 (рис. 4г) должен быть расположен минимум интенсивности излучения, дифрагированного отдельным элементом.

Подходящей моделью, представленной на рис. 4г эквивалентной схемы, является описание эшелетта фазовой дифракционной решёткой с треугольным профилем (рис. 5в). Сопоставляя рис. 5в с рис. 4г, можно считать, что глубина Δ треугольного рельефа такой фазовой решётки составляет:

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

Минимум относительной силы света для нулевого порядка дифракции на отдельном элементе профиля определяется из следующего выражения [25, 26]:

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

где Δ – глубина рельефа (рис. 5в), рассчитываемая по формуле (5).

На рис. 5д показан график зависимости $I_0(H)$ для $n=1,5$; $\lambda=0,65$ мкм; $\alpha=30^\circ$ и $d=3$ мкм, из которого так же, как и для предыдущего случая, видно, что минимум интенсивности излучения нулевого порядка

дифракции отдельного элемента профиля достигается при глубине травления (рис. 4в) $H=1,3$ мкм.

Совпадение требуемой глубины травления $H=1,3$ мкм как для максимизации интенсивности излучения в требуемом направлении дифракции (рис. 5б), так и для минимизации интенсивности излучения в направлении нулевого порядка для решётки в целом (рис. 5д), свидетельствует о том, что пропускающий свет эшелетт для работы во втором порядке дифракции может быть создан методом плазмохимического травления.

3. Экспериментальные исследования

В качестве оборудования для реализации процесса ПХТ применительно к изготовлению ДОЭ-ГОЭ была выбрана установка плазмохимического травления «Caroline 15 PE» [27, 28], которая применяется в микроэлектронике при производстве интегральных микросхем на кремниевых пластинах диаметром 200 мм. Профилографические исследования проводили на профилографе-профилометре «1500- α Kasaka laboratory» (Япония), а также на атомно-силовом микроскопе SolverPro-45.

При выборе этой установки в качестве оборудования для разработки технологии изготовления ДОЭ-ГОЭ из оптического стекла были приняты во внимание сообщения о положительных результатах её применения при изготовлении деталей из монокристаллического кварца [29], а также оптических деталей из кварцевого стекла, представляющего собой плавленый кварц [30–33]. Результаты наших предварительных экспериментальных исследований по применению установки «Caroline 15 PE» для ПХТ щелочного 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 [34]. Такой вариант изготовления ДОЭ-ГОЭ представляется эффективным, поскольку заготовки фотошаблонов для ИМС изготавливаются серийно, являются высокоточными по отклонениям от плоскостности и параллельности сторон, имеют высокое качество поверхностного слоя полированного стекла и характеризуются весьма высоким качеством нанесённого слоя хрома, который можно использовать в качестве материала маски при ПХТ. Отличительной особенностью нашей технологии по сравнению с описанными в литературе является применение именно щелочного стекла, которое имеет оптические характеристики, идентичные характеристикам стекла марки К8.

Разрабатываемые ДОЭ (см. рис. 2) были изготовлены в двух вариантах (рис. 6): с формированием дифракционных решёток в виде выступов (рис. 6а) или впадин (рис. 6б) относительно исходной поверхности стекла. Для обоих вариантов окончательно ДОЭ формировали травлением хромовой маски так, что вся поверхность ДОЭ (как на участках

дифракционных решёток, так и вне их) была оптически прозрачной.

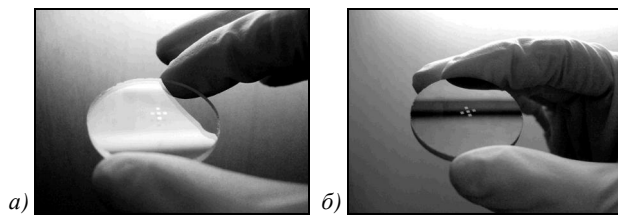


Рис. 6. ДОЭ, изготовленные маскированием: только дифракционных решёток (а) и поверхности вне дифракционных решёток (б)

Электронно-микроскопические фотографии соответствующих микрорельефов получаемых дифракционных решёток и соответствующие им профили, полученные на атомно-силовом микроскопе, приведены на рис. 7.

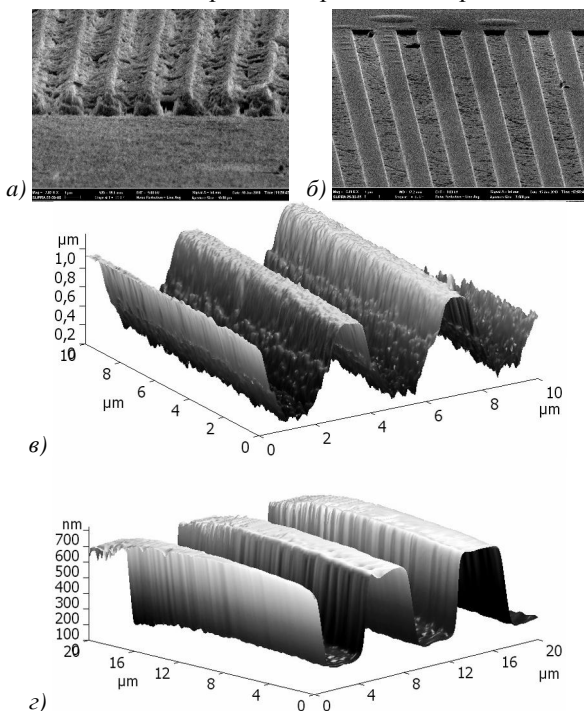


Рис. 7. Электронно-микроскопические фотографии (а, б) и измеренные на атомно-силовом микроскопе профили (в, г) дифракционных решёток в виде выступов (а, в) и впадин (б, г) на рабочей поверхности ДОЭ

Соответствие полученных эксплуатационных характеристик изготовленных ДОЭ требуемым техническим характеристикам разрабатываемого прибора иллюстрируется на рис. 8, где показано достигнутое расположение дифрагированных точек во втором порядке дифракции в поле зрения оптического прибора. Здесь приведены две окружности. Внутренняя окружность соответствует требуемым углам наклона пучков по горизонтали и вертикали после прохождения зрачка прибора (рис. 1). Внешняя окружность соответствует полному полю зрения, т.е. в пределы этой окружности не должны попадать какие-либо лишние пучки: можно видеть, что наиболее опасный пучок от первого порядка дифракции находится вне поля зрения.

Практическое применение операции плазмохимического травления обусловлено необходимостью из-

готавливать именно фазовые дифракционные решётки, которые, в отличие от обычных (амплитудных) дифракционных решёток, обеспечивают повышенную дифракционную эффективность. Для амплитудных дифракционных решёток дифракционная эффективность уменьшается в наибольшей степени при переходе ко второму и более высоким порядкам дифракции. А именно второй порядок дифракции был выбран нами в качестве рабочего, что было обусловлено следующим обстоятельством.

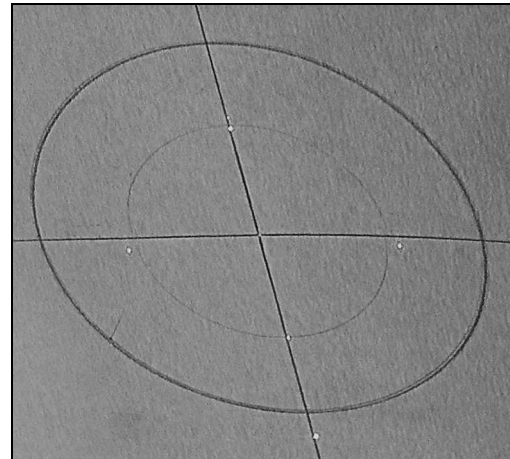


Рис. 8. Расположение дифрагированных точек во втором порядке дифракции пяти дифракционных решёток ДОЭ

Согласно техническим требованиям, предъявляемым к оптическому прибору в целом, необходимо было минимизировать расстояние от ДОЭ до наружной границы прибора (это размер «30» на рис. 1). Конечно, лучше всего в этом случае подошёл бы 1-й порядок дифракции, однако расчётные периоды дифракционных решёток в этом случае должны были иметь величины $d \approx 0,7$ мкм. Мы исходили из того, что получить такие малые периоды ДР без применения нанотехнологических методов или технологических плазмонов не представляется возможным. С другой стороны, применение 3-го порядка дифракции привело бы к загромождению зеркалом (поз. 3 на рис. 1) части поля зрения. Поэтому второй порядок дифракции и был выбран в качестве рабочего, а соответствующие периоды дифракционных решёток $d = 2,0; 2,5; 3,0$ мкм были технологически обеспечены применением при изготовлении маски метода электронно-лучевой литографии.

Следовательно, наиболее актуальным является вопрос экспериментального определения оптимальной глубины канавок дифракционных решёток, обеспечивающей максимальность энергии во втором порядке дифракции. Экспериментальные исследования дифракционной эффективности дифракционных решёток ДОЭ с различной глубиной канавок, изготовленных с применением метода ПХТ, производили на специально созданном оптическом стенде. При помощи специального измерительного прибора измеряли интенсивности пучков 0-го, 1-го, 2-го, 3-го и -1-го («минус первого») порядков дифракции при наклонном падении света.

В качестве источника излучения станда использовали ПП-лазер с длиной волны излучения $\lambda = 0,65$ мкм. Излучение коллимировали объективом так, что расходимость коллимированного излучения при диаметре пучка 5 мм не превышала 1 угловой минуты. Неравномерность плотности излучения находилась в пределах 10%. Из коллимированного излучения с помощью диафрагмы вырезали пучок диаметром 0,8 мм, который затем направляли на исследуемую дифракционную решётку ДОЭ. При измерениях дифракционной эффективности элементов ДОЭ во 2-м рабочем порядке дифракции исследуемый ДОЭ располагали под углом $\alpha = 32^\circ$ по отношению к падающему пучку лазерного излучения. Интенсивность падающего на элемент излучения I_0 и дифрагированного излучения 2-го порядка I_2 измеряли с помощью теплового измерителя мощности "Ophir".

Полученные зависимости дифракционной эффективности как доли интенсивности пучка 2-го порядка дифракции в общей интенсивности света, прошедшего через ДОЭ, от глубины канавок дифракционной решётки с различными периодами d представлены на рис. 9, из рассмотрения которого видно, что частичная доля второго порядка дифракции может достигать и даже превышать 30%.

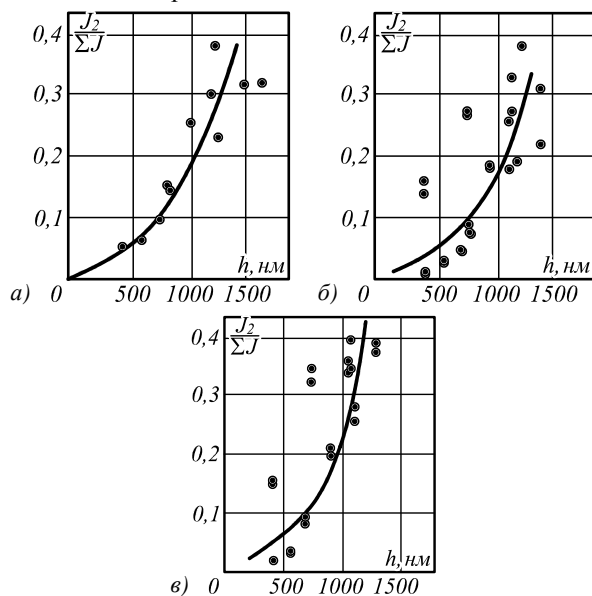


Рис. 9. Зависимости отношения интенсивности света пучка 2-го порядка дифракции I_2 к сумме интенсивностей пучков 0-го, 1-го, 2-го, 3-го и -1-го порядков дифракции от глубины h канавок дифракционных решёток периодом $d = 2$ мкм (а); $d = 2,5$ мкм (б) и $d = 3$ мкм (в)

Как известно, дифракционная эффективность амплитудной дифракционной решётки во втором порядке дифракции не превышает 1,7%, поэтому полученные величины дифракционной эффективности в 30-35% для второго порядка дифракции свидетельствуют о существенном повышении эффективности оптической системы за счёт создания именно фазовых дифракционных решёток.

Концентрация энергии светового пучка именно во 2-м порядке дифракции иллюстрируется графиками,

представленными на рис. 10, из рассмотрения которого видно, что отношения интенсивностей света во втором и первом порядках дифракции могут достигать единицы. Можно создать специально рассчитанный преломляющий оптический элемент, повышающий дифракционную эффективность за счёт дополнительного френелевского пропускания при наклонном падении лучей [35]. Однако вряд ли преломляющая поверхность такого оптического элемента окажется бинарной, т.е. технологичной для её получения методом ПХТ.

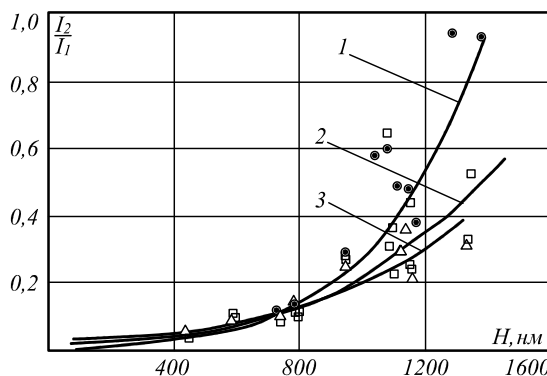


Рис. 10. Зависимости отношений интенсивностей света во втором (I_2) и первом (I_1) порядках дифракции от глубины канавок дифракционных решёток с периодами $d = 2$ мкм (а); $d = 2,5$ мкм (б) и $d = 3$ мкм (в)

Установленные эмпирически зависимости, представленные графиками на рис. 9 и 10, указывают также на то, что для повышения дифракционной эффективности фазовых дифракционных решёток глубину канавок следует по возможности увеличивать.

Моделирование работы разрабатываемого ДОЭ с использованием стандартных пакетов не производили, поскольку, как указывают специалисты, геометрическое приближение (например, реализованное в коммерческом программном пакете TracePro) для моделирования формирования изображения нецелесообразно, поскольку применяемые нами плоскопараллельные участки не изменяют ход лучей [36].

4. Обсуждение результатов экспериментальных исследований

Повышение дифракционной эффективности фазовых дифракционных решёток во 2-м порядке дифракции с увеличением глубины канавок дифракционной решётки (рис. 9) можно объяснить уменьшением относительной интенсивности излучения для нулевого порядка дифракции [25]. В общем случае, в соответствии с теорией дифракции света на фазовых дифракционных решётках 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 решётки отличается от идеально прямоугольной, поскольку на краях выступов формируются радиусы скруглений, а стенки мик-

порельефа не вертикальны, а наклонены под углом до 30° к вертикали.

Таким образом, номинально прямоугольная форма микрорельефа фазовых дифракционных решёток на практике приближается к треугольной, а для такой формы микрорельефа в соответствии с теорией дифракции [25, 26] относительная спектральная интенсивность нулевого порядка дифракции с увеличением глубины канавок дифракционной решётки, изменяясь волнообразно, тем не менее, стремится к нулю. Поэтому для повышения дифракционной эффективности фазовых дифракционных решёток глубину канавок следует по возможности увеличивать.

Максимально достигаемая при ПХТ глубина канавок дифракционной решётки определяется главным образом селективностью травления оптического стекла относительно материала маски. Оптимальность (т.е. максимизация) этого целевого параметра (селективности травления) должна быть обеспечена на основе проведения экспериментальных исследований технологического характера.

Заключение

Создан работающий во втором порядке дифракции дифракционный оптический элемент, обеспечивающий при наклонном падении света формирование изображения в виде пяти точек, расположенных крестообразно, при помощи пяти дифракционных решёток, отличающихся периодами (2,0 мкм, 2,5 мкм и 3,0 мкм) и углами наклона (0° и $\pm 12^\circ$). При этом обеспечивается отсутствие в поле зрения прибора других точек, соответствующих другим порядкам дифракции.

Установлено, что с увеличением глубины канавок от 0 до 1,5 мкм дифракционная эффективность фазовой дифракционной решётки, изготовленной методом плазмохимического травления, во втором порядке дифракции при наклонном падении света возрастает монотонно и может достигать 30% – для повышения дифракционной эффективности следует добиваться максимально возможной глубины канавок дифракционной решётки в указанном диапазоне.

Благодарности

Исследование выполнено при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации: соглашение 14.В37.21.0739 «Разработка и исследование малогабаритных оптических систем с голограммными оптическими элементами для отображения информации на дисплеях и индикаторах»; соглашение 14.В37.21.1279 «Исследование и разработка технологии создания нового поколения миниатюрной оптико-голографической памяти на основе компьютерно-синтезированных микроголограмм»; соглашение № 14.132.21.1675 «Разработка методов получения и исследование параметров голограммных оптических элементов с наноструктурированным поверхностным рельефом для оптико-электронных приборов и систем».

Литература

1. **Колосов, М.П.** О роли положения зрачков в нерасстраиваемых оптических системах угломеров с каналом геометрического эталона / М.П. Колосов, А.Я. Гебгарт, А.Ю. Карелин. – Оптический журнал. – 2012. – Т. 79, № 2. – С. 48-53.
2. **Гебгарт, А.Я.** Нерасстраиваемые оптические системы угломеров с неподвижной линией визирования / А.Я. Гебгарт, М.П. Колосов // Оптический журнал. – 2010. – Т. 77, № 10. – С. 48-53.
3. **Гебгарт, А.Я.** Углоизмерительный прибор / А.Я. Гебгарт, М.П. Колосов – Патент РФ № 2470258. – Бюл. № 35 от 20.12.2012.
4. **Федосеев, В.И.** Оптико-электронные приборы ориентации и навигации космических аппаратов / В.И. Федосеев, М.П. Колосов. – М.: Логос, 2007. – 247 с.
5. **Golub, M.A.** Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39, N 6. – P. 1245-1251.
6. **Sedukhin, A.G.** High-efficiency multiple imaging in three-dimensional space // Optics Communications. – 2004. – Vol. 236, N 1-3. – P. 21-31.
7. **Doskolovich, L.L.** Focusators for laser-branding / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, G.V. Usplenjev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15, N 5. – P. 311-322.
8. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33, N 11. – P. 3610-3615.
9. **Kazanskiy, N.L.** Binary beam splitter / N.L. Kazanskiy, R.V. Skidanov // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51, N 14. – P. 2672-2677.
10. **Мальшев, В.И.** О методах использования дифракционных решёток-эшелетт в космической ИК-спектрометрии (Обзор литературы и рекомендации). – М.: Изд-во ФИАН, 1993. – 52 с.
11. **Баяльники, Н.М.** Способ изготовления вогнутых дифракционных решёток со ступенчатым профилем штрихов / Н.М. Баяльники, Я.К. Лукашевич, А.А. Варфоломеев и Ю.П. Стрельников – Патент РФ № 1799161. – 10.05.1995.
12. **Абульханов, С.Р.** Методы изготовления элементов дифракционной оптики резанием на станках с ЧПУ / С.Р. Абульханов, Н.Л. Казанский, Л.Л. Досколович, О.Ю. Казакова // СТИН. – 2011. – № 9. – С. 22-27.
13. **Волков, А.В.** Формирование микрорельефа ДОЭ с использованием халькогенидных стеклообразных полупроводников / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Г.Ф. Костюк, С.А. Костюкевич, П.Е. Шепелявый // Компьютерная оптика. – 1999. – № 19. – С. 129-131.
14. **Волков, А.В.** Разработка технологии получения дифракционного оптического элемента с субмикронными размерами рельефа в кремниевой пластине / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. – 1998. – № 18. – С. 130-133.
15. **Pavelyev, V.S.** Formation of diffractive microrelief on diamond film surface / V.S. Pavelyev, S.A. Borodin, N.L. Kazanskiy, G.F. Kostyuk, A.V. Volkov // Optics & Laser Technology. – 2007. – Vol. 39, N 6. – P. 1234-1238.
16. **Казанский, Н.Л.** Исследование особенностей процесса анизотропного травления диоксида кремния в плазме газового разряда высоковольтного типа / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков, А.И. Колпаков // Микроэлектроника. – 2004. – Том 33, № 3. – С. 209-224.
17. **Казанский, Н.Л.** Формирование оптического микрорельефа во внекатодной плазме высоковольтного газо-

- вого разряда / Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков. – М.: Радио и связь, 2009. – С. 220.
18. **Нестеренко, Д.В.** Создание криволинейных дифракционных решёток для ультрафиолетового диапазона / Д.В. Нестеренко, С.Д. Полетаев, О.Ю. Моисеев, Д.М. Якуненкова, А.В. Волков, Р.В. Скиданов // Известия Самарского научного центра РАН. – 2011. – Том 13, № 4-1. – С. 66-71.
 19. **Казанский, Н.Л.** Исследовательско-технологический центр дифракционной оптики / Н.Л. Казанский // Известия Самарского научного центра РАН, 2011. – Том 13, № 4-1. – С. 54-62.
 20. **Golub, M.A.** The technology of fabricating focusators of infrared laser radiation / M.A. Golub, O.E. Rybakov, G.V. Usplenjev, A.V. Volkov, S.G. Volotovskiy // Optics and Laser Technology. – 1995. – Vol. 27, N 4. – P. 215-218.
 21. **Волков, А.В.** Исследование технологии плазменного травления для получения многоуровневых дифракционных оптических элементов / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, О.Е. Рыбаков // Компьютерная оптика. – 1998. – № 18. – С. 127-130.
 22. **Bezus, E.A.** Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Micro-electronic Engineering. – 2011. – Vol. 88, N 2. – P. 170-174.
 23. **Безус, Е.А.** Формирование интерференционных картин затухающих электромагнитных волн для наноразмерной литографии с помощью волноводных дифракционных решёток / Е.А. Безус, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский // Квантовая электроника. – 2011. – Том 41, № 8. – С. 759-764.
 24. **Ландсберг, Г.С.** Элементарный учебник физики. Т.3. Колебания и волны. Оптика. Атомная и ядерная физика. / Г.С. Ландсберг. – М.: Наука, 1985. – 656 с.
 25. **Рожков, О.В.** Воспроизведение цветокодированной фазооптической записи в системах отображения информации / О.В. Рожков, Л.Н. Тимашова // Труды МВТУ им. Н.Э. Баумана. – 1979. – № 309. – С. 21-36.
 26. **Кноп, К.** Color Pictures Using the Zero Diffraction Order of Phase Grating Structures / К. Кноп // Optics Communication. – 1976. – V. 18, N 3. – P. 298-303.
 27. **Берлин, Е.В.** Реактивное ионно-плазменное травление и осаждение: установка «Каролина-15» / Е.В. Берлин, С.А. Двинин, Н.И. Морозовский, Л.А. Сейдман // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – № 8. – С. 78-80.
 28. **Берлин, Е.В.** Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких плёнок / Е.В. Берлин, С.А. Двинин, Л.А. Сейдман. – М.: Техносфера, 2007. – С. 165-169.
 29. **Берлин, Е.В.** Ионно-плазменные процессы в тонкопленочной технологии / Е.В. Берлин, Л.А. Сейдман. – М.: Техносфера, 2010. – 544 с.
 30. **Голуб, М.А.** Фокусаторы лазерного излучения ближнего ИК-диапазона / М.А. Голуб, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, И.В. Климов, В.А. Сойфер, Г.В. Успенев, В.Б. Цветков, И.А. Щербаков // Письма в ЖТФ. – 1992. – Т. 18, № 15. – С. 39-41.
 31. **Волков, А.В.** Изготовление и экспериментальное исследование фокусаторов в кольцо и в две точки / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, Г.В. Успенев // Компьютерная оптика. – 1999. – № 19. – С. 132-136.
 32. **Волков, А.В.** Создание и исследование бинарных фокусаторов для мощного ND-YAG лазера / А.В. Волков, Л.Л. Досколович, Н.Л. Казанский, Г.В. Успенев, А. Занелли // Компьютерная оптика. – 2000. – № 20. – С. 84-89.
 33. **Волков, А.В.** Расчёт скорости плазмохимического травления кварца / А.В. Волков, Н.Л. Казанский, В.А. Колпаков // Компьютерная оптика. – 2001. – № 21. – С. 121-125.
 34. **Одинокоев, С.Б.** Технология изготовления дифракционных и голограммных оптических элементов с функциональным микрорельефом поверхности методом плазмохимического травления / С.Б. Одинокоев, Г.Р. Сагателян // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. – 2010. – № 2. – С. 92-104.
 35. **Досколович, Л.Л.** Расчет радиально-симметричных преломляющих поверхностей с учётом френелевских потерь / Л.Л. Досколович, М.А. Моисеев // Компьютерная оптика. – 2008. – Том 32, № 2. – С. 201-203.
 36. **Налимов, А.Г.** Моделирование формирования изображения зонной пластинкой в рентгеновском излучении / А.Г. Налимов, В.В. Котляр, В.А. Сойфер. – Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 3. – С. 290-296.

References

1. **Koloso, M.P.** On the role of the position of the pupils in the nonmisadjustable optical systems of goniometers with a geometrical-reference channel / M.P. Kolosov, A.Ya. Gebgart, A.Yu. Karelin // Journal of Optical Technology. – 2012. – Vol. 79, N 2. – P. 95-98.
2. **Gebgart, A.Ya.** Nonmisadjustable optical systems of goniometers with a fixed line of sight / A.Ya. Gebgart, M.P. Kolosov // Journal of Optical Technology. – 2010. – Vol. 77, N 10. – P. 628-632.
3. **Gebgart, A.Y.** The goniometer / A.Y. Gebgart, M.P. Kolosov. – Rus. Patent N 2470258. – Bul. N 35 on 20.12.2012. – (In Russian).
4. **Fedoseev, V.I.** Optical-electronic Devices of Orientation and Navigation of Space Vehicles / V.I. Fedoseev, M.P. Kolosov. – Moscow: "Logos" Publisher, 2007. – 247 p. – (In Russian).
5. **Golub, M.A.** Computer generated diffractive multi-focal lens / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, V.A. Soifer // Journal of Modern Optics. – 1992. – Vol. 39, N 6. – P. 1245-1251.
6. **Sedukhin, A.G.** High-efficiency multiple imaging in three-dimensional space // Optics Communications. – 2004. – Vol. 236, N 1-3. – P. 21-31.
7. **Doskolovich, L.L.** Focusators for laser-branding / L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, S.I. Kharitonov, G.V. Usplenjev // Optics and Lasers in Engineering. – 1991. – Vol. 15, N 5. – P. 311-322.
8. **Soifer, V.A.** Multifocal diffractive elements / V.A. Soifer, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Optical Engineering. – 1994. – Vol. 33, N 11. – P. 3610-3615.
9. **Kazanskiy, N.L.** Binary beam splitter / N.L. Kazanskiy, R.V. Skidanov // Applied Optics. – 2012. – Vol. 51, N 14. – P. 2672-2677.
10. **Malishev, V.I.** About the Methods of Using of Diffraction Echelett Gratings in the Space IR-Spectrometry (The Overview of Literature and Recommendations) / V.I. Malishev. – Moscow: "FIAN" Publisher, 1993. – 52 p. – (In Russian).
11. **Balyasnikov, N.M.** The Method of Manufacturing of Concave Diffraction Gratings with a Stepped Profile Strokes / N.M. Balyasnikov, Y.K. Lucashevich, A.A. Varfolomejev and Y.P. Strelnikov. – Rus. Patent N 1799161. – 10.05.1995. – (In Russian).
12. **Abul'khanov, S.R.** Manufacture of diffractive optical elements by cutting on numerically controlled machine tools / S.R. Abul'khanov, N.L. Kazanskiy, L.L. Doskolovich, O.Y. Kazakova // Russian Engineering Research. – 2011. – Vol. 31, N 12. – P. 1268-1272.
13. **Volkov, A.V.** The Forming of Micro-relief of DOE with the use of Chalkogenid Vitreous Semiconductors / A.V. Volkov,

- N.L. Kazanskiy, G.F. Kostyuk, S.A. Kostyukevich // Computer Optics. – 2008. – V. 32, N 1. – P. 39-42. – (In Russian).
14. **Volkov, A.V.** The Development of Technology of Making the Diffractive Optical Element with Submicron Sizes of Relief on a Silicon Wafer / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.E. Ribakov // Computer optics. – 1998. – N 18. – P. 130-133. – (In Russian).
 15. **Pavelyev, V.S.** Formation of diffractive microrelief on diamond film surface / V.S. Pavelyev, S.A. Borodin, N.L. Kazanskiy, G.F. Kostyuk, A.V. Volkov // Optics & Laser Technology. – 2007. – Vol. 39, N 6. – P. 1234-1238.
 16. **Kazanskiy, N.L.** Anisotropic Etching of SiO₂ in High-Voltage Gas-Discharge Plasmas / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov, A.I. Kolpakov // Russian Microelectronics. – 2004. – Vol. 3, N 3. – P. 169-182.
 17. **Kazanskiy, N.L.** The Formation of Optical Microrelief in the out-of-cathode High-Voltage Gas-Discharge Plasma / N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov. – Moscow: "Radio I sviaz" Publisher, 2009. – 220 p. – (In Russian).
 18. **Nesterenko, D.V.** Creating a Curvilinear Diffraction Gratings for Ultraviolet Range / D.V. Nesterenko, S.D. Poletayev, O.Y. Moiseev, D.M. Yakunenkova, A.V. Volkov, R.V. Skidanov // Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Centra Rossijskoy Akademii Nauk. – 2011. – Vol. 13, N 4-1. – P. 66-71. – (In Russian).
 19. **Kazanskiy, N.L.** Research and Technological Center of Diffractive Optics / N.L. Kazanskiy // Izvestiya Samarskogo Nauchnogo Centra RAN. – 2011. – Vol. 13, N 4-1. – P. 54-62. – (In Russian).
 20. **Golub, M.A.** The Technology of Fabricating Focusators of Infrared Laser Radiation / M.A. Golub, O.E. Rybakov, G.V. Usplenjev, A.V. Volkov, S.G. Volotovskiy // Optics and Laser Technology. – 1995. – Vol. 27, N 4. – P. 215-218.
 21. **Volkov, A.V.** The Study of the Plasma Etching Technology to Obtain Layered Diffractive Optical Elements / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, O.E. Rybakov // Computer Optics. – 1998. – N 18. – P. 127-130. – (In Russian).
 22. **Bezus, E.A.** Evanescent-wave interferometric nanoscale photolithography using guided-mode resonant gratings / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Microelectronic Engineering. – 2011. – Vol. 88, N 2. – P. 170-174.
 23. **Bezus, E.A.** Interference pattern formation in evanescent electromagnetic waves using waveguide diffraction gratings / E.A. Bezus, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy // Quantum Electronics. – 2011. – Vol. 41, N 8. – P. 759-764. – (In Russian).
 24. **Landsberg, G.S.** Elementary physics. V. 3. Oscillations and waves. Optics. Atomic and nuclear physics / G.E. Landsberg. – Moscow: "Nauka" Publisher, 1985. – 656 p. – (In Russian).
 25. **Rozhkov, O.V.** The Reproduction of Color-coded Phase-optical Record in the Information Displaying Systems / O.V. Rozhkov, L.N. Timoshova // Trudi MVTU im. N.E. Bauman. – 1979. – N 309. – P. 21-36. – (In Russian).
 26. **Knop, K.** Color Pictures Using the Zero Diffraction Order of Phase Grating Structures / K. Knop // Optics Communication. – 1976. – V. 18, N 3. – P. 298-303.
 27. **Berlin, E.V.** Reactive Ion-plasma Etching and Deposition: The Caroline 15 apparatus / E.V. Berlin, S.A. Dvinnin, N.I. Morozovskiy, L.A. Sademan // Electronica: Science, Technology, Business. – 2005. – N 8. – P. 78-80. – (In Russian).
 28. **Berlin, E.V.** Vacuum Technology and the Equipment to Deposition and Etching Thin Films / E.V. Berlin, S.A. Dvinnin, L.A. Sademan. – Moscow: "Technosphera" Publisher, 2007. – P. 165-169. – (In Russian).
 29. **Berlin, E.V.** Ion-plasma Processes in Thin-film Technology / E.V. Berlin, L.A. Sademan. – Moscow: "Technosphera" Publisher, 2010. – 544 p. – (In Russian).
 30. **Golub, M.A.** Focusers of near-infrared laser radiation / M.A. Golub, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, I.V. Klimov, V.A. Soifer, G.V. Usplenjev, V.B. Tsvetkov, I.A. Scherbakov // Technical Physics Letters. – 1992. – Vol. 18, N 15. – P. 39-41. – (In Russian).
 31. **Volkov, A.V.** Fabrication and Experimental Study of Focusing Devices in the Ring and the Two Points / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, G.V. Usplenjev // Computer Optics. – 1999. – N 19. – P. 132-136. – (In Russian).
 32. **Volkov, A.V.** Creation and Study of Binary Focusing Devices for a Powerful ND-YAG Laser / A.V. Volkov, L.L. Doskolovich, N.L. Kazanskiy, G.V. Usplenjev, A. Zanelly // Computer Optics. – 2000. – N 20. – P. 84-89. – (In Russian).
 33. **Volkov, A.V.** Calculation of the Velocity of Plasma-Chemical Etching of Quartz / A.V. Volkov, N.L. Kazanskiy, V.A. Kolpakov // Computer Optics. – 2001. – N 21. – P. 121-125. – (In Russian).
 34. **Odinokov, S.B.** Technology of Manufacturing of Diffraction and Hologram Optical Parts with Functional Microrelief of Surface by Method of Plasmochemical Etching / S.B. Odinokov, G.R. Sagatelyan // Vestnik MGTU. Priborostroenie. – 2010. – N 2. – P. 92-104. – (In Russian).
 35. **Doskolovich, L.L.** The calculation of the Radial-Symmetric Refractive Surfaces with Consideration of Fresnel Losses / L.L. Doskolovich, M.A. Moiseev // Computer Optics. – 2008. – Vol. 32, N 2. – P. 201-203. – (In Russian).
 36. **Nalimov, A.G.** The Simulation of Formation of an Image by the Zone Plate on X-Ray Radiation / A.G. Nalimov, V.V. Kotlyar, V.A. Soifer – Computer Optics. – 2011. – Vol. 35, N 3. – P. 290-296. – (In Russian).

CREATION OF DOE TO FORM THE CALIBRATION DOT PATTERNS INSIDE THE OPTICAL SYSTEMS

*S.B. Odinokov, G.R. Sagatelyan, M.S. Kovalyov, A.B. Solomashenko, E.A. Drozdova
Bauman Moscow State Technical University*

Abstract

The possibility of formation of the image in the form of five cross-located points by means of diffraction optical elements (DOE), containing five phase diffraction gratings with rectangular profile, which are working in the second order of diffraction at tilted incidence of the light, occupying total not more than 1% of the area of the DOE. The possibilities of manufacturing a DOE using the "Caroline 15 PE" plasma-chemical etching (PCE) machine are considered. It is established, that on the up to 1,4 μm deepness of surface micro-relief on optical glass and tilted incidence of light, the diffraction efficiency of DOE up to 0,3–0,35 on the second order of diffraction is achieved.

Key words: optical glass, binary micro-relief, tilted incidence of light, deepness of grooves, phase diffraction gratings, plasma-chemical etching, diffraction efficiency.

Сведения об авторах

Одинокоев Сергей Борисович, 1950 года рождения, в 1973 году окончил Московское высшее техническое училище им. Н.Э. Баумана (МВТУ, ныне Московский государственный технический университет – МГТУ им. Н.Э. Баумана) по специальности «Оптико-электронные приборы». Доктор технических наук (2011 год), профессор, работает в должности профессора кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области оптико-голографических систем.

E-mail: odinokov@bmstu.ru.

Sergey Borisovich Odinokov (b. 1950) graduated (1973) from the Moscow Higher Technical School (presently, Bauman named Moscow State Technical University) majoring in optoelectronic devices. He received his Doctor of technical Sciences (2011) degree from Bauman Moscow State University. Occupies the position of professor of “Laser and optoelectronic systems” department of BMSTU. Current research interests include the optical holographic systems.



Сагатеян Гайк Рафаэлович, 1953 года рождения, в 1975 году с отличием окончил Ереванский политехнический институт (ЕрПИ, ныне Государственный инженерный университет Армении – ГИУА) по специальности «Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты». Доктор технических наук (2000 год), профессор, работает в должности профессора кафедры технологий приборостроения МГТУ им. Н.Э. Баумана. Специалист в области технологий изготовления прецизионных изделий приборостроения.

E-mail: h_sagatelyan@mail.ru.

Gaik Rafaelovich Sagatelyan (b. 1953) graduated with honours (1975) from the Yerevan Polytechnic Institute (presently, State Engineering University of Armenia) majoring in manufacturing engineering. He received his Doctor of technical Sciences (2000) degree from Bauman Moscow State University. Occupies the position of professor of “Instrument-making technology” department of BMSTU. Current research interests include the technology of manufacturing of precision items of instrument-making industry.



Ковалёв Михаил Сергеевич 1986 года рождения, окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2009 г. с присуждением квалификации инженера по специальности «Оптико-электронные приборы и системы». Аспирант кафедры лазерных и оптико-электронных систем. Область научных интересов – оптико-электронные приборы и голографические системы.

Mikhail Sergeevich Kovalyov (b. 1986), graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2009 with qualification of engineer on “Optoelectronic devices and systems”. Post graduate on the “Laser and optical-electronic systems” department of Bauman MSTU. Current research interests include the optical and electronic instruments and holographic systems.



Соломашенко Артем Борисович 1987 года рождения, окончил МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2010 г. с присуждением квалификации инженера по специальности «Оптико-электронные приборы и системы». Аспирант кафедры лазерных и оптико-электронных систем. Область научных интересов – оптико-электронные приборы и голографические системы.

Artem Borisovich Solomashenko (b. 1987), graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2010 with qualification of engineer on “Optoelectronic devices and systems”. Post graduate on the “Laser and optical-electronic systems” department of Bauman MSTU. Current research interests include the optical and electronic instruments and holographic systems.



Дроздова Екатерина Андреевна 1987 года рождения, окончила Санкт-Петербургский государственный университет кино и телевидения в 2010 г. с присуждением квалификации инженера по специальности «Технология кинофотоматериалов и магнитных носителей». Магистр кафедры лазерных и оптико-электронных систем МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Ekaterina Andreevna Drozdova (b. 1987), graduated from the St. Peterburg State University of cinema and television in 2010. Engineer "Technology kinofotomaterialov and magnetic media." Magister at “Laser and optical-electronic systems” department of Bauman MSTU.

Поступила в редакцию 22 марта 2013 г.