

Н. И. Гусарова, Д. С. Лушников,
В. В. Маркин, С. Б. Одинокоев,
В. В. Поздняков

ГОЛОГРАММНЫЕ ЗЕРКАЛА ОКУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ ОЧКОВ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

Рассмотрены вопросы, связанные с изготовлением плоского и сферического голограммных зеркал на основе слоя бихромированного желатина, предназначенных для работы в составе окулярной системы очков ночного видения. Предложены метод записи голограммных зеркал, принципы расчета параметров оптической схемы установки для их записи. Приведены технология изготовления и результаты работ по изготовлению голограммных зеркал.

E-mail: nat_gusar@mail.ru; dmlu41@yandex.ru;
vmark.39@mail.ru; odinokov@rl2.bmstu.ru
vadim_pozdnyakov@mail.ru

Ключевые слова: голограммные оптические элементы, голограммные зеркала, бихромированный желатин.

Выбор зеркал как голограммных оптических элементов и требования к ним определяются условиями работы зеркал в составе окулярной системы ночных очков “сквозного” видения (ОНВ). В таких очках обеспечивается одновременное наблюдение как ночной сцены через ночной канал, так и прямое наблюдение той же сцены в видимой области спектра, минуя ночной канал [1, 2]. Это позволяет повысить поисковые возможности, обеспечить более комфортные условия работы в ночных очках, а также сохранить работоспособность в присутствии интенсивных световых помех, в том числе света фар встречного транспорта при управлении транспортным средством. Кроме того, при управлении транспортным средством в ночных условиях реализуется одновременное наблюдение внекабинного пространства через ночной канал и прямое наблюдение внутреннего пространства кабины и пульта управления со светящимися индикаторами.

Изображение на фотокатоде электронно-оптического преобразователя (ЭОП), сформированное объективом ночного канала ОНВ, после преобразования по яркости и спектру рассматривается с экрана ЭОП через оптическую систему с промежуточным изображением [3], включающую в себя проекционную часть и собственно окулярную систему. Элементы окулярной системы для ночного канала и канала прямого видения являются общими, что позволяет наблюдать изображение на экране ЭОП и одновременно вести прямое наблюдение. В данном случае окулярная система строится на основе использования двух оптических элементов: плоского (1) и сферического (2) полупрозрачных зеркал (рис. 1). Прямое наблюдение осуществляется при

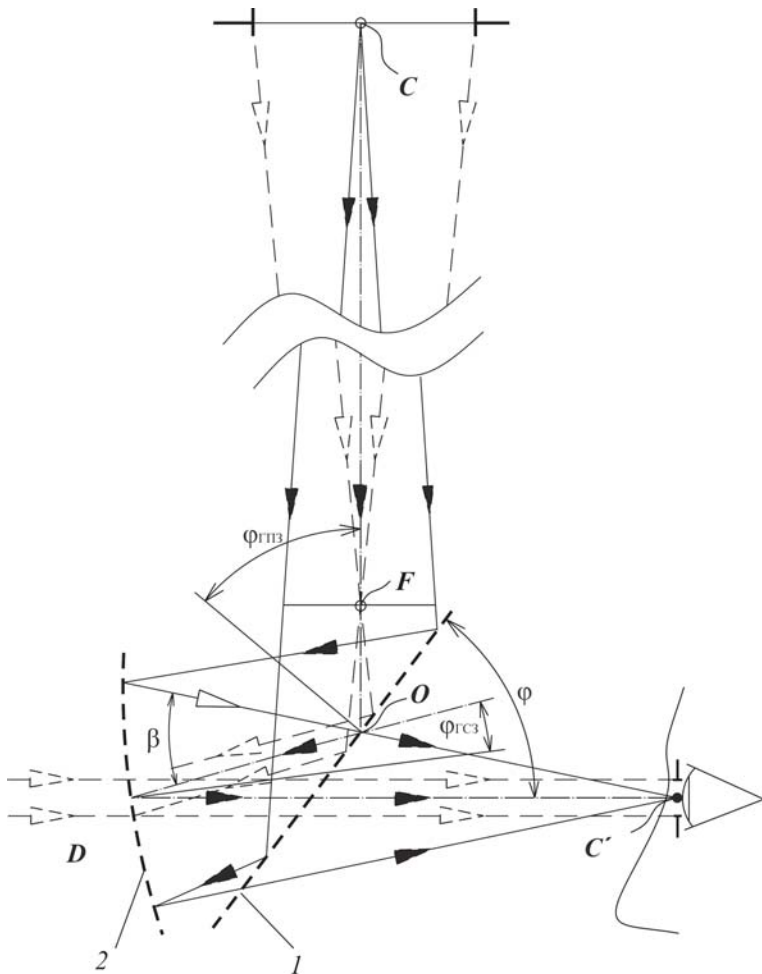


Рис. 1. Принципиальная схема окулярной системы ОНВ

работе обоих зеркал на пропускание. При работе в ночном канале оба зеркала работают на отражение, а плоское зеркало по отношению к пучку, отраженному от сферического зеркала, одновременно работает и на пропускание. Изображение с экрана ЭОП переносится в переднюю фокальную плоскость сферического зеркала с точкой F на оси. Ход лучей, формирующих это изображение в центре поля зрения, представлен на рис. 1 штриховыми линиями. Сплошными линиями представлен ход лучей, формирующих изображение зрачка выхода ОНВ с центром в точке C' , сопряженного с промежуточным изображением зрачка входа с центром в точке C . Спектральный состав излучения, формирующего наблюдаемое изображение в ночном канале, определяется спектром излучения люминофора экрана используемого ЭОП. В рассматриваемом случае это излучение с центральной длиной волны излучения $\lambda_{\text{макс}} = 546 \text{ нм}$ и шириной спектра излучения на уровне 0,5 порядка 15 нм.

Высокая яркость наблюдаемого изображения в ночном канале предполагает максимально высокие коэффициенты отражения обоих зеркал в относительно узкой спектральной области излучения люминофора ЭОП при первичном падении излучения на элемент, а также максимальный коэффициент пропускания плоского зеркала в той же спектральной области при прохождении через него излучения, отраженного сферическим зеркалом в направлении глаза наблюдателя. Узкий спектр отражения зеркал при работе в ночном канале обеспечивает высокий коэффициент пропускания зеркал в остальной видимой области спектра излучения (максимальную яркость изображения в канале прямого наблюдения).

В полной мере указанным требованиям отвечают голограммные зеркала, полученные в толстом слое бихромированного желатина (БХЖ) с экспонированием по схеме Ю.Н. Денисюка. Достигнутые типичные значения параметров таких зеркал следующие: коэффициент пропускания по интенсивности для рабочей длины волны $\lambda_{\text{макс}}$ составляет менее 10^{-5} , полуширина $\delta_{\lambda 0,5}$ спектральной полосы отражения 10...15 нм, интегральный коэффициент пропускания по интенсивности вне спектральной полосы отражения 90% и более [4, 5]. При этом значение угловой селективности $\delta_{\alpha 0,5}$ можно оценить из соотношения [6]

$$\delta_{\alpha 0,5} = \delta_{\lambda 0,5} \operatorname{tg} \theta / \lambda. \quad (1)$$

Здесь θ_0 — угол Брэгга в регистрирующей среде, определяемый, в свою очередь, как

$$\theta_0 = \pi/2 - \arcsin(\sin \varphi/n); \quad (2)$$

φ — угол падения излучения на зеркало.

В рассматриваемом случае при падении излучения в ночном канале на голограммное плоское зеркало (ГПЗ) под углом $\varphi = 51^\circ$ на длине волны $\lambda_{\text{макс}} = 546$ нм угол θ_0 из выражения (2) составляет 59° , что при $\delta_{\lambda 0,5} = 15$ нм из соотношения (1) дает значение $\delta_{\alpha 0,5} = 2,6^\circ$ в регистрирующей среде и $3,9^\circ$ в воздухе. Очевидно, что в указанной угловой зоне (брэгговской зоне) падающих на голограммное зеркало лучей будет иметь место максимальное отражение лучей и, соответственно, минимальное их пропускание до практически полного их гашения в середине указанной угловой зоны. Поэтому для ГПЗ, работающего на отражение при первичном падении на него лучей в ночном канале, все падающие на него лучи в каждой точке зеркала должны располагаться в пределах указанной брэгговской зоны. Наоборот, при вторичном падении этих лучей на ГПЗ после отражения от голограммного сферического зеркала (ГСЗ) они должны находиться вне этой зоны.

Для обеспечения высокой дифракционной эффективности [7] брэгговские направления здесь определены как направления лучей, обеспечивающих сопряжение центров C и C' зрачков входа и выхода (см. лучи на рис. 1). Сформулированное условие эффективной работы ГПЗ для любой его точки в отношении лучей, отраженных от ГСЗ, может быть представлено в виде соотношения

$$\beta \geq \delta_{\alpha 0,5}, \quad (3)$$

где β — угол между лучом, исходящим из точки C после его отражения от ГПЗ, и лучом, пришедшим в ту же точку ГПЗ (точка O на рис. 1) после отражения от ГСЗ.

Условие (3) диктует выбор значения угла φ (см. рис. 1), отличающегося от 45° . В рассматриваемом случае этот угол принят равным 51° и, следовательно, запись ГПЗ должна вестись в расчете на отражение гомоцентрического пучка с центром в точке C при угле падения пучка на зеркало $\varphi_{\text{ГПЗ}}$, равном φ . В выбранной компоновке окулярной системы оси пучков в ночном канале на входе и выходе перпендикулярны, что определяет необходимость записи ГСЗ в расчете на отражение гомоцентрического пучка с центром в точке C , сходящегося после отражения в точке C' , при угле падения пучка на зеркало $\varphi_{\text{ГСЗ}} = \varphi - 45^\circ$.

На рис. 2 показан общий принцип записи голограммных зеркал, используемый в настоящей работе, который одинаков для обоих типов голограммных зеркал. Схема формирования интерференционного поля, регистрируемого в светочувствительном слое БХЖ, представляет собой модификацию схемы Ю.Н. Денисюка.

На рис. 2 обозначено: 1 — металлизированное зеркало (плоское (а) или сферическое (б)); 2 — слой иммерсионной жидкости; 3 — слой регистрирующей среды; 4 — подложка голограммного зеркала. Регистрируемое интерференционное поле формируется в результате сло-

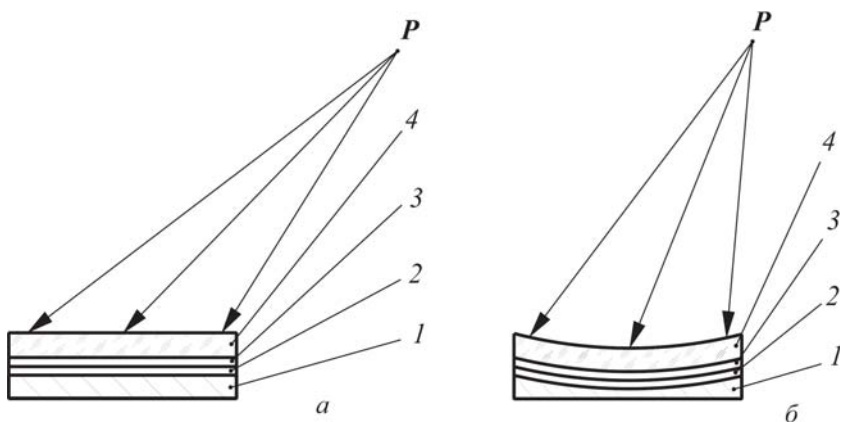


Рис. 2. Схема формирования интерференционного поля при записи плоского (а) и сферического (б) голограммных зеркал

жения встречных когерентных пучков: гомоцентрического с центром расходимости в точке P и отраженного от поверхности металлизированного зеркала. Такая схема обеспечивает параллельность страт интерференционного поля поверхности регистрирующей среды.

Для записи использовалось излучение многочастотного твердотельного АИГ-лазера на длине волны 532 нм с шириной спектра излучения порядка 0,05 нм. Относительно малая длина когерентности лазера (порядка 2 мм) в предложенной схеме записи при толщине регистрирующего слоя БХЖ 50 мкм, используемого при записи, обеспечивает получение достаточной контрастности основного интерференционного поля в самом слое БХЖ. Вместе с тем при относительно большой толщине подложки зеркала (порядка 3 мм) паразитные интерференционные структуры, обусловленные отражением излучения от внешней стороны подложки, практически отсутствуют. В схеме записи нет пространственно разделенных каналов формирования предметного и опорного пучков. Благодаря этому схема имеет высокую помехоустойчивость по отношению к внешним механическим факторам нестабильности и обеспечивает запись даже при большом времени экспонирования, составившем в данном случае 2 мин. Из соображений удобства закрепления представленных на рис. 2 технологических блоков на стенде записи и обеспечения стабильного состояния иммерсионного слоя во время экспонирования выбрано горизонтальное положение указанных блоков.

Поскольку при записи голограммных зеркал ($\lambda_1 = 532$ нм) и работе зеркал в составе окулярной системы ($\lambda_2 = 546$ нм) длины волн отличаются, а также изменяется толщина регистрирующего слоя в результате его постэкспозиционной обработки, возникает задача определения положения центра P расходимости предметного гомоцентрического пучка относительно регистрирующего слоя, а именно: угла падения предметного пучка φ_P на поверхность регистрирующего слоя и удаления этого центра L_1 от расчетной точки на поверхности регистрирующего слоя. Алгоритм решения этой задачи (рис. 3) является одинаковым для обоих типов зеркал. Центр расходимости предметного пучка P при записи голограммного зеркала на длине волны λ_1 определяется как точка пересечения или, точнее, как геометрический центр тяжести зоны пересечения лучей, исходящих из этой зоны и обеспечивающих после записи и постэкспозиционной обработки, включая заклею слоя БХЖ с зарегистрированной голограммой на подложке, получение в каждом участке зеркала дифракционной структуры, что дает брэгговское зеркальное отражение лучей на рабочей длине волны λ_2 с центром расходимости в точке C при работе зеркала в составе окулярной системы. Другими словами, период d_i этой дифракционной

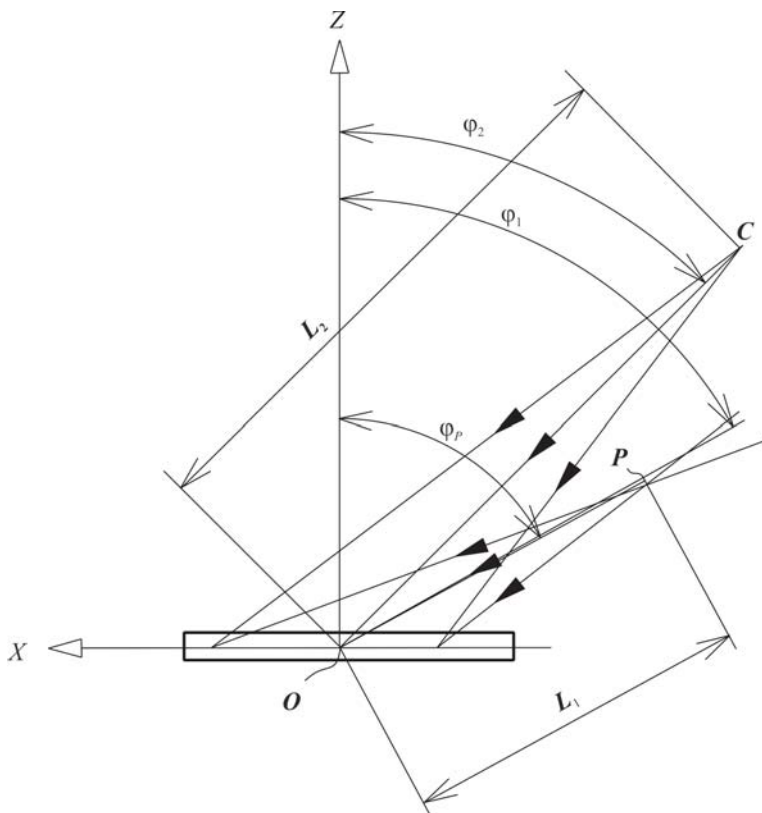


Рис. 3. К определению положения центра предметного пучка P при записи ГПЗ

структуры в направлении, перпендикулярном поверхности регистрирующего слоя, в каждом i -м участке зеркала должен одновременно удовлетворять соотношениям

$$d_i = \lambda_1 / K \cdot 2n \sin \alpha_{n1i}; \quad (4)$$

$$d_i = \lambda_2 / 2n \cdot \sin \alpha_{n2i}, \quad (5)$$

где n — показатель преломления регистрирующей среды; K — коэффициент усадки регистрирующего слоя в результате постэкспозиционной обработки, определяемый отношением толщин регистрирующего слоя до и после указанной обработки; α_{n1i} и α_{n2i} — углы в регистрирующей среде между направлениями преломленных в среде лучей соответственно на длине волны λ_1 , определяющих положение центра предметного пучка P , и на длине волны λ_2 , исходящих из точки C , и поверхностью регистрирующей среды при съемке ГПЗ или касательной к поверхности регистрирующей среды при съемке ГСЗ.

Из соотношений (4) и (5) при известных значениях коэффициента усадки K , определяемого экспериментально, показателя преломления n регистрирующего слоя БХЖ и углов α_{n2i} , которые могут быть определены расчетным путем для каждого из выбранных участков зеркала

на основе оптической схемы окулярной системы, находят значения углов α_{n1i} , определяющие направления лучей предметного пучка в регистрирующей среде. Используя известные соотношения, определяют соответствующие значения углов φ_{1i} падения лучей предметного пучка на регистрирующую среду в воздухе и, в конечном счете, положение центра P предметного пучка, задаваемое в полярной системе координат параметрами φ_P и L_1 .

Отметим, что практически для определения положения центра предметного пучка достаточно рассмотреть ход лучей для трех точек голограммных зеркал в меридиональном сечении, представленном на рис. 3: центральной точки, находящейся на пересечении оптической оси окулярной системы с поверхностью зеркал, и двух крайних точек, определяемых их габаритными размерами. Лучи предметного пучка, соответствующие этим точкам, определяют максимальные размеры упомянутой зоны пересечения. Размеры этой зоны обусловлены различием длин волн излучения при записи зеркала и при работе его в составе окулярной системы, а также усадкой регистрирующего слоя в результате его постэкспозиционной обработки. Эта зона определяет максимальные отклонения лучей при отражении от брэгговских направлений с соответствующим уменьшением отражательной способности зеркал. Угловые размеры этой зоны относительно центров зеркал в конкретном рассматриваемом случае не превысили 1° для обоих типов голограммных зеркал. С учетом предполагаемой угловой селективности ГПЗ порядка 4° , определяющей по существу предельно допустимые отклонения отраженных лучей от брэгговских направлений, упомянутое уменьшение отражательной способности не будет существенным.

На рис. 4 приведена оптическая схема стенда для записи ГПЗ. Излучение лазера 1 расширяется с помощью отрицательной линзы 2 до заполнения после отражения зеркалом 3 линейной апертуры микро-

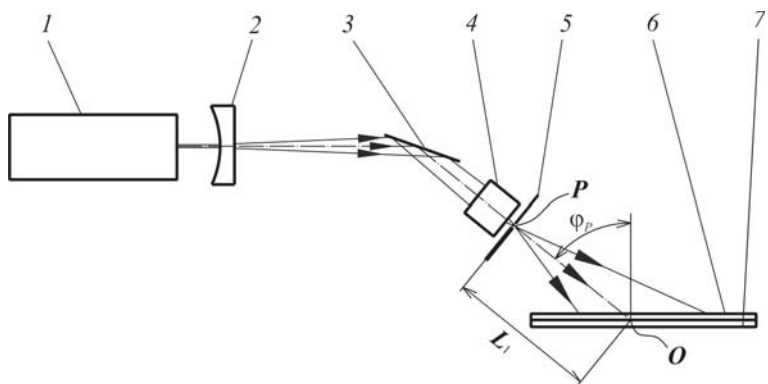


Рис. 4. Оптическая схема стенда для записи ГПЗ

объектива 4. После прохождения узла фильтрации в составе микрообъектива 4 и точечной диафрагмы 5 сформированный узлом гомоцентрический предметный пучок направляется на регистрирующую пластинку 6 с регистрирующей средой, находящейся в контакте с металлизированным зеркалом 7. Центр O записываемого зеркала находится на расчетном расстоянии L_1 от центра расходимости P предметного пучка при расчетном угле φ_P падения пучка на ГПЗ. При записи ГПЗ использовались пластинки ПФГ-04, серийно выпускаемые ОАО “Славич” (г. Переславль-Залесский) с толщиной регистрирующего слоя БХЖ 50 мкм.

Для записи ГСЗ слой БХЖ наносили на выпуклую поверхность стеклянной сферической подложки с заданным радиусом кривизны поверхности, определяемым оптической схемой окулярной системы. Способ нанесения отличается от общеизвестных способов [8], к которым относится в частности формование слоя БХЖ. Использованный способ доступен для осуществления в лабораторных условиях и заключается в переносе слоя БХЖ с изготовленной в условиях серийного производства плоской фотопластинки ПФГ-04 на выпуклую поверхность сферической подложки. При этом последовательно осуществляются следующие технологические операции:

- задубливание пластинок ПФГ-04 путем их прогрева в сушильном шкафу при температуре 50...55 °С и влажности 50...60 % в течение 12...14 ч;

- купание пластинок в 1 %-ном растворе бихромата аммония в течение 3...4 мин при температуре 20...22 °С;

- перенос слоя БХЖ с пластинки на выпуклую сферическую поверхность;

- сушка подложки с перенесенным слоем БХЖ в сушильном шкафу при температуре 35...40 °С и влажности 50...60 % до полного высыхания (4...5 ч).

В результате проведения указанного технологического процесса получают образцы сферических подложек со слоем БХЖ удовлетворительного качества в отношении равномерности толщины слоя и адгезии слоя со стеклянной подложкой без потери его чувствительности.

Запись ГСЗ осуществлялась на том же стенде, что и запись ГПЗ (см. рис. 4), с установкой соответствующих расчетных значений параметров φ_P и L_1 .

Постэкспозиционная обработка голограммных зеркал проводилась по рекомендованной изготовителем фотопластинок ПФГ-04 технологии. Непосредственно после завершения процесса постэкспозиционной обработки слой БХЖ защищался путем заклейки стеклянной плоской пластиной в случае ГПЗ или стеклянным сферическим мениском

с необходимым радиусом кривизны в случае ГСЗ с использованием оптического клея ОК-72ФТ₅. После заклейки проводилась обрезка зеркал до заданных габаритных размеров и конфигурации.

В таблице приведены значения параметров изготовленных голограммных зеркал, соответствующие центральной зоне при работе в составе окулярной системы.

Таблица

Параметры голограммных зеркал

Тип зеркала	Угловая селективность $\delta_{\alpha 0,5}$, градус (в воздухе)	Коэффициент отражения в угловом диапазоне δ_{α} на длине волны $\lambda_{\text{макс}}$ $\rho_{\text{макс}}$, %	Коэффициент пропускания	
			вне углового диапазона δ_{α} на длине волны $\lambda_{\text{макс}}$ τ , %	интегральный для "белого" света $\tau_{\text{инт}}$, %
ГПЗ	3	0,8	0,8	0,75
ГСЗ	20	0,9	—	0,85

В целом все приведенные в таблице значения являются ожидаемыми и удовлетворяющими поставленным требованиям применительно к конкретным условиям использования голограммных зеркал в составе окулярной системы. При этом общий коэффициент пропускания окулярной системы в ночном канале, определяемый как $\rho_{\text{макс ГПЗ}} \times \rho_{\text{макс ГСЗ}} \times \tau_{\text{ГПЗ}}$, составил 0,58, а общий коэффициент пропускания окулярной системы в канале прямого видения, определяемый как $\tau_{\text{инт ГСЗ}} \times \tau_{\text{инт ГПЗ}}$, составил 0,64. Обращает на себя внимание существенно более низкая угловая селективность ГСЗ по сравнению ГПЗ. Это можно объяснить работой ГСЗ при существенно меньшем угле падения пучка, составляющем 6° по сравнению с 51° для ГПЗ. Значения углов Брэгга θ_0 в регистрирующей среде при этом составляют из формулы (2) 86° для ГСЗ и 59° для ГПЗ, в то время как теоретическое [5] значение δ_{α} при прочих равных условиях обратно пропорционально $\cos \theta_0$.

Заключение. В результате проведенных работ в МГТУ им. Н.Э. Баумана по созданию голограммных плоских и сферических зеркал применительно к условиям их использования в составе окулярной системы очков ночного видения разработана методика расчета параметров стенда для записи зеркал с использованием многочастотного твердотельного АИГ-лазера с длиной волны излучения 532 нм, наиболее близкой к длине волны излучения люминофора экрана ЭОП. Экспериментально отработана технология изготовления зеркал с применением в качестве регистрирующей среды толстого слоя БХЖ. При этом показана возможность изготовления сферической подложки с регистрирующим слоем БХЖ путем переноса этого слоя с плоской

пластинки. Результаты работы могут быть использованы в расчетах параметров схем записи голограммных зеркал и фильтров различного применения, а также при их изготовлении.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. С а л и к о в В. Л. Эпоха ночной войны // Спец. техника. – 2000. – № 5. – С. 21–32.
2. В о л к о в В. Г. Приборы для вождения спецтехники в ухудшенных условиях видимости // Спец. техника. – 2003. – № 2. – С. 2–14.
3. Г а н М. А., Щ е г л о в С. А., Г а н н Я. М., Ч е р т к о в А. С. // Широкоугольные оптические системы с комбинером на основе синтезированных объемных голограмм для наשלемых дисплеев // Оптический журн. – 2008. – Т. 75, № 3. – С. 18–23.
4. Г е р к е Р. Р., К о р е ш е в С. Н., С е м е н о в Г. Б., С м и р н о в В. В. Голограммная оптика в “ГОИ им. С.И. Вавилова” // Оптический журн. – 1994. – Т. 61, № 1. – С. 26–39.
5. Л у к и н А. В. Голограммные оптические элементы // Оптический журн. – 2007. – Т. 74, № 1. – С. 80–87.
6. К о л ь е р Р., Б е р к х а р т К., Л. Л и н Л. Оптическая голография: Пер. с англ. / Под ред. Островского Ю.И. – М.: Мир, 1973. – 686 с.
7. Г а н М. А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. – Л.: ГОИ, 1984. – 140 с.
8. Л у к и н А. В., Ш и г а п о в а Н. М. Голограммы Ю.Н. Денисюка на “толстых” слоях БХЖ как оптические элементы: селективные зеркала, NOTCH-фильтры, дифракционные решетки // Сб. тр. Всерос. семинара “Юрий Николаевич Денисюк – основоположник отечественной голографии”. Санкт-Петербург, 22–24 мая 2007. – С. 144–147.

Статья поступила в редакцию 28.04.2010

Наталья Иннокентьевна Гусарова родилась в 1948 г., окончила в 1972 г. МИИГАиК. Канд. техн. наук, зам. начальника отдела ФГУП “Дом оптики” ВНИЦ “ГОИ им. С.И. Вавилова” (Москва). Автор 37 научных работ в области нелинейной оптики, распространения лазерного излучения в атмосфере, приборов ночного видения, тепловизионных приборов.

N.I. Gusarova (b. 1948) graduated from the Moscow Institute of Engineers for Geodesy, Aero-photo-survey and Cartography in 1972. Ph. D. (Eng.), deputy head of department of the Federal State Unitary Enterprise “House of Optics” of All-Russian Scientific Center “GOI im. S.I. Vavilova” (Moscow). Author of 37 publications in the field of nonlinear optics, propagation of laser radiation in atmosphere, night vision instruments, thermal vision devices.

Дмитрий Сергеевич Лушников родился в 1978 г., окончил в 2002 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Инженер НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 20 научных работ в области оптико-электронных приборов и голографии.

D.S. Lushnikov (b. 1978) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 2002. Engineer of Radioelectronics and Laser Technology Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of more than 20 publications in the field of optical and electronic instruments and holography.

Владимир Васильевич Маркин родился в 1939 г., окончил в 1962 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Инженер НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 15 научных работ в области оптико-электронных приборов и голографии.

V.V. Markin (b. 1939) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1962. Engineer of Radioelectronics and Laser Technology Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 15 publications in the field of optical and electronic instruments and holography.

Сергей Борисович Одинокоев родился в 1950 г., окончил в 1973 г. МВТУ им. Н.Э. Баумана. Канд. техн. наук, доцент кафедры “Лазерные и оптико-электронные системы” МГТУ им. Н.Э. Баумана, начальник научно-учебной лаборатории “Оптико-голографических систем” НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор 165 научных работ в области оптико-голографических систем.



S.B. Odinkov (b. 1950) graduated from the Bauman Moscow Higher Technical School in 1973. Ph. D. (Eng.), assoc. professor of “Laser and Optical-and-Electronic Systems” department, head of laboratory on optical and holographic systems of Radioelectronics and Laser Technology Research Institute of the Bauman Moscow State Technical University. Author of 165 publications in the field of design of optical and holographic systems.

Вадим Викторович Поздняков родился в 1973 г., окончил в 1997 г. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Ведущий инженер ОАО “НПО Геофизика-НВ” (Москва).

V.V. Pozdnyakov (b. 1973) graduated from the Bauman Moscow State Technical University in 1997. Leading engineer of JSC “NPO Geofizika-NB” (Moscow).