

## ИЗГОТОВЛЕНИЕ ГОЛОГРАММНЫХ ЗЕРКАЛ ДЛЯ СИСТЕМЫ НОЧНОГО ВИДЕНИЯ

© 2011 г. Н. И. Гусарова\*, канд. техн. наук; Д. С. Лушников\*\*; В. В. Маркин\*\*;  
С. Б. Одинокоев\*\*, канд. техн. наук; В. В. Поздняков\*\*

\* “Дом оптики” ВНИИ “Государственный оптический институт им. С.И. Вавилова”, Москва

\*\* Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва

E-mail: odinokov@rl2.bmstu.ru

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

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

Коды OCIS: 090.2890, 090.7330

Поступила в редакцию 19.04.2010

Выбор типа зеркал как голограммных оптических элементов и требования к ним определены условиями работы зеркал в составе окулярной системы очков ночного “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 этих очках, а также сохранить работоспособность в присутствии интенсивных световых помех, в том числе света фар встречного транспорта при управлении автомобилем. Кроме того, при управлении транспортным средством в ночных условиях происходит 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 на экране ЭОП через оптическую систему с промежуточным изображением [3],

включающую проекционную часть и собственно окулярную систему. Элементы окулярной системы для ночного канала и канала прямого видения являются общими, позволяющими одновременно видеть и изображение на экране ЭОП, и вести прямое наблюдение. В данном случае окулярная система строится на основе двух оптических элементов: плоского 1 и сферического 2 полупрозрачных зеркал (рис. 1). Прямое наблюдение осуществляется при работе обоих зеркал на пропускание. При работе в ночном канале оба зеркала работают в отраженном свете, а плоское зеркало по отношению к пучку, отраженному от сферического зеркала, одновременно и в проходящем. 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 рисунке пунктирными линиями. Непрерывные линии показывают ход лучей, формирующих изображение зрачка выхода ОНВ с центром в точке  $C'$ , сопряженное с промежуточным изображением зрачка входа с центром в точке  $C$ . Спектральный состав излучения, создающего наблюдаемое изображение в ночном канале, определяется спектром излучения лю-

минофора экрана используемого ЭОП. В рассматриваемом случае это излучение с центральной длиной волны  $\lambda_{\text{макс}} = 546$  нм и полушириной спектра порядка 15 нм.

Обеспечение высокой яркости 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 и 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, что создает в канале прямого наблюдения максимальную яркость изображения.

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: коэффициент пропускания

по интенсивности для рабочей длины волны  $\lambda_{\text{макс}}$  – 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  $\delta_{\alpha,0,5}$  может быть оценено из соотношения [6]

$$\delta_{\alpha,0,5} = \delta_{\lambda,0,5} \operatorname{tg} \theta_0 / \lambda. \quad (1)$$

Здесь  $\theta_0$  – угол Брэгга в регистрирующей среде, определяемый в свою очередь как

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

где  $\varphi$  – угол падения излучения на зеркало.

В рассматриваемом случае при падении света в ночном канале на голограммное плоское зеркало (ГПЗ) под углом  $\varphi = 51^\circ$  на длине волны  $\lambda_{\text{макс}} = 546$  нм угол  $\theta_0$  из уравнения (2) составляет  $59^\circ$ , что при  $\delta_{\lambda,0,5} = 15$  нм из соотношения (1) дает значение  $\delta_{\alpha,0,5} = 2,6^\circ$  в регистрирующей среде и, соответственно,  $3,9^\circ$  в воздухе. Очевидно, что в указанной угловой зоне падающих на голограммное зеркало лучей (брэгговской зоне) будет наблюдаться максимальное отражение лучей и, соответственно, минимальное их пропускание до практически полного гашения в середине указанной угловой зоны. Поэтому для ГПЗ, работающего в отраженном свете, 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 (непрерывные линии на рис. 1). Сформулированное выше 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  $\beta$  – 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 угла  $\varphi$  (рис. 1), отличающегося от  $45^\circ$ . В рассматриваемом

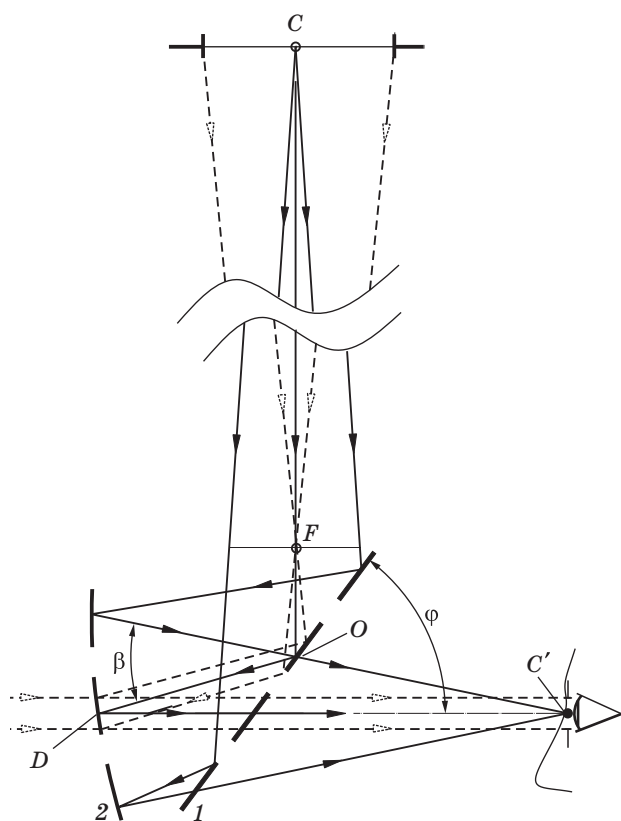


Рис. 1. Принципиальная схема окулярной системы ОНВ.

случае этот угол принят равным  $51^\circ$  и, соответственно, запись ГПЗ должна вестись в расчете на отражение гомоцентрического пучка с центром в точке  $C$  при угле падения пучка на зеркало  $\varphi_{ГПЗ}$ , равном  $\varphi$ . 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  $\varphi_{ГСЗ} = \varphi - 45^\circ$ .

Рис. 2 иллюстрирует общий принцип записи голограммных зеркал, использованный в настоящей работе, который одинаков для обоих типов голограммных зеркал. Схема формирования интерференционного поля, регистрируемого в светочувствительном слое БХЖ, представляет модификацию схемы Ю.Н. Денисюка.

Регистрируемое интерференционное поле формируется в результате сложения встречных когерентных пучков одним, гомоцентрическим с центром расходимости в точке  $P$ , и другим, отраженным от поверхности металлизированного зеркала. Такая схема обеспечивает параллельность страт интерференционного поля поверхности регистрирующей среды.

Для записи зеркал использовалось излучение многочастотного твердотельного YAG-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, использовав-

шегося при записи, 50 мкм обеспечивает получение достаточной контрастности основного интерференционного поля в самом слое БХЖ. С другой стороны, 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 обладает высокой помехоустойчивостью по отношению к внешним механическим факторам неустойчивости 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.

Отличие длины волн при записи голограммных зеркал ( $\lambda_1 = 532$  нм) и длины волны при работе зеркал в составе окулярной системы ( $\lambda_2 = 546$  нм), а также изменение толщины или усадки регистрирующего слоя в результате его постэкспозиционной обработки ставят задачу определения положения центра  $P$  расходимости предметного гомоцентрического пучка относительно регистрирующего слоя, а именно угла падения предметного пучка  $\varphi_P$  на поверхность регистрирующего слоя и удаления этого центра  $L_1$  от расчетной точки на поверхности регистрирующего слоя. Алгоритм решения этой задачи, иллюстрируемый схемой на рис. 3, при записи ГПЗ одинаков для обоих типов зеркал. Центр расходимости предметного пучка  $P$  при записи голограммного зеркала на длине волны  $\lambda_1$  определяется как точка пересечения или, точнее, как геометрический центр тяжести зоны пересечения лучей, исходящих из этой зоны и обеспечивающих после записи и послеэкспозиционной обработки, включая заклеивку слоя БХЖ с зарегистрированной голограммой на подложке, получение в каждом участке зеркала дифракционной структуры, дающей брэгговское зеркальное отражение лучей на рабочей длине волны  $\lambda_2$  с центром расходимости в точке  $C$  при работе зеркала в составе окулярной системы. То есть период  $d_i$  этой дифракционной структуры в направлении, перпендикулярном поверхности регистрирующего слоя, в каждом  $i$ -м участке зеркала должен одновременно удовлетворять соотношениям

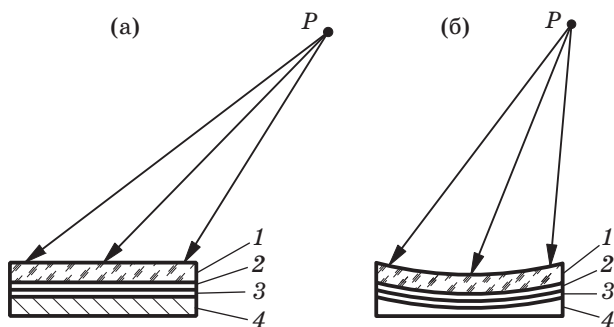


Рис. 2. Схема формирования интерференционного поля при записи плоского (а) и сферического (б) голограммных зеркал. 1 – зеркало металлизированное, плоское (а) или сферическое (б), 2 – слой иммерсионной жидкости, 3 – регистрирующий слой, 4 – подложка голограммного зеркала.

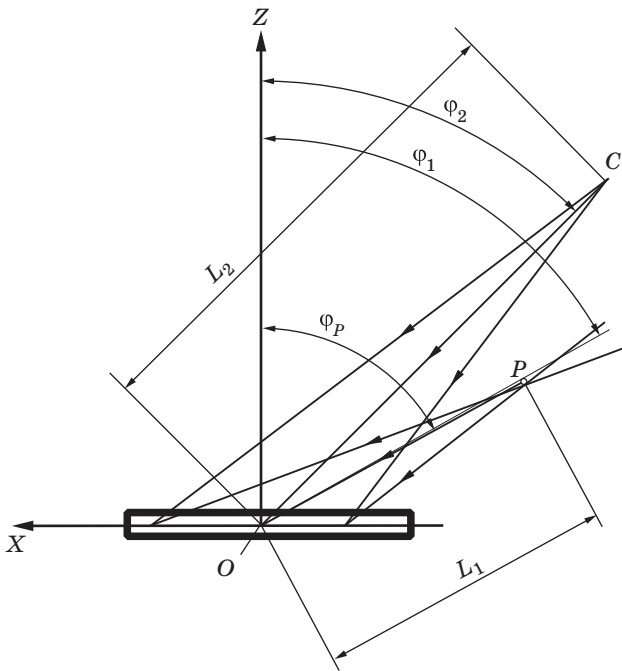


Рис. 3. К определению положения центра предметного пучка  $P$  при записи ГПЗ.

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

и

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

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,  $\alpha_{n1i}$  и  $\alpha_{n2i}$  – углы в регистрирующей среде между направлениями преломленных в среде лучей, соответственно, на длине волны  $\lambda_1$ , определяющих положение центра предметного пучка  $P$ , и на длине волны  $\lambda_2$ , исходящих из точки  $C$ , и поверхностью регистрирующей среды при записи ГПЗ или касательной к поверхности регистрирующей среды при записи ГСЗ.

Из соотношений (4) и (5) при известных значениях коэффициента усадки  $K$ , определяемого в результате предварительных экспериментов, показателя преломления  $n$  регистрирующего слоя БХЖ и углов  $\alpha_{n2i}$ , которые можно определить расчетным путем для каждого из выбранных участков зеркала на основании оптической схемы окулярной системы, находятся значения углов  $\alpha_{n1i}$ , определяющие направления лучей предметного пучка в регистрирующей среде. С использованием известных соотношений находятся соответствующие значения

углов  $\phi_{1i}$  падения лучей предметного пучка на регистрирующую среду в воздухе и, в конечном счете, положение центра  $P$  предметного пучка, задаваемое в полярной системе координат параметрами  $\phi_P$  и  $L_1$ .

Заметим, что практически для определения положения центра предметного пучка достаточно ограничиться рассмотрением хода лучей для трех точек голограммных зеркал в меридиональном сечении, представленном на рисунках: центральной точки, находящейся на пересечении оптической оси окулярной системы с поверхностью зеркал, и 2-х крайних точек, определяемых их габаритами. Лучи предметного пучка, соответствующие этим точкам, определяют максимальные размеры упоминавшейся выше 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 центра зеркал в конкретном рассматриваемом случае не превысили  $1^\circ$  для обоих типов голограммных зеркал. С учетом предполагаемой угловой селективности ГПЗ порядка  $4^\circ$ , 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 микрообъектива 4. После прохождения узла фильтрации в составе микрообъектива 4 и точечной диафрагмы 5 сформированный узлом гомоцентрический предметный пучок направляется на фоточувствительную пластинку 6, находящуюся в контакте с металлизированным зеркалом 7. Центр  $O$  записываемого зеркала находится на расчетном расстоянии  $L_1$  от центра расхожимости  $P$  предметного пучка при расчетном угле  $\phi_P$  падения пучка на ГПЗ. При записи ГПЗ использовались пластинки ПФГ-04, серийно выпускаемые на ОАО “Славич” в г. Переяславль-Залесский (<http://www.slavich.ru/?id=24>), с толщиной регистрирующего слоя БХЖ 50 мкм.

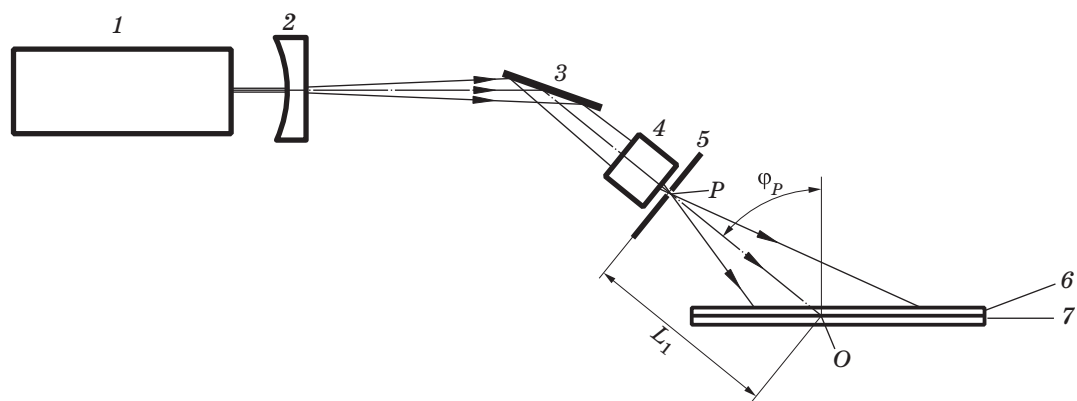


Рис. 4. Оптическая схема стенда для записи ГПЗ.

Для записи ГСЗ слой БХЖ наносился на выпуклую поверхность стеклянной сферической подложки с заданным радиусом кривизны, определяемым оптической схемой окулярной системы. Способ нанесения отличается от общеизвестных способов [8], к которым, в частности, относится формование слоя БХЖ. Используемый в настоящей работе 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 выполняются следующие технологические операции:

- задубливание пластинок ПФГ-04 путем их прогрева в термостате при температуре 50–55 °С и влажности 50–60% в течение 12–14 часов,
- сенсibilизация пластинок в 1% растворе бихромата аммония в течение 3–4 минут при температуре 20–22 °С,

- перенос слоя БХЖ с пластинки на выпуклую сферическую поверхность,
- сушка подложки с перенесенным слоем БХЖ в термостате при температуре 35–40 °С и влажности 50–60% до полного высыхания (4–5 часов).

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

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

На рис. 5 приведены фотографии технологических блоков для записи ГПЗ (а) и ГСЗ (б) в рассмотренном выше составе вместе с механическими элементами, обеспечивающими

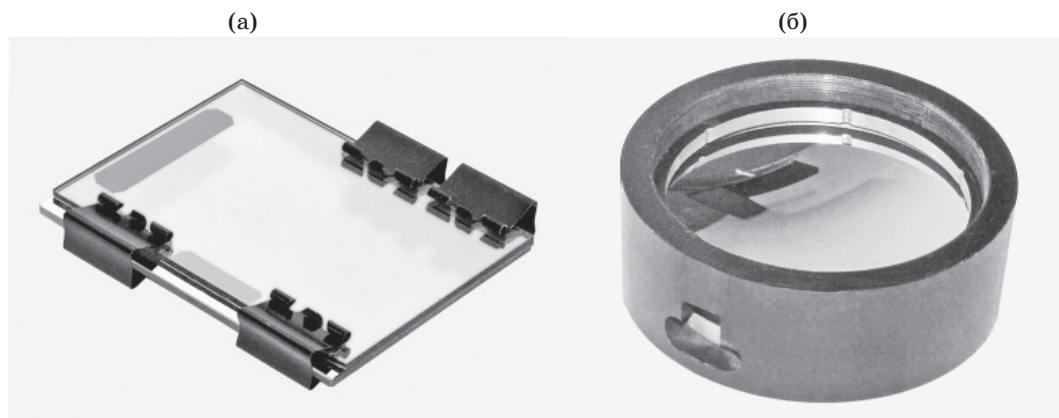


Рис. 5. Фотографии технологических блоков для записи ГПЗ (а) и ГСЗ (б).



сборку этих блоков с заливкой иммерсионной жидкости между оптическими элементами блоков.

Постэкспозиционная обработка голограммных зеркал проводилась по рекомендованной изготовителем фотопластинок ПФГ-04 технологии. Непосредственно после завершения процесса постэкспозиционной обработки слой БХЖ защищался путем заклеивания плоской стеклянной пластиной в случае ГПЗ или стеклянным сферическим мениском с необходимым радиусом кривизны в случае ГСЗ с использованием оптического клея ОК-72ФТ<sub>5</sub>. После защиты зеркала обрезались до заданных габаритов и конфигурации.

В таблице представлены измеренные параметры изготовленных голограммных зеркал, соответствующие центральной зоне, при работе в составе окулярной системы.

В целом все приведенные в таблице значения параметров изготовленных голограммных зеркал являются ожидаемыми и удовлетворяющими поставленным требованиям применительно к конкретным условиям их использования в составе окулярной системы. При этом общий коэффициент пропускания окулярной системы в ночном канале, определяемый как результат перемножения коэффициентов отражения  $\rho_{\text{максГПЗ}}$  на  $\rho_{\text{максГСЗ}}$  и на коэффициент пропускания  $\tau_{\text{ГПЗ}}$ , составил 0,58, а общий коэффициент пропускания окулярной системы в канале прямого видения, определяемый как произведение  $\tau_{\text{интГСЗ}}$  и  $\tau_{\text{интГПЗ}}$ , составил 0,64. Обращает на себя внимание существенно более низкая угловая селективность ГСЗ по сравнению с ГПЗ. Объяснением этого является существенно меньший угол падения пучка при работе ГСЗ, составляющий 6°, по сравнению с 51° для ГПЗ. Значения углов Брэгга  $\theta_0$  в регистрирующей среде при этом составляют из выражения (2) 86° для ГСЗ и 59° для ГПЗ, в то время как теоретиче-

ски [5] значение  $\delta_\alpha$  при прочих равных условиях обратно пропорционально величине  $\cos\theta_0$ .

## Заключение

В результате проведенных работ в МГТУ им. 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 YAG-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 этого слоя на сферической подложке путем его переноса с плоской пластинки. Результаты работы могут быть использованы в расчетах параметров схем записи голограммных зеркал и фильтров различного применения, а также при их изготовлении.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Саликов В.Л. Эпоха ночной войны // Специальная техника. 2000. № 5. С. 21–32.
2. Волков В.Г. Приборы для вождения спецтехники в ухудшенных условиях видимости // Специальная техника. 2003. № 2. С. 2–14.
3. Ган М.А., Щеглов С.А., Ганн Я.М., Чертков А.С. Широкоугольные оптические системы с комбинированном на основе синтезированных объемных голограмм для нашиваемых дисплеев // Оптический журнал. 2008. Т. 75. № 3. С. 18–23.
4. Герке Р.Р., Корешев С.Н., Семенов Г.Б., Смирнов В.В. Голограммная оптика в “ГОИ им. С.И. Вавилова” // Оптический журнал. 1994. Т. 61. № 1. С. 26–39.
5. Лукин А.В. Голограммные оптические элементы // Оптический журнал. 2007. Т. 74. № 1. С. 80–87.
6. Кольтер Р., Беркхарт К., Лин Л. Оптическая голография: Пер. с англ. Под ред. Островского Ю.И. М.: Мир, 1973. 686 с.
7. Ган М.А. Теория и методы расчета голограммных и киноформных оптических элементов. Л.: ГОИ, 1984. 140 с.
8. Лукин А.В., Шигапова Н.М. Голограммы Ю.Н. Денисюка на “толстых” слоях БХЖ как оптические элементы: селективные зеркала, NOTCH-фильтры, дифракционные решетки // Сб. трудов Всероссийского семинара “Юрий Николаевич Денисюк – основоположник отечественной голографии”. Санкт-Петербург, 22–24 мая 2007. С. 144–147.

Параметры голограммных зеркал

Тип зеркала	Угловая селективность $\delta_{\alpha 0,5}$ , град (в воздухе)	Коэфф. отражения в угловом диапазоне $\delta_\alpha$ на $\lambda_{\text{макс}}$ , %	Коэфф. пропускания вне углового диапазона $\delta_\alpha$ на $\lambda_{\text{макс}}$ , %	Коэфф. пропускания интегральный для “белого” света, %
ГПЗ	3	0,8	0,8	0,75
ГСЗ	20	0,9	—	0,85