

На правах рукописи
УДК 681.7



КОВАЛЕВ МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

**ГОЛОГРАММНЫЕ КОМПЕНСАТОРЫ
В ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
ГОЛОГРАФИЧЕСКИХ КОЛЛИМАТОРНЫХ ПРИЦЕЛОВ**

специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы

автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2017

Работа выполнена в федеральном государственном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на кафедре лазерных и оптико-электронных систем.

Научный руководитель: **Одинокоев Сергей Борисович**, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры лазерных и оптико-электронных систем

Официальные оппоненты: **Павлычева Надежда Константиновна**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры оптико-электронных систем Казанского национального исследовательского университета им. А.Н. Туполева – КАИ, г. Казань

Черёмхин Павел Аркадьевич, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры лазерной физики, НИЯУ МИФИ, г. Москва

Ведущая организация: Публичное акционерное общество «Красногорский завод им. С.А. Зверева» (ПАО КМЗ), г. Красногорск

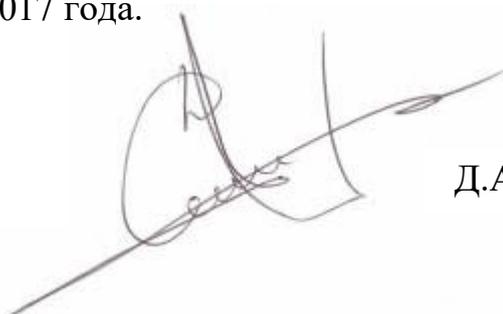
Защита диссертации состоится « » ноября 2017 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Отзыв в двух экземплярах, заверенный печатью организации, просим направить по адресу: 105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, НУК РЛМ, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.19.

Автореферат разослан до « » октября 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.19
кандидат физико-математических наук



Д.А. Семеренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Применение в стрелковом оружии и средствах ближнего боя голографических коллиматорных прицелов (ГКП), включающих голограммные (ГОЭ), дифракционные оптические элементы (ДОЭ) и полупроводниковые источники света, позволяет уменьшить время прицеливания, повысить качество изображения прицельных знаков, увеличить яркость прицельного знака, а также в 1,5-2 раза понизить массогабаритные параметры относительно стандартных коллиматорных прицелов.

Большой вклад в разработку и исследование ГКП внесли русские учёные, в том числе С.Н. Корешев, М.К. Шевцов, С.Б. Одинокоев, С.А. Иванов, А.Е. Ангервакс, С.А. Шойдин. Среди зарубежных учёных можно отметить Upatnieks J. (США), Tai A.M. (США), Siczka E.J. (США) и др.

Одной из серьёзных научно-технических проблем, возникающих при разработке оптических систем ГКП является то, что длина волны излучения полупроводниковых лазерных диодов изменяется при изменении температуры окружающей среды. Поэтому из-за дифракционных явлений возникает угловое смещение восстановленного с ГОЭ изображения прицельного знака, что соответственно, приводит к ошибке прицеливания и попадания в цель. На основе анализа литературных и патентных источников установлено, что для решения этой проблемы в оптических системах ГКП используются голограммные компенсаторы (ГК), состоящие из комбинации призмы, двух или нескольких ДОЭ, ГОЭ, один из которых формирует мнимое изображение прицельного знака в пространстве объектов, а другой обеспечивает компенсацию углового смещения изображения прицельного знака при изменении длины волны излучения считывающего лазера.

Работы в данной области в настоящее время ведутся в компании L-3 Communications Corporation (США), в АО «ГОИ им. С.И. Вавилова», МГТУ им. Н.Э. Баумана, в научно-техническом центре ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева».

В ряде указанных организаций в последние десятилетия были проведены разработки и исследования оптических систем ГКП на основе отражательных ГОЭ и полупроводниковых лазерных диодов. В тоже время не менее актуальной задачей является исследование применения пропускающих ГОЭ, в том числе и компьютерно-синтезированных, в таких системах с использованием в качестве источника излучения точечного светодиода. Поэтому до настоящего времени данный вопрос остается нерешенным в полной мере. Особенностью разработки оптических систем таких прицелов на основе ГОЭ заключается в необходимости учёта диапазона перестройки длины волны полупроводникового источника света в пределах ± 50 нм. Поэтому методика проектирования ГОЭ для оптических систем таких прицелов должна учитывать такие особенности.

В этой связи диссертационная работа, посвященная разработке метода расчёта, функциональных схем ГК и методики проектирования оптических систем ГКП на их основе является весьма актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка метода расчета и функциональных схем голограммных компенсаторов, а также создание на их основе оптических систем голографических коллиматорных прицелов, обеспечивающих восстановление несмещаемого прицельного знака.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проанализированы существующие оптические схемы голографических коллиматорных прицелов.
2. Разработаны и исследованы функциональные схемы голограммных компенсаторов (ГК) для оптических систем голографических коллиматорных прицелов на основе пропускающих и отражающих ГОЭ, а также компьютерно-синтезированной голограммы Фурье.
3. Разработан метод расчета голограммных компенсаторов различного типа, обеспечивающих компенсацию смещения углового положения изображения прицельного знака.
4. Создана методика проектирования голограммных компенсаторов, включая компьютерно-синтезированную голограмму Фурье, для оптических систем ГКП.
5. Справедливость основных положений диссертационной работы подтверждена экспериментальными исследованиями на макетных образцах голографических коллиматорных прицелов, включающих различные типы голограммных компенсаторов.

Методы исследований. При решении теоретических и прикладных задач были использованы методы теории оптико-электронных систем, методы математического и компьютерного моделирования.

Объектом исследования являются голограммные компенсаторы, обеспечивающие компенсацию смещения углового положения изображения прицельного знака.

Научная новизна работы заключается в том, что в процессе проведения исследований были получены новые научные результаты теоретического и прикладного характера, а именно:

1. Разработан метод расчета голограммных компенсаторов на основе пропускающих и отражающих ГОЭ, а также компьютерно-синтезированной голограммы Фурье для оптических систем ГКП.
2. Разработаны функциональные схемы на основе голограммных компенсаторов, работающие с лазерными и оптическими источниками излучения, оригинальность которых подтверждена патентами на изобретения.
3. Разработана методика проектирования ГК различных типов, включая компьютерно-синтезированную голограмму Фурье, для оптических систем ГКП.

Практическая ценность работы заключается в том, что разработанные метод компенсации углового смещения положения прицельного знака, методики проектирования ГК могут найти применение при создании оптических систем ГКП различного назначения с несмещаемым прицельным знаком, обеспечивающих их работоспособность в расширенном диапазоне изменения температуры окружающей среды и минимальные массогабаритные параметры прицелов.

Достоверность и обоснованность полученных результатов

Изложенные в работе теоретические и экспериментальные результаты согласуются между собой и с результатами других исследований. Предложенные модели и сделанные выводы имеют ясную физическую трактовку. Обоснованность результатов работы подтверждается публикациями в журналах, цитированием другими авторами и результатами обсуждения на конференциях, где докладывались результаты работы.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод компенсации углового смещения положения изображения прицельного знака в диапазоне изменения длин волн источника оптического излучения не менее ± 50 нм (при $\lambda=650$ нм).
2. Расчетно-формульные модели ГК для оптических систем ГКП с лазерным и светодиодным источниками излучения.
3. Методика проектирования ГК, включая компьютерно-синтезированную голограмму Фурье, для оптических систем ГКП.
4. Результаты экспериментальных исследований макетных образцов ГК в составе ГКП, разработанных на основе оптических систем с аналоговыми голограммными оптическими элементами и компьютерно-синтезированными голограммами и подтверждающих правильность основных расчётных соотношений.

Реализация и внедрение результатов диссертационной работы.

Результаты исследований, выполненных в работе, использованы и внедрены в ПАО «Красногорский завод им. С.А. Зверева», ООО «Новые оружейные технологии» (г. Сергиев Посад), ООО «Сканда-рус» (г. Красногорск) при разработке макетных и опытных образцов коллиматорных прицелов на основе различных ГОЭ, что подтверждается соответствующими актами о внедрении. Также результаты работы использованы при выполнении пяти НИР и трех ОКР, выполненных в НИИ РЛ МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2007-2015 гг.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались на трех всероссийских конференциях по фотонике и информационной оптике и семи международных конференциях и форумах, в том числе:

- на VI, VII, VIII и X-ой международных научно-технических конференциях «ГОЛОЭКСПО» 2009-2015 гг., г. Москва, г. Санкт-Петербург, г. Киев, г. Казань;
- на I, II и V всероссийских конференциях по фотонике и информационной оптике, г. Москва, НИЯУ МИФИ 2012, 2013, 2016 гг.;
- 10-й и 11-й международном форуме «Оптические системы и технологии — OPTICS-EXPO» в 2014-2015 гг., г. Москва;
- Digital Holography & 3-D Imaging Meeting, Imaging 2015, Shanghai China.

Макетные образцы голографических коллиматорных прицелов, реализованные методами, описанными в диссертационной работе, получили золотые медали на различных международных выставках и салонах в 2007-2009 гг. в Брюсселе (Бельгия), в Нюрнберге (Германия), в Женеве (Швейцария), в Сеуле (Республика Корея), неоднократно представлялись на международных выставках «Интерполитех» (г. Москва, 2013-2015 гг.), на международном военно-техническом форуме «Армия-2015».

Публикации. Основные научные результаты диссертационной работы опубликованы в 31 публикации общим объёмом 6,3 п.л., в том числе в 14 статьях, опубликованных в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ. На разработанные способы и схемы построения голографических коллиматорных прицелов получены семь патентов РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка цитируемой литературы, включающего ссылок и наименований. Общий объем работы изложен на 110 страницах машинописного текста, включая 71 рисунок и 21 таблицу, список литературы включает 61 библиографическое описание.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационного исследования, поставлена цель работы и сформулированы основные задачи для ее достижения, отмечены объект и предмет исследования, определены научная новизна и практическая значимость полученных результатов, выделены основные научные положения, выносимые на защиту, приведены сведения об апробации работы и публикациях, охарактеризованы структура и объем диссертации.

В **первой главе** посвящен анализу применения голограммных оптических элементов в голографических коллиматорных прицелах и существующих способов компенсации смещения углового положения изображения прицельного знака от линии визирования.

Приведена классификация, тенденции развития и сравнительный анализ оптических систем голографических коллиматорных прицелов для стрелкового оружия и систем ближнего боя. Эти прицелы, как правило, включают полупроводниковый лазерный диод, используемый в качестве источника света, объектив, коллимирующий излучение источника, компенсатор на основе одного или нескольких ГОЭ и изображающую голограмму, формирующую мнимое изображение прицельного знака.

Известно, что при изменении температуры окружающей среды происходит изменение длины волны света, излучаемого лазером, что приводит к угловому смещению изображения прицельного знака от линии визирования. Например, для широко используемых в таких прицелах лазерных диодов фирмы Thorlabs при изменении температуры окружающей среды в диапазоне $-40...+85$ °С длина волны излучения изменяется на ± 21 нм, что приводит на расстоянии 50 м к вертикальному смещению прицельного знака до 1,5 м.

Анализ научных и патентных публикаций показывает, что для устранения этого недостатка в прицел устанавливается ахроматизирующая система в виде дифракционной решетки или комбинация призм с дифракционной решеткой, обеспечивающая стабильность положения наблюдаемого изображения прицельного знака при температурных изменениях длины волны излучения источника света. Кроме того, стабилизация изображения прицельного знака может осуществляться с помощью отражающей дифракционной решетки, на которую направляется сформированный с помощью коллимирующего зеркала луч, что позволяет

сформировать для считывания с ГОЭ пучок лазерного излучения с требуемыми параметрами. Недостатками этих устройств являются отсутствие элементов компенсации хроматических aberrаций и системы стабилизации прицельного знака широком диапазоне изменения длины волны источника излучения, наличие спекл-шума в изображении прицельного знака, возможность демаскировки стрелка из-за подсветки цели непродифрагировавшей частью пучка восстанавливающего голограмму излучения, большое количество входящих в состав прицела оптических элементов.

Было показано, что в составе ГКП основным элементом, решающим задачу компенсации углового ухода положения прицельного знака, восстановленного с голограммного оптического элемента, является оптический компонент, называемый далее в работе компенсатором. На рис. 1 приведена структурно-функциональная схема ГКП с компенсатором на основе многокомпонентных ГОЭ.

Результаты проведенного анализа позволили разработать метод компенсации углового ухода положения изображения прицельного знака в расширенном диапазоне изменения длин волн источников лазерного и оптического излучения, что позволяет разработать оптические системы ГКП с компенсаторами на основе многокомпонентных ГОЭ различных типов, а также создать ряд макетных образцов голографических коллиматорных прицелов с несмещаемым прицельным знаком.

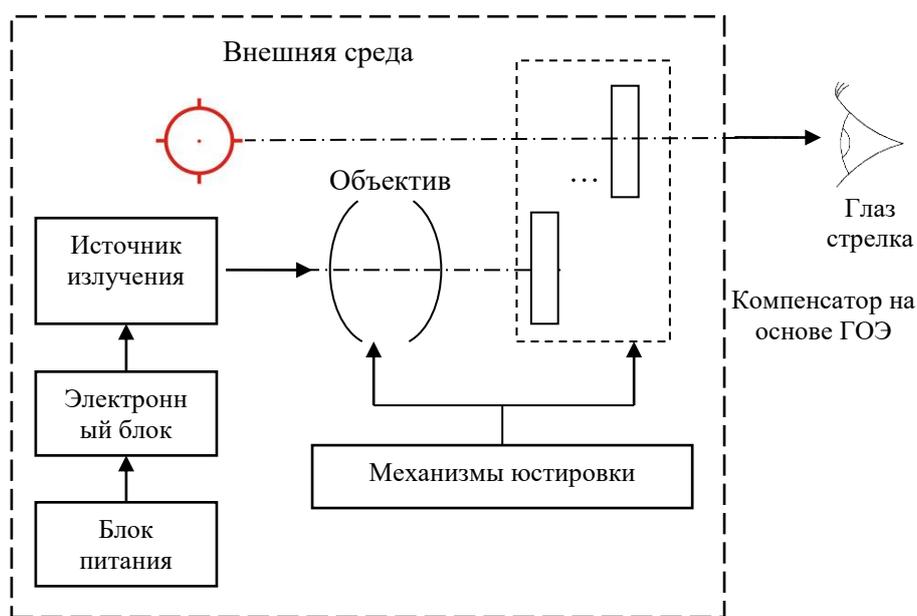


Рис. 1 Структурно-функциональная схема ГКП, содержащая компенсатор на основе ГОЭ

Цель и задачи исследования были поставлены с учетом необходимости решения выявленных проблем на основе анализа научной литературы, описывающей последние достижения в развитии построения оптических схем голографических коллиматорных прицелов и способов компенсации углового ухода изображения прицельного знака от линии визирования. Оригинальный способ расчета голограммных компенсаторов открывает возможность инновационной разработки оптических систем ГКП, работающие как с лазерными, так и с оптическими источниками излучения.

Вторая глава диссертационной работы посвящена разработке метода расчета оптимальных параметров геометрического расположения ГОЭ различного типа, а также созданию функциональных оптических схем ГКП с компенсаторами на их основе.

Изображение прицельного знака, формируемое с помощью голографического прицела, располагается на значительном удалении от ГОЭ, с помощью которого оно создаётся. В первом приближении можно считать изображение удалённым на бесконечность, а световые пучки, формирующие каждую точку изображения, - пучками с плоским волновым фронтом. В соответствии с этим структура голограммы прицельного знака, полученной на ГОЭ, представляет собой суперпозицию интерференционных картин, создаваемых при наложении плоской опорной волны и плоских объектных волн, соответствующих разным точкам изображения прицельного знака.

При считывании изображения с полученной голограммы процесс формирования восстановленной объектной волны можно разделить на два этапа. На первом этапе происходит рассеяние считывающей световой волны на неоднородностях регистрирующей среды носителя голограммы, созданных при её записи. Эти неоднородности соответствуют максимумам и минимумам записанной интерференционной картины. На втором этапе происходит интерференция всех рассеянных неоднородностями голограммы волн, в результате чего и создается считанное изображение.

В главе рассмотрены процессы восстановления объектной волны с ГОЭ, полученного при наложении двух плоских волн на различные типы голографических носителей. В том числе показано, что для тонких пропускающих ГОЭ с периодом записанной на голограмму интерференционной картины d и угле падения считывающего луча α изменение направления распространения считанного луча β определяется соотношением

$$\Delta\beta = \frac{\Delta\lambda}{d \cos \beta} = \frac{\Delta\lambda(\sin \alpha - \sin \beta)}{\lambda \cos \beta}$$

При реальных величинах сдвига длины волны (эта величина составляет приблизительно 30 нм от $\lambda = 650$ нм) угловое смещение считанного луча составляет приблизительно 0,05 радиан, т.е. 3° . При этом заметных изменений амплитуды светового поля продифрагировавшей волны не происходит, так как величина $\Delta\beta$ значительно меньше ширины диаграммы рассеяния света на отдельной линии.

Кроме того, в главе рассмотрены особенности дифракции света на трехмерных пропускающих голограммах (рис. 2, а) и показано, что при получении голограммы на носитель с конечной толщиной светочувствительного слоя необходимо учитывать тот факт, что интерференционная картина записывается не только на поверхности слоя, но и в объёме светочувствительной среды. В результате создаваемые неоднородности приобретают форму страт, пронизывающих всю толщину светочувствительного слоя и расположенных вдоль биссектрисы угла между опорным и объектным лучами.

При считывании такой голограммы каждая такая полоска работает, как зеркальце, от которого свет при считывании отражается в соответствии с законом

зеркального отражения. Ширина диаграммы направленности отраженного луча определяется правилами дифракции плоской волны на апертуре страты, и становится тем меньше, чем больше длина страты вдоль биссектрисы.

В этом случае изменение углового положения продифрагировавшего луча при изменении длины волны на ± 10 нанометров от 635 нм составляет $\pm 0,85^\circ$, что приводит к уменьшению амплитуды поля волны до 0,996 от максимума.

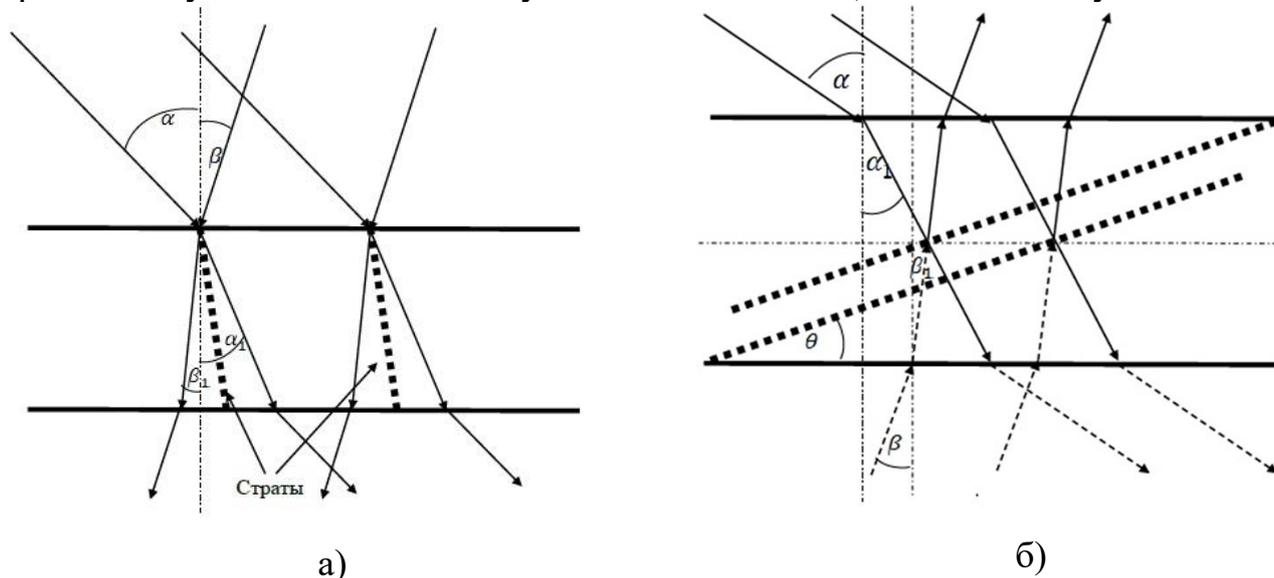


Рис. 2 Функциональные схемы получения трехмерного пропускающего (а) и отражающего (б) ГОЭ.

Также в главе исследована особенность получения отражающих трехмерных ГОЭ, в которых страты, формирующиеся при получении голограммы, располагаются так, что угол между ними и поверхностью голограммы невелик. В соответствии с этим длина страт гораздо больше, чем у пропускающих голограмм, а следствием этого является существенное уменьшение дифракционной расходимости отраженных от страт лучей и, соответственно, уменьшение допустимого отклонения продифрагировавшего луча при изменении длины волны света.

В этом случае отклонение луча, сформированного голограммой, при изменении длины волны на ± 10 нм составляет $\pm 0,848^\circ$ - такую же величину, как и у пропускающей голограммы. При этом амплитуда волны составляет 0,677 от максимума, что позволяет сделать вывод о том, что при увеличении сдвига длины волны в данной схеме яркость восстановленного изображения будет быстро снижаться.

Далее в главе приводятся результаты расчетов схем голограммных компенсаторов с пропускающими и отражающими ГОЭ.

Оптическая схема устройства, в котором должно быть стабилизировано направление на изображение приемного знака при отклонении длины волны считывающего луча λ от номинального значения λ_0 , представлена на Рис. 3. Здесь ГК – голограммный компенсатор, ГОЭ - голограммный оптический элемент с записанной на нем голограммой прицельного знака. Угол между плоскостями ГК и ГОЭ равен φ . Интерференционные полосы в обеих голограммах направлены по горизонтали перпендикулярно к плоскости рисунка. Пунктирными линиями N_1 и N_2

показаны нормали к поверхности голограмм, α_1 - угол падения считывающего лазерного луча на ГК, β_1 - угол отклонения от нормали N_1 продифрагировавшего на ГК лазерного луча, α_2 - угол падения этого луча на ГОЭ. Этот луч становится считывающим для ГОЭ.

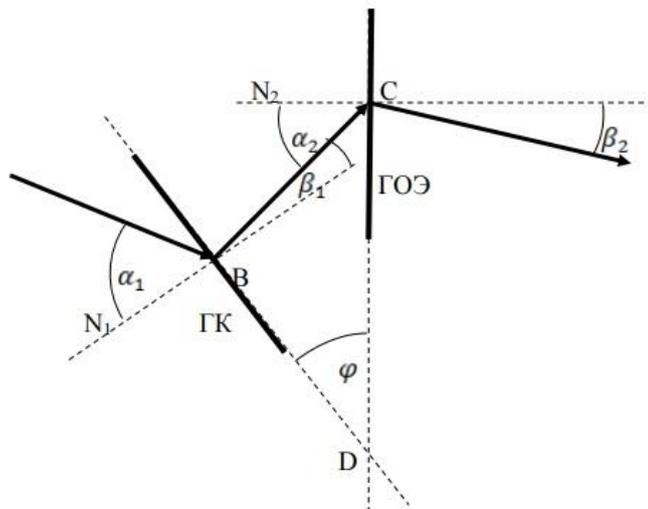


Рис. 3 Расчетно-формульная модель компенсатора на основе пропускающих голограммных оптических элементов.

Условиями ахроматизации в схеме голограммного компенсатора на рис. 3 являются случаи

- $\varphi = 0^\circ$ и $d_1 = d_2$, т.е. $\sin \beta_2 = -\sin \alpha_1$;
- $d_1 = d_2 \cos \varphi$, т.е.

$$\sin \beta_2 = \sin \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta \lambda}{d_1}\right)^2} + \frac{\Delta \lambda}{d_1} \cos \varphi - \frac{\lambda_0 + \Delta \lambda}{d_2} = \sin \varphi \sqrt{1 - \left(\frac{\Delta \lambda}{d_1}\right)^2} +$$

$$\Delta \lambda \left(\frac{\cos \varphi}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right) - \frac{\lambda_0}{d_2} \cong \sin \varphi \left(1 - \frac{\Delta \lambda^2}{2d_1^2}\right) + \Delta \lambda \left(\frac{\cos \varphi}{d_1} - \frac{1}{d_2}\right) - \frac{\lambda_0}{d_2}$$

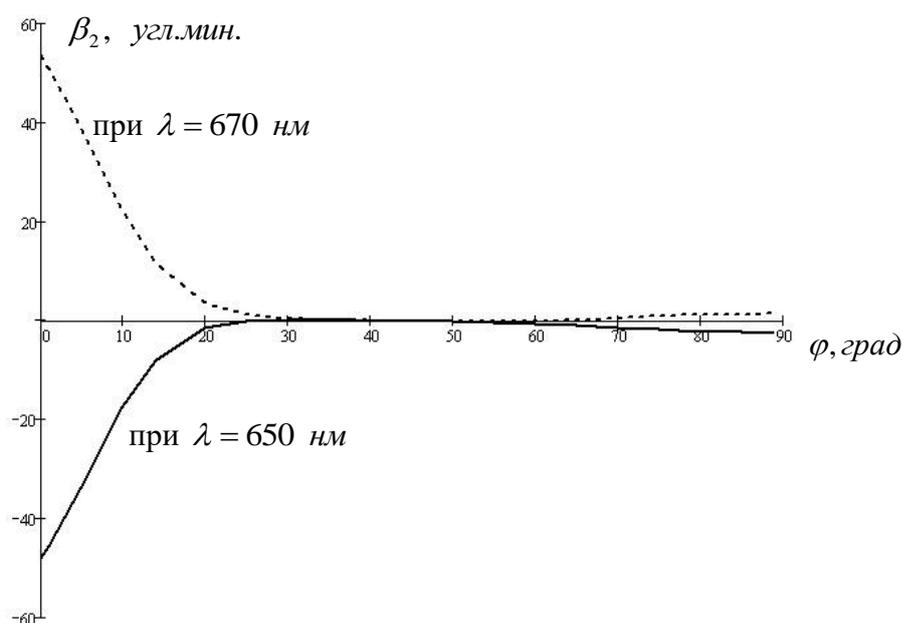


Рис. 4 График зависимости углового смещения прицельного знака при изменении длины волны источника света в схеме с двумя пропускающими ГОЭ.

Также в главе рассмотрен голограммный компенсатор пропускающего типа, за которым навстречу проходящим через решетку лучам установлено зеркало (или нанесена зеркальная пленка на заднюю поверхность пластинки, на которую записана голографическая решетка). Считанный с пропускающей голограммы луч отражается от зеркала и проходит обратно сквозь голограмму без повторной дифракции, так как испытывает значительное угловое отклонение при первом проходе этот луч удалился от условия (угла) Брэгга.

Рассмотрим возможность компенсации (ахроматизации), если плоскости ГК и ГОЭ в общей схеме непараллельны между собой. Предлагаемая схема компенсатора представлена на Рис. 5. Здесь 1 – пропускающий ГОЭ, который совместно с зеркалом 2 используется в качестве компенсирующего элемента. 3 – ГОЭ с записанным на нем изображением прицельного знака. α_1, α_2 – углы падения на голограммный компенсатор и на ГОЭ считывающего луча, φ – угол между плоскостями ГК и ГОЭ, β_1, β_2 – отклонение от нормали к голограмме продифрагировавших лучей.

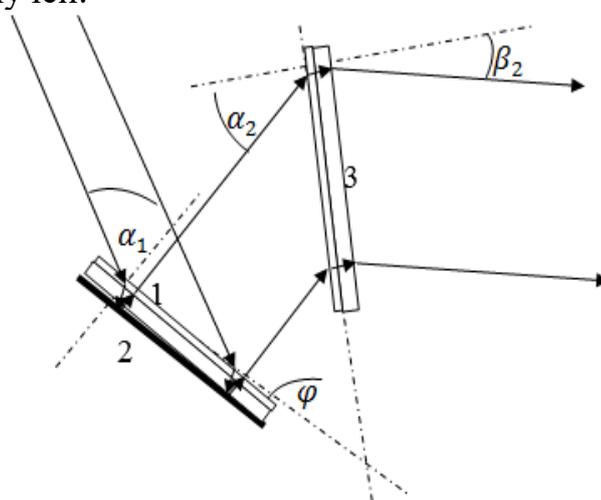


Рис. 5 Расчетно-формульная модель компенсатора на основе трехмерного пропускающего голограммного оптического элемента и зеркала.

На основе данного компенсатора удастся построить компактную оптическую схему ГКП, в которой удастся значительно уменьшить габаритные размеры всего прицела и сохранить при этом расширенный диапазон изменения длин волн света лазерного диода. Для данной схемы ГКП были проведены теоретические исследования по оценке величины углового ухода изображения прицельного знака в зависимости от изменения длины волны света лазерного диода, численные результаты которого приведены в таблице 1.

Таблица 1. Смещение прицельного знака при изменении длины волны источника

λ , мкм	0,6	0,62	0,64	0,65	0,66	0,68	0,70
$\Delta\beta_2$, угл. мин.	3,8	1,085	0,03	0	0,03	1,085	3,8

Реализация предложенной схемы обеспечивает стабилизацию углового ухода положения изображения прицельного знака в пределах не более 3,8 угл.мин в

расширенном диапазоне ± 50 нм изменения длин волн источника оптического излучения (при $\lambda=650$ нм), что соответствует диапазону изменения температуры окружающей среды в пределах от -50 °С и до $+80$ °С, что в 1,5 раза больше чем у зарубежных аналогов.

Кроме того, в диссертации разработана и исследована оптическая схема ГКП с компенсатором (рис. 6) на основе однокомпонентной компьютерно-синтезированной двумерной голограммы Фурье (КСГФ), где 1 – глаз оператора, 3 – полупрозрачное зеркало, 4 – компьютерно-синтезированная голограмма Фурье (КСГФ), 5 – диафрагма, 6 – коллимирующий линзовый объектив, 7 – лазер или светодиод с малой апертурой, оригинальность которой подтверждена патентом на полезную модель. Важнейшей особенностью данной схемы является то, что при освещении плоской опорной волной с КСГФ восстанавливается изображение прицельного знака, осевая точка которого представляет собой 0-й порядок дифракции. В результате осевая точка прицельного знака не зависит от длины волны лазерного диода (или полупроводникового светодиода) и не изменяет своего пространственного положения при изменении его длины волны света из-за изменения температуры окружающей среды. Таким образом, с помощью компенсатора такого типа с КСГФ формируется несмещаемая центральная точка прицельного знака. Однако при этом при изменении длины волны света лазерного диода может изменяться диаметр круга в прицельном знаке, что не сильно влияет на точность прицеливания при стрельбе.

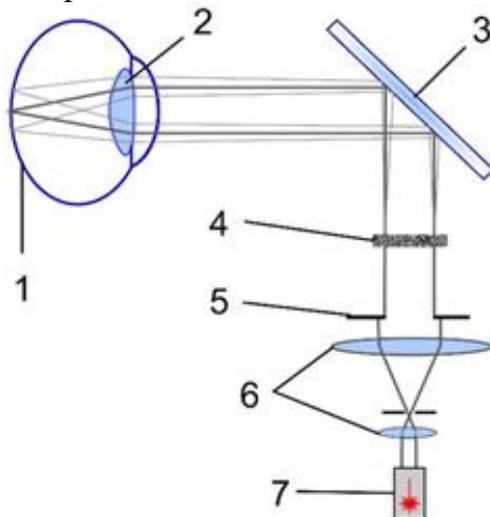


Рис. 6 Функциональная оптическая схема ГКП с компенсатором на основе КСГФ.

Был разработан алгоритм компьютерного синтеза цифровой голограммы Фурье в качестве ГОЭ, на котором записано изображение прицельного знака (точнее: обрамления центральной точки прицеливания прицельного знака). Структура интерференционной картины, записываемой на голограмму, формируется путем компьютерного синтеза и выводится на апертуру ЖК-транспаранта, полученное изображение оптически перепроецируется на поверхность голографического носителя, производится экспонирование сфокусированного изображения и при необходимости фотохимическая обработка носителя. Также при цифровой записи такого ГОЭ используется тот факт, что обрамление прицельного

знака представляет собой осесимметричную картину (рис. 7). В соответствии с этим для записи требуется половина этой картины. Вторая половина формируется при считывании, как минус первый дифракционный порядок (рис. 8). Использование компьютерного синтеза позволяет, в частности, при формировании голограммы учитывать нелинейные свойства используемого для записи голограммы светочувствительного материала и повысить за счет этого качество считываемого изображения прицельного знака.

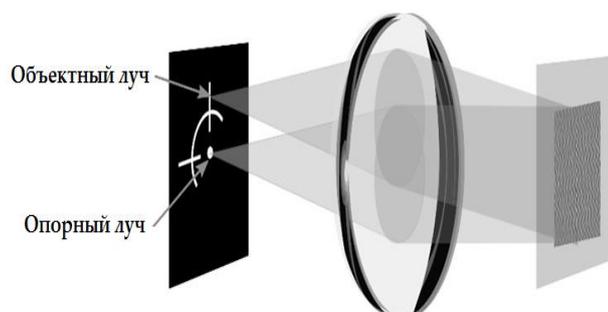


Рис. 7 Функциональная схема, поясняющая процесс получения изображения прицельного знака на КСГФ

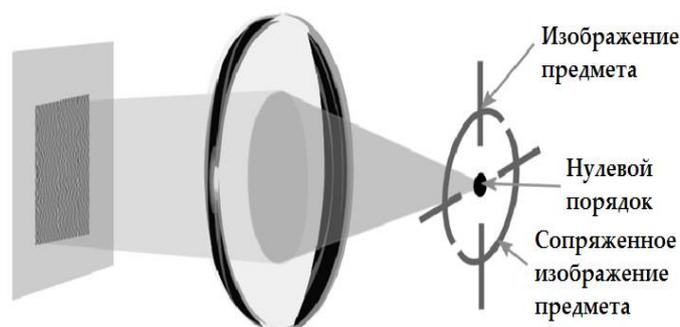


Рис. 8 Функциональная схема, поясняющая процесс восстановления изображения прицельного знака с КСГФ

В **третьей главе** рассмотрены вопросы практической реализации полученных в работе результатов. Целью экспериментальных исследований являлась проверка правильности основных теоретических положений диссертации на основе оценки углового смещения линии визирования при изменении температуры окружающей среды, при котором предложенные базовые варианты оптических систем коллиматорных прицелов обеспечивают компенсацию углового ухода изображения прицельного знака в широком диапазоне изменения температуры окружающей среды.

Для оценки метода компенсации и анализа факторов, влияющих на угловой уход положения изображения прицельного знака в расширенном диапазоне изменения длин волн источников лазерного и оптического излучения, в диссертационной работе были созданы и испытаны макетные образцы голографических коллиматорных прицелов на основе оригинальных оптических систем с голограммными компенсаторами различного типа, как для стрелкового оружия, так и для систем ближнего боя.

В п. 3.1. сообщается о разработке оптической системы (рис. 9) голографического коллиматорного прицела с голограммным компенсатором на основе трехмерного пропускающего ГОЭ и создании макетного образца на его основе (рис. 10).

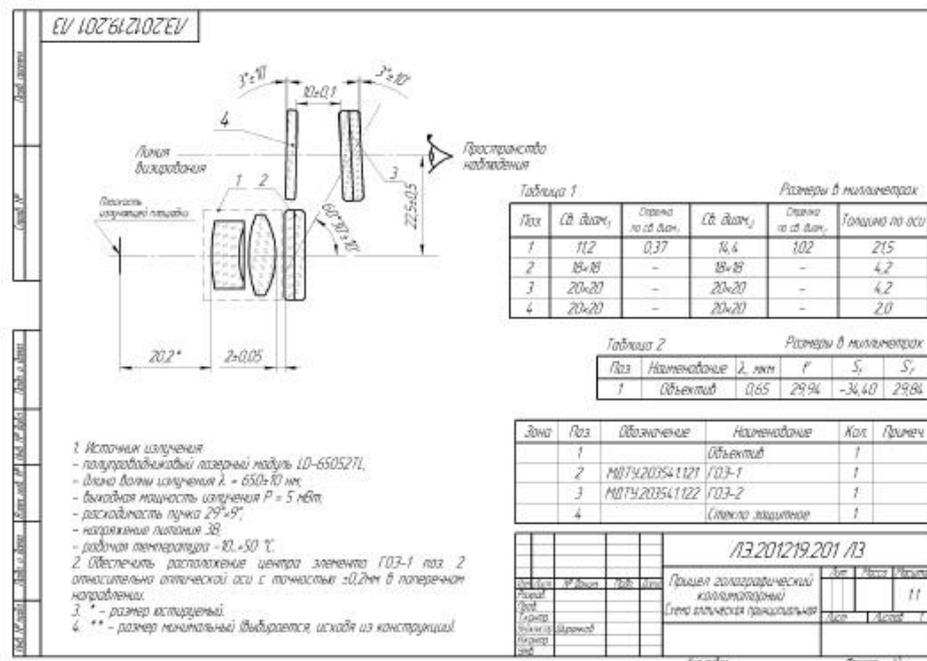


Рис. 9 Оптическая схема голографического коллиматорного прицела с голограммным компенсатором на основе трехмерного пропускающего ГОЭ: 1 – коллимирующий объектив; 2 - трехмерный пропускающий ГОЭ; 3 – изображающая голограмма; 4 – защитное стекло



Рис. 10 Макет голографического коллиматорного прицела

Экспериментальные исследования макета ГКП заключались в определении изменения положения прицельного знака при воздействии температуры (от -40 °С до $+80$ °С). Для чего образец прицела помещался в термобарокамеру ТБК-40 с оптическим иллюминатором.

Методика проведения экспериментов заключались в том, что в макетный образец прицела был установлен аккумулятор GP2700 напряжением 1,2 В и ёмкостью 2600 мАч. Снаружи ТБК-40 перед иллюминатором на подставке был установлен коллиматор установки ЮТ1216 и осветитель (с фокусом равным 200 мм). В нормальных климатических условиях внутри ТБК соосно с коллиматором

ЮТ1216 на кронштейне с направляющей планкой Пикатинни устанавливался макетный образец прицела. Центр прицельного знака совмещался с центром перекрестия коллиматора. Наблюдение за положением центра перекрестия сетки коллиматора велось непосредственно в ТБК-40 с помощью зрительной трубки увеличением 10^x , установленной соосно за прицелом.

Наблюдение за положением центров линий визирования прицелов относительно центра перекрестка сетки коллиматора велось поочередно непосредственно в ТБК с помощью зрительной трубы при фокусировке трубы на резкое изображение сетки коллиматора, затем труба перефокусировалась на резкое изображение линии визирования. Смещение положение центра линии визирования определилось визуально по штрихам сетки коллиматора с ценой деления $3,5''$.

Смещение фокальной плоскости прицела определилось по формуле $x = \frac{N_k - N_m}{k}$, где N_k – отсчет по шкале зрительной трубы при фокусировке на сетку коллиматора, N_m – отсчет по шкале зрительной трубы при фокусировке на линию визирования, $k = \frac{f'^2_{\text{трубы}}}{f'^2_{\text{прицела}}} = \frac{200^2}{60^2} = \frac{40000}{3600} = 11,1$.

Угловой параллакс, вызванный расфокусировкой, определялся по формуле $E'' = \frac{D_{\text{вх.зр.}} \cdot x}{2 \cdot f'^2_{\text{прицела}}} \cdot 206265$.

При диаметре входного зрачка 30 мм и фокусном расстоянии прицела $f' = 60$ мм.

$$E'' = \frac{30 \cdot 206265 \cdot x}{2 \cdot 3600} = 859 \cdot x, \quad E' = \frac{859 \cdot x}{60} = 14 \cdot x$$

В итоге максимальное угловое смещение прицельного знака относительно сетки коллиматора составило $3,5''$, а расфокусировка – 0,27 мм.

В п. 3.2. сообщается о разработке оптической системы (рис. 11) голографического коллиматорного прицела с голограммным компенсатором на основе трехмерной пропускающей дифракционной решетки с зеркалом и создании макетного образца на его основе.

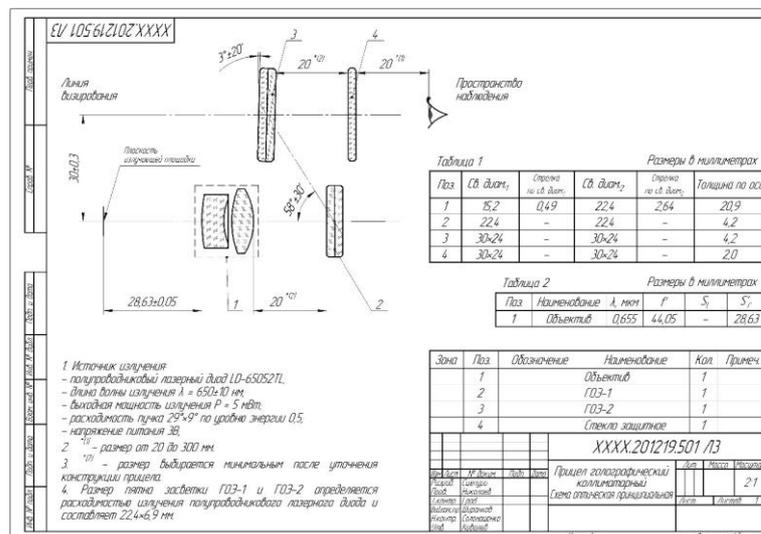


Рис. 11 Оптическая схема голографического коллиматорного прицела с голограммным компенсатором на основе трехмерного пропускающего ГОЭ с зеркалом: 1 – коллимирующий объектив; 2 - трехмерный пропускающий ГОЭ с зеркалом; 3 – изображающая голограмма; 4 – защитное стекло

Максимальное угловое смещение прицельного знака для такого макетного образца относительно сетки коллиматора составило $3''$, а расфокусировка – $0,12$ мм.

На основе полученных экспериментальных результатов сделан вывод о справедливости основных теоретических положений диссертации.

В **заключении** сформулированы и приведены основные выводы, научные и практические результаты работы.

ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

На основе обобщения трудов отечественных и зарубежных авторов, а также теоретических и экспериментальных исследований, проведённых в диссертационной работе, развиты теоретические положения и функциональные схемы для разработки нового поколения прицелов с голограммными оптическими элементами, что способствует дальнейшему развитию оптико-электронного приборостроения.

Основные результаты диссертации заключаются в следующем:

1. Проведены теоретические исследования оптических систем коллиматорных прицелов, построенных на основе различных голограммных компенсаторов.
2. Разработан метод компенсации углового ухода положения изображения прицельного знака на основе различных схем построения голограммных компенсаторов в диапазоне изменения длин волн источников лазерного и оптического излучения в диапазоне ± 50 нм. Адекватность разработанного метода подтверждена в процессе экспериментальных исследований.
3. Разработаны оригинальные функциональные схемы голографических коллиматорных прицелов на основе аналоговых ГОЭ, позволяющих с высокой точностью исключить смещение прицельного знака от линии визирования (единицы угловых секунд).
4. Впервые получена функциональная схема коллиматорного прицела, в основе которой лежит компьютерно-синтезированная голограмма Фурье, нулевой порядок которой выполняет функцию центральной прицельной точки центрально-симметричного символа.

5. Разработаны методики проектирования и расчета отражающих и пропускающих голограммных компенсаторов и компьютерного синтеза цифровой голограммы Фурье для оптических систем ГКП.

6. Проведены экспериментальные исследования макетных образцов ГКП с оптическими системами на основе ГК различных типов для оценки величины погрешности (ухода) углового положения изображения прицельного знака в расширенном диапазоне изменений длин волн источников лазерного и оптического излучения.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК и содержащих основные результаты диссертации

1. Анализ дрейфа длины волны излучения лазерного диода в голографических прицелах / Ковалев М.С., Мораренко В.В. // Научное обозрение: теория и практика. 2012. №1. С. 2-11 (1,15 п.л./0,924 п.л.).

2. Плазмохимическое травление стекла при формировании микрорельефа изделий микрооптики / Ковалев М.С. [и др.] // Научное обозрение. 2012. №3. С. 142-151 (1,15 п.л./0,575 п.л.).

3. Создание ДОО для формирования точечных эталонных изображений в оптических системах / Ковалев М.С. [и др.] // Компьютерная оптика. 2013. Т. 37, №3. С. 341-352 (1,386 п.л./0,693 п.л.).

4. Исследование свойств восстановленного луча с объемных голограммных оптических элементов, используемых в оптических приборах наблюдения / Ковалев М.С. [и др.] // Известия высших учебных заведений. Физика. 2015. №10. Стр. 87-94 (0,924 п.л./0,693 п.л.).

5. Bobrinev, V.I., Kovalev, M.S., Odinson, S.B. et al. Russ Phys J (2016) 58: 1457. <https://doi.org/10.1007/s11182-016-0668-0>.

6. The use of holographic optical elements in optical systems sights / M.S. Kovalev [et al.] // Indian Journal of Science and Technology. 2016. Vol. 9 (47). P. 1-6 (0,693 п.л./0,462 п.л.).

Патенты

7. Голографический прицел и устройство записи голограммы прицельного знака: патент RU №2352890, F41 G 1/12 / М.С. Ковалев [и др.] – 2007.

8. Голографический коллиматорный прицел с компенсацией изменения углового положения прицельного знака: патент RU №2355989, F41 G 1/12 / М.С. Ковалев [и др.] – 2007.

9. Голографический коллиматорный прицел и устройство записи компенсационного голограммного оптического элемента: патент RU №95140, F41 G 1/12 / М.С. Ковалев [и др.] – 2010.

10. Пат. 158982 Российская Федерация, F41G 1/00 (2006.01). Оптическая схема компактного коллиматорного прицела с компьютерно-синтезированным голограммным оптическим элементом / Ковалев М.С. [и др.]; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью «Микро и наноголографические системы» (ООО «МНГС») (RU). 2015133035/12; заявл. 07.08.2015; опубл. 20.01.2016.

11. Пат. 161122 Российская Федерация, F41G 1/12 (2006.01). Оптическая схема компактного коллиматорного прицела на основе объёмной голографической дифракционной решётки / Ковалев М.С. [и др.]; заявитель и патентообладатель Ковалев М.С. [и др.]. 2015133037/12; заявл. 07.08.2015; опубл. 10.04.2016.