

33. Голографический прицел световодного типа с синтезированным зрачком

С. Н. Корешев^{1,2}, М. К. Шевцов²

¹ Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики, Санкт-Петербург, Россия

² АО «Государственный оптический институт имени С. И. Вавилова», Санкт-Петербург, Россия

Рассмотрена принципиальная схема голографического коллиматорного прицела световодного типа с синтезированным зрачком. Даны рекомендации по расчету основных геометрических параметров прицела. Обсуждаются возможные технологии изготовления входящих в его состав голограммных элементов. Приведены описание лабораторного макета оптической системы прицела и результаты его экспериментального исследования.

Ключевые слова: Голографический коллиматорный прицел, Голограмма полного внутреннего отражения, Световод, Синтез зрачка, Расчет основных геометрических параметров оптической схемы.

Цитирование: Корешев, С. Н. Голографический прицел световодного типа с синтезированным зрачком / С. Н. Корешев, М. К. Шевцов // HOLOEXPO 2018 : XV международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2018. — С. 146–149.

Введение

Практически все известные и используемые в настоящее время схемы голографических коллиматорных прицелов обеспечивают компенсацию температурного дрейфа прицельной марки и относительно высокое, превышающее 80 %, интегральное пропускание в наблюдательном канале прицела [1–5].

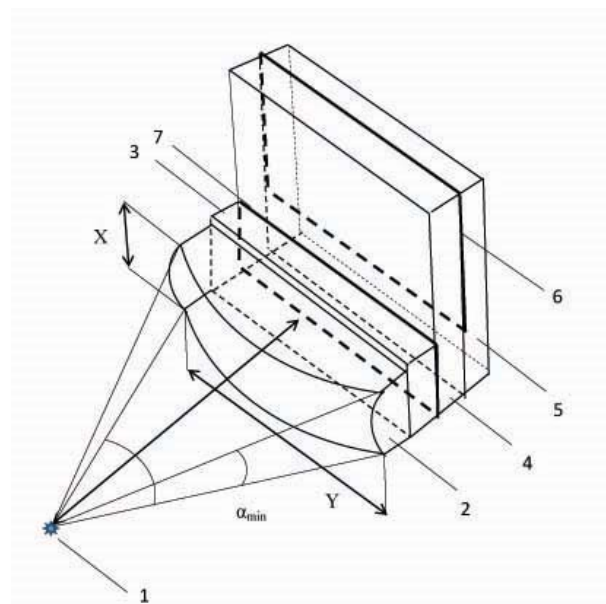
В качестве излучения в них, как правило, используется лазерный диод. При этом близкая по форме к квадрату конфигурация выходного зрачка прицела и существенно различающаяся в двух главных сечениях расходимость излучения лазерного диода обуславливают принципиальные существенные потери энергии излучения диода и, как следствие этого, быстрое истощение источников питания. Один из возможных путей устранения этого недостатка голографических прицелов состоит в синтезе выходного зрачка прицела из нескольких субапертур прямоугольной формы, минимальный размер которых превышает максимальный размер зрачка глаза оператора.

1. Схемотехническое решение прицела с синтезированным зрачком

Основная трудность при разработке принципиальной схемы голографического прицела с синтезированным зрачком заключалась в необходимости сочетания принципа синтеза зрачка с минимизацией массы и размеров прицела при обеспечении компенсации температурного дрейфа положения прицельной марки. В связи с этим за основу разработки была принята принципиальная схема прицела световодного типа [6], представленная на рис. 1.

На нем обозначены: 1 — лазерный диод, 2 — объектив, 3 — пропускающая дифракционная решетка, 4 — голограмма прицельной марки, 5 — стеклянная пластина, 6 — эмульсионный слой голограммы, 7 — эмульсионный слой дифракционной решетки. Объектив 2 может располагаться отдельно от световода, т. е. решетки 3, а может быть, и приклеен к ней. Отметим, что в соответствии с рис. 1 дифракционная решетка 3, помимо традиционной для нее функции

компенсатора температурного дрейфа положения прицельной марки осуществляет еще и функцию ввода излучения в световод образованный склееными между собой элементами 4 и 5, а голограмма прицельной марки 4, кроме формирования изображения марки еще и выполняет функцию вывода излучения из световода. С целью обеспечения защиты голограммы прицельной марки от внешних воздействий световод предлагается выполнять в виде склейки голограммы и подложки, выполненной таким образом, что носитель голограммы (голограммная структура) оказывается защищенным с двух сторон одинаковыми стеклянными пластинами. Реализуемый в световоде ход лучей поясним с помощью рис. 2. На этом рисунке представлены: 1 — плоская голографическая дифракционная решетка пропус-



1 — лазерный диод, 2 — объектив, 3 — пропускающая дифракционная решетка, 4 — голограмма прицельной марки, 5 — стеклянная пластина, 6 — эмульсионный слой голограммы, 7 — эмульсионный слой дифракционной решетки

Рис. 1. Принципиальная схема голографического прицела световодного типа с синтезированным зрачком

кающего типа с носителем голограммы, располагаемым внутри склейки подложки решетки с пластиной 2; 2 и 3 — составляющие световод склеенные друг с другом защитное стекло и подложка голограммы, имеющие одинаковые размеры и изготовленные из одного и того же стекла; 4 — носитель голограммы прицельной марки, находящийся внутри склейки пластин 2 и 3, d — толщина склейки пластин 2 и 3; D — размер элементарной субапертуры зрачка; α — угол дифракции излучения на структуре дифракционной решетки, превышающий по величине угол полного внутреннего отражения материала пластин 2 и 3.

В соответствии с рис. 2 голографическая дифракционная решетка пропускающего типа приклеена к световоду, выполненному в виде склейки 2-х стеклянных пластин одна из которых содержит на своей поверхности голограмму прицельной марки. Она выполнена в виде обладающей угловой селективностью пропускающей голограммы с несущей пространственной частотой, равной частоте дифракционной решетки и удовлетворяет условию

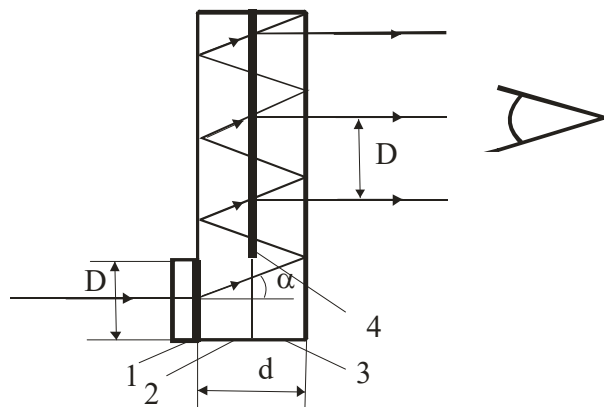
$$v_g = v_h \geq \frac{\sin \alpha_f}{\lambda_n}, \quad (1)$$

где v_g и v_h — несущие пространственные частоты дифракционной решетки и голограммы прицельной марки, соответственно, α_f — угол полного внутреннего отражения в материале световода, λ_n — длина волны источника излучения в материале световода. Апертуры дифракционной решетки и голограммы прицельной марки пространственно разнесены по поверхности световода так, что плоскости их дифракционных сечений параллельны. Линейная апертура дифракционной решетки связана с угловой апертурой источника излучения соотношениями $X \approx 2F\alpha_{\min}$, $Y \approx 2F\alpha_{\max}$, где X , Y — линейные размеры апертуры дифракционной решетки в дифракционной плоскости, соответственно, F — фокусное расстояние коллимационной формирующей системы, $\alpha_{\min}$ и $\alpha_{\max}$ — минимальная и максимальная угловые апертуры источника излучения в двух его главных сечениях. Линейная апертура голограммы прицельной марки равна размеру выходного зрачка прицела. Величины апертур X и Y связаны с толщиной световода и диаметром зрачка глаза оператора соотношениями

$$X \approx 2d \operatorname{tg} \alpha_f, \quad X, Y \geq s, \quad (2)$$

где d — толщина световода, s — диаметр зрачка глаза оператора.

Одинаковая яркость изображений прицельной марки, формируемых элементарными субапертурами голограммы, достигается за счет малой, как правило, лежащей в диапазоне 1–5 %, дифракционной эффективности голограммы, формирующей изображение прицельной марки. Отметим, что именно такие же значения дифракционной эффективности голограммы ис-



1 — плоская голографическая дифракционная решетка пропускающего типа, 2 и 3 — составляющие световод склеенные друг с другом защитное стекло и подложка голограммы, 4 — носитель голограммы прицельной марки, d — толщина склейки пластин 2 и 3, D — размер элементарной субапертуры зрачка; α — угол дифракции излучения на структуре дифракционной решетки

Рис. 2. Ход лучей в световоде

пользуются во всех известных конструкциях голографических прицелов с целью обеспечения требуемого высокого интегрального коэффициента пропускания наблюдательного канала. Для регистрации голографической решетки и голограммы прицельной марки на коммерчески доступных голографических фотопластинках ПФГ-03М толщину световода следует положить равной 4,0 мм, т. е. удвоенной толщине стеклянных подложек фотопластинок. Тогда при излучении лазерного диода с длиной волны 0,65 мкм и максимальном диаметре зрачка оператора 8 мм угол дифракции голографической решетки должен составлять 49° , а ее пространственная частота должна быть примерно 1700 мм^{-1} . Отметим, что при такой относительно высокой пространственной частоте и толщине носителя голограммы 3–5 мкм обеспечение требуемой высокой угловой селективности голограмм не вызывает никаких затруднений.

2. Возможные технологические решения

С точки зрения технологии при изготовлении голограммных структур для прицела световодного типа с синтезированным зрачком наибольшие трудности вызывает регистрация голограмм полного внутреннего отражения. Поскольку формирование голографических полей при записи требуемых для реализации прицела голограммных структур должно осуществляться двумя пучками лучей, один из которых падает на плоскость регистрации голограмм, практически, по нормали, а второй — под углом, превышающим угол полного внутреннего отражения для регистрирующей среды, то тут возможны два следующих технологических решения. Во-первых, можно осуществлять регистрацию голограммных структур вне режима полного внутреннего отражения, т. е. регистрировать голограммные структуры при требуемом угле схождения пучков лучей, но при углах падения каждого из них на плоскость регистрации под углами, отличными от тре-

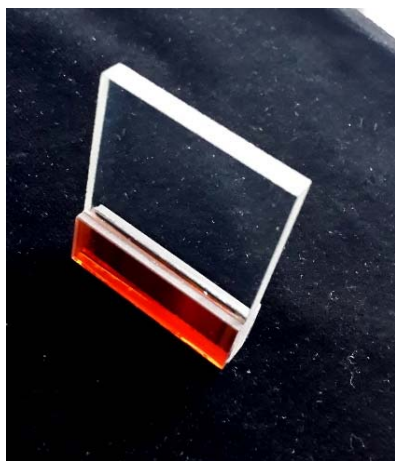


Рис. 3. Фотография макета оптической системы голографического прицела световодного типа с синтезированным зрачком

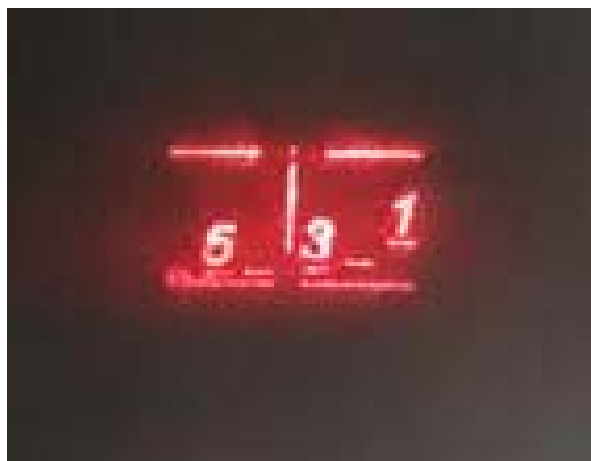


Рис. 4. Фотография сформированного макетом оптической системы изображения прицельной марки

буемых углов. При этом для обеспечения максимальной дифракционной эффективности голограммных структур в геометрии их восстановления, используемой в схеме прицела, придется обеспечить управляемый поворот страт голограммных структур во время их фотохимической обработки. Это можно сделать, например, за счет усадки регистрирующей среды, т. е. за счет уменьшения ее толщины, в процессе сушки голограммных структур. Расчеты, проведенные для голографического прицела световодного типа с синтезированным зрачком, показали, что реализация описанной выше технологии регистрации голограммных структур потребует обеспечения более чем 2-х кратного уменьшения толщины регистрирующей среды в процессе ее фотохимической обработки. Второе возможное технологическое решение для регистрации голограммных структур для прицела световодного типа с синтезированным зрачком основано на использовании стеклянного клина в схеме регистрации голограммных структур. Так при рабочей длине волны прицела 0,65 мкм, длине волны записи голограммных структур 0,64 и несущей пространственной частоте голограммных структур 1700 мм^{-1} применение при регистрации голограммных структур накладываемой на иммерсии на регистрирующую среду пластины с углом клина 14° позволяет уйти при записи голограммных структур от режима полного внутреннего отражения и обеспечить требуемые с точки зрения угловой селективности геометрические параметры схем записи и восстановления структур.

3. Макет оптической системы голографического прицела световодного типа и его предварительные испытания

Справедливость описанных в настоящей работе схемных и технологических решений была подтверждена в ходе успешных испытаний лабораторного макета оптической системы прицела, собранного в соответствии со схемой [7], представленной на рис. 2. Для создания макета на коммерчески доступных фотопла-

стинках ПФГ-03М были изготовлены образцы голограмм, формирующих изображение прицельной марки, и дифракционных решеток. Их регистрация осуществлялась в схеме записи с оптическим клином. Фотохимическая обработка дифракционных решеток проводилась в проявителе ГП [8], а фотохимическая обработка голограмм, формирующих изображение прицельной марки, проводилась по методу желатины, сенсibilизированной серебром [9]. Собранный на основе описанных дифракционных элементов макет оптической системы прицела включал в себя световод, представляющий собой заклеенную покровным стеклом со стороны желатины квазиобъемную голограмму, и работающую на пропускание дифракционную решетку, приклеенную к световоду со стороны покровного стекла. Отметим, что в качестве покровного стекла при этом использовалась отмытая от фотоэмульсии подложка фотопластинки. Фотография собранного макета оптической системы голографического прицела световодного типа представлена на рис. 3. Исследование собранного макета сводилось, в основном, к визуальной оценке качества формируемого оптической системой прицела изображения прицельной марки и к измерению оптических характеристик канала.

Исследование собранного макета сводилось, в основном, к визуальной оценке качества формируемого оптической системой прицела изображения прицельной марки и к измерению оптических характеристик канала наблюдения цели. Изображение формируемой макетом прицельной марки представлено на рис. 4. Проведенные исследования макета оптической системы прицела показали, что по яркости прицельной марки, прозрачности световода и его устойчивости к воздействию УФ излучения канал наблюдения цели прицела световодного типа удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к коллиматорным голографическим прицелам. При этом измеренные оптические характеристики канала наблюдения цели исследо-

ванного макета практически не отличались от соответствующих характеристик макета прицела с фокусирующей дифракционной решеткой [4, 5].

Заключение

Описана предложенная и запатентованная принципиальная схема голографического коллиматорного прицела световодного типа с синтезированным зрачком.

Рассмотрены технические и технологические решения, позволившие изготовить входящие в состав прицела дифракционные оптические элементы и на их основе собрать и исследовать макет оптической системы голографического коллиматорного прицела световодного типа. Полученные результаты подтвердили перспективность и эффективность предложенной оптической схемы голографического прицела.

Список источников

- [1] **Патент № 2 355 989 РФ.** Способ компенсации изменения положения прицельного знака и голографический коллиматорный прицел / М. С. Ковалев, В. И. Козинцев, Д. С. Лушников, В. В. Маркин, С. Б. Одинокое. — Оpubл. 01.10.2007.
- [2] **Patent № 6 490 060 US.** Lightweight holographic sight / M. Anthony, T. Northville, E. J. Sieczka. — Publ. 03.12.2002.
- [3] **Патент № 135 426 РФ.** Голографический коллиматорный прицел / С. Н. Корешев, С. С. Квитко, М. К. Шевцов. — Оpubл. 10.12.2013.
- [4] **Корешев, С. Н.** Оптические системы голографических коллиматорных прицелов / С. Н. Корешев, М. К. Шевцов // Оптический журнал. — 2015. — Том 82. — № 9. — С. 22–28.
- [5] **Koreshev, S. N.** Holographic Collimator Sight with Focusing Grating / S. N. Koreshev, M. K. Shevtsov // Университетский научный журнал. — 2016. — № 24. — С. 41–49.
- [6] **Патент № 2 647 516 РФ.** Голографический коллиматорный прицел с синтезированным зрачком / С. Н. Корешев, М. К. Шевцов. — Оpubл. 16.03.2018. — Бюл. № 8.
- [7] **Корешев, С. Н.** Голографический прицел световодного типа с синтезированным зрачком / С. Н. Корешев, М. К. Шевцов // Оптический журнал. — 2018. — Том 85. — № 3. — С. 38–42.
- [8] **Усанов, Ю. Е.** Регистрирующие среды для голографии / Ю. Е. Усанов. — Л.: Наука, 1975. — 98 с.
- [9] **Belendez, A.** High-efficiency silver-halide sensitized gelatin holograms with low adsorption and scatter / A. Belendez, C. Neipp // Journal of modern optics. — 1998. — Vol. 45. — № 10. — P. 1985–1992.

Waveguide type holographic sight with synthetic pupil

S. N. Koreshev^{1,2}, M. K. Shevtsov²

¹ Saint Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Saint Petersburg, Russia

² S. I. Vavilov State Optical Institute, Saint Petersburg, Russia

Layout of the holographic waveguide type collimator sight with synthetic pupil is considered. Recommendations on the calculation of the main geometric parameters of the sight were done. Possible manufacturing techniques of its hologram structures are proposed.

Keywords: Holographic waveguide type collimator sight, Total internal reflection hologram, Waveguide, Synthesis of the pupil, Layout, Calculation of the sight main geometric parameters.