

КОЛЮЧКИН ВАСИЛИЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**МЕТОДЫ И ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ
КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ЗАЩИТНЫХ ГОЛОГРАММ**

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 бюджетном 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

Официальные оппоненты: Лукин Анатолий Васильевич,
доктор технических наук, профессор
АО «НПО «Государственный институт
прикладной оптики», г. Казань

Краснов Виталий Вячеславович, кандидат
физико-математических наук, доцент
НИЯУ МИФИ, г. Москва

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Научно-технический центр
«АТЛАС», г. Москва

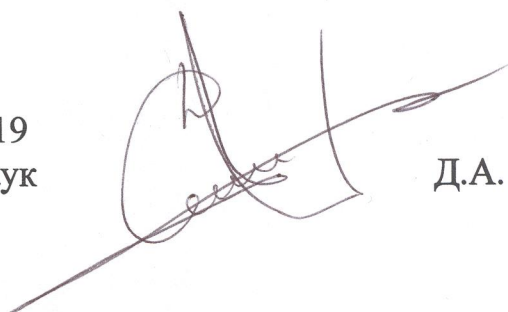
Защита диссертации состоится «17» мая 2017 года в 10:00 часов
на заседании диссертационного совета Д 212.141.19 в Московском
государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу:
105005, г. Москва, 2-ая Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

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

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

Автореферат разослан «___» _____ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.141.19
кандидат физико-математических наук



Д.А. Семеренко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время для защиты продукции и документов от подделки во всем мире широко используются защитные голограммы (ЗГ), представляющие собой рельефно-фазовые голограммы, выполненные на тонкопленочном полимерном носителе. ЗГ формируют при естественном или искусственном освещении голографические изображения с особыми оптическими эффектами объёмности, движения, изменения цвета и др. Из-за сложности и несовершенства современного уровня технологии изготовления ЗГ параметры профиля дифракционных решёток (ДР) реальных ЗГ в той или иной степени отличаются от расчётных значений. Это приводит к снижению качества изображений, формируемых голограммами, и, как следствие, к снижению защитных свойств ЗГ. Тиражи защитных голограмм достигают сотен тысяч и миллионов штук, поэтому контроль качества изготавливаемых ЗГ является важной технико-экономической задачей.

На отечественных предприятиях контроль качества ЗГ осуществляется на основе экспертных оценок. Результаты такого контроля являются субъективными и не могут считаться достоверными. В настоящее время не определены критерии, позволяющие оценить качество изготавливаемых ЗГ. Для осуществления объективного контроля необходимо ввести критерий, позволяющий оценивать качество путём сравнения значений геометрических параметров профиля дифракционных решёток контролируемой и эталонной защитных голограмм. Такими параметрами являются глубина и пространственный период профиля ДР.

Значительный вклад в исследование и разработку методов контроля ЗГ внесли русские учёные, в том числе Бессмельцев В.П., Одинокоев С.Б., Полещук А.Г., Сойфер В.А. Среди зарубежных учёных следует отметить Беяцкого М.А., Yeh S.I., Renesse R.I., Yamasaki M., Vu T.V.

Существуют объективные и субъективные методы контроля ЗГ, основанные на прямых и косвенных измерениях параметров профиля дифракционных решёток ЗГ. Известные методы и аппаратура в основном предназначены для контроля подлинности, но не качества изготавливаемых защитных голограмм. Постановка задач контроля подлинности и контроля качества отличается.

Известные методы контроля ЗГ на основе прямых измерений геометрических параметров профиля ДР с помощью атомно-силовых микроскопов являются трудоёмкими, что недопустимо в технологическом процессе производства ЗГ. В настоящее время не разработаны методы для осуществления оперативного контроля указанных параметров формы профиля ДР ЗГ. Поэтому остаётся потребность в методах оперативного контроля качества ЗГ, а также в специализированной аппаратуре, реализующей данные методы.

Из изложенного выше следует, что тема диссертации, посвящённая разработке методов и оптико-электронных приборов для контроля качества защитных голограмм, является актуальной.

Целью диссертационной работы является разработка методов контроля качества защитных голограмм и оптико-электронных приборов, предназначенных для реализации оперативного контроля качества.

Для достижения цели диссертации поставлены и решены следующие **задачи**:

- предложен критерий принятия решения о качестве защитных голограмм (ЗГ);
- исследована зависимость пространственного распределения интенсивности в главных максимумах дифракционной картины от геометрических параметров профиля дифракционных решёток и параметров поля случайных искажений этого профиля;
- разработаны методы, позволяющие осуществлять автоматизированный контроль качества мастер-матриц, рабочих матриц и серийных образцов ЗГ;
- разработаны принципы действия оптико-электронных приборов, предназначенных для контроля качества ЗГ при их изготовлении, и методика проектирования таких приборов;
- справедливость основных теоретических положений диссертации подтверждена экспериментальными исследованиями на макетном образце оптико-электронного прибора контроля качества ЗГ.

Методы исследований

Для решения поставленных задач использовались методы скалярной теории дифракции, цифровой обработки изображений, теории случайных процессов и полей.

Научная новизна работы заключается в следующем:

- предложен критерий принятия решения о качестве ЗГ на основе сравнения значений параметров профиля дифракционных решёток контролируемого и эталонного образцов ЗГ;
- впервые выведены аналитические выражения, устанавливающие связь между пространственным распределением интенсивности в главных максимумах дифракционной картины с параметрами поля случайных искажений профиля ДР;
- разработан метод контроля качества защитных голограмм на основе косвенных измерений пространственного периода и глубины профиля дифракционных решёток по распределению интенсивности в главных максимумах дифракционной картины;
- предложена методика объективного контроля качества защитных голограмм, которая базируется на прямых и косвенных измерениях параметров профиля дифракционных решёток и предназначена для контроля качества защитных голограмм на всех стадиях технологического процесса их изготовления, включая изготовление мастер-матриц, рабочих матриц и серийных образцов защитных голограмм.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в том, что разработанные методы контроля качества защитных голограмм и оптико-электронные приборы, реализованные по предложенным оригинальным функциональным схемам, позволяют обеспечить оперативность контроля качества защитных голограмм и снизить потери от брака при их серийном производстве на предприятиях АО «Гознак», АО «НПО «Криптен», ФГУП «НТЦ «Атлас», ООО «ХолоГрэйт» и др.

Положения, выносимые на защиту:

- метод оперативного контроля качества защитных голограмм на основе косвенных измерений позволяет определять пространственный период и глубину профиля дифракционных решёток защитных голограмм с погрешностями, не превышающими нескольких нанометров;
- методика контроля качества защитных голограмм, основанная на прямых и косвенных измерениях параметров профиля дифракционных решёток, позволяет контролировать их качество при изготовлении;
- полученные аналитические выражения устанавливают связь между пространственным распределением интенсивности в главных максимумах дифракционной картины и параметрами поля случайных искажений профиля дифракционных решёток.

Достоверность выводов диссертационной работы обеспечивается согласованностью теоретических положений и результатов экспериментальных исследований.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы доложены на 6 международных конференциях: SPIE Optics + Optoelectronics (Прага, Чехия, 2013), 3-ей и 4-ей Международных конференциях по фотонике и информационной оптике (НИЯУ МИФИ, Москва, 2014, 2015), 10th International Symposium on Display Holography (Санкт-Петербург, 2015), 12-ой и 13-ой Международных конференциях «ГОЛОЭКСПО» (Казань, 2015; Ярославль, 2016).

Внедрение результатов работы. Результаты диссертационной работы внедрены на АО «Гознак», получен акт о внедрении.

Публикации результатов. Основные результаты диссертационной работы изложены в 14 публикациях общим объёмом 4,1 п.л., в том числе в 5 статьях, опубликованных в журналах, входящих в Перечень ВАК РФ.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы. Она изложена на 163 страницах машинописного текста, содержит 78 рисунков и 21 таблицу, список литературы включает 51 библиографическое описание.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи работы, раскрыта ее научная новизна и практическая ценность, сформулированы основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе на основе обзора литературных источников в области контроля подлинности и качества защитных голограмм (ЗГ) показано, что все известные методы основаны на сравнении контролируемых образцов с эталоном. Но в настоящее время критерий качества ЗГ в литературе не определён. В диссертации предложен критерий качества ЗГ, который определяет допустимые отклонения значений параметров профиля дифракционных решёток контролируемого образца от значений параметров эталонного образца ЗГ.

На основе анализа известных методов предложена классификация методов контроля ЗГ по способам измерения параметров и характеристик. Согласно этой классификации, различают:

- методы контроля качества ЗГ на основе прямых измерений, в том числе, измерений топологии пространственного распределения элементарных дифракционных решёток ЗГ, а также их параметров;

- методы контроля качества ЗГ на основе косвенных измерений, позволяют оценить значения параметров профиля ДР ЗГ на основе анализа результатов измерения параметров, характеризующих распределение интенсивности дифракционного поля, возникающего при освещении поверхности ЗГ или её фрагментов.

Методы контроля качества ЗГ на основе прямых измерений позволяют определить пространственный период, глубину, угловую ориентацию, количество штрихов рельефа ДР и параметры, характеризующие форму профиля ДР. Для сравнения с эталоном используют разницу значений параметров контролируемого образца и эталона. Недостатками этого метода является трудоёмкость процесса измерений параметров всех ДР, образующих ЗГ.

Известные реализации метода контроля на основе косвенных измерений позволяют оценить дифракционную эффективность, но из результатов таких измерений сложно извлечь достоверную информацию о параметрах профиля ДР. При заведомо известной форме профиля рельефа, которую обычно принимают синусоидальной с известным периодом, интенсивность главных максимумов дифракционной картины зависит от глубины профиля ДР. Реальная форма профиля ДР, как правило, отличается от синусоидальной и имеет искажения, которые носят случайный характер. Существующие в настоящее время методы контроля на основе косвенных измерений не учитывают этих факторов, являющихся существенными при контроле качества изготавливаемых ЗГ.

В главе приведён обзор аппаратуры, предназначенной для контроля ЗГ на основе прямых и косвенных измерений, из которого следует, что существующие приборы не обеспечивают оперативности контроля качества изготавливаемых ЗГ.

На основе результатов, изложенных в первой главе, сформулирована цель и задачи диссертации.

Вторая глава посвящена разработке методики контроля качества защитных голограмм. В соответствии с поставленной задачей методика контроля ЗГ должна быть основана на объективных методах и обеспечивать выполнение оперативного контроля на всех этапах технологического цикла изготовления ЗГ. Задачами контроля качества ЗГ являются:

- обнаружение локальных дефектов профиля дифракционных решёток мастер-матриц, рабочих матриц и серийных образцов ЗГ;

- анализ дефектов профиля ДР для принятия решения о годности ЗГ, а также выявление уникальных особенностей геометрических параметров профиля;

- выборочный контроль фрагментов ЗГ по параметрам профиля ДР.

Профиль ДР ЗГ характеризуется такими параметрами как пространственный период T_0 , глубина d , угловая ориентация φ , N – количество штрихов, так и форма профиля. Для обоснования метода контроля качества ЗГ на основе косвенных

измерений в работе проведено исследование влияния перечисленных параметров профиля ДР на пространственное распределение интенсивности в главных максимумах дифракционной картины.

Известны математические выражения, описывающие в рамках скалярной теории явление дифракции на отражающей фазовой дифракционной решётке с синусоидальным профилем. Получены аналитические выражения для более общего случая, когда профиль дифракционных решёток описывается периодической функцией произвольного вида

$$Z(x) = Z_0 \cdot \left[a_0 + \sum_{k=1}^K a_k \cos\left(\frac{2\pi kx}{T_0}\right) \right],$$

где Z_0 – амплитуда профиля ДР, a_k – амплитуды гармоник профиля, нормированные на глубину d профиля ДР.

Разработан алгоритм и программа для расчёта распределения интенсивности дифракционного поля для отражающей ДР и проведены исследования с целью определения зависимости интенсивности в главных максимумах от значений геометрических параметров профиля ДР. На Рис. 1, в качестве примера, приведены графики зависимости значений интенсивности в первом главном максимуме от глубины синусоидального профиля ДР для различных длин волн излучения. Из этих зависимостей следует принципиальная возможность контроля параметров профиля ДР на основе результатов измерения распределения интенсивности в главных максимумах дифракционной картины, то есть косвенных измерений параметров профиля ДР.

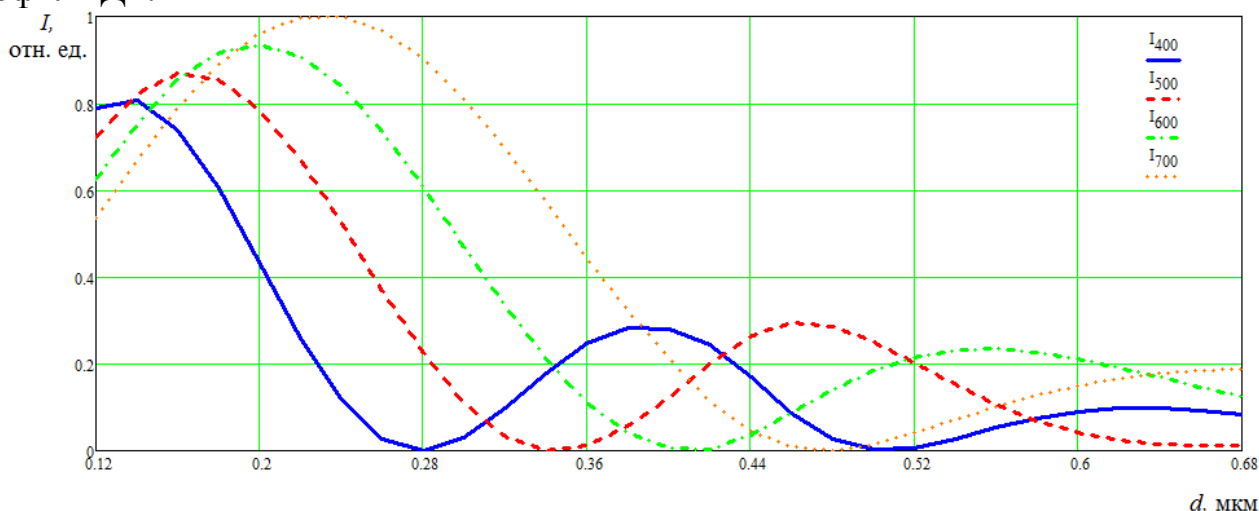


Рис. 1. Графики зависимостей распределения интенсивности в 1-ом главном максимуме от глубины рельефа ДР при подсветке под углом 39° , периоде ДР $T_0 = 1$ мкм и длинах волн излучения $\lambda = 400, 500, 600, 700$ нм

Но реальный профиль ДР отличается от синусоидального и представляет собой реализацию случайного поля. Поэтому окончательный ответ на вопрос о возможности реализации метода контроля качества ЗГ на основе косвенных измерений параметров профиля элементарных ДР можно дать только после анализа

влияния случайных искажений профиля на распределение интенсивности дифрагирующего поля в зоне Фраунгофера.

В рамках скалярной теории дифракции было разработано математическое описание явления дифракции плоской монохроматической волны на отражающей ДР, форма профиля которой имеет случайные отклонения от заданного идеального профиля.

С целью упрощения математических выкладок рассмотрен одномерный случай, когда на отражающую рельефно-фазовую ДР под углом α падает плоская монохроматическая волна с амплитудой A_0 . Искажения формы профиля ДР предложено рассматривать как реализации $\xi(x)$ аддитивной помехи, являющейся однородным случайным гауссовым полем с нулевым математическим ожиданием $\langle \xi(x) \rangle = 0$, дисперсией $\sigma_\xi^2 = \langle \xi^2(x) \rangle$ и нормированной корреляционной функцией $\rho_\xi(x_1 - x_2)$.

Выражение для расчёта пространственного распределения интенсивности в дифракционном поле дифракции имеет вид

$$I(\beta) = I_0 \cdot I_1(\beta) \cdot I_2(\beta),$$

где $I_0 = |A_0|^2$ – интенсивность падающей волны, $I_1(\beta)$ – интенсивность дифрагированной волны в пределах одного периода ДР с учётом случайных искажений формы профиля, $I_2(\beta)$ – интенсивность дифрагированной волны на N периодах дифракционной решётки, причём

$$I_2(\beta) = \frac{\sin^2[\pi N \Delta_0(\beta)/\lambda]}{\sin^2[\pi \Delta_0(\beta)/\lambda]}.$$

Выведено выражение для распределения интенсивности с учётом искажений

$$I_1(\beta) = \int_0^T \int_0^T \exp\{ik[\Delta_{1x}(x_1) - \Delta_{1x}(x_2)]\} \exp\left\{-\frac{2\pi^2 \sigma_\Delta^2(x_1, x_2)}{\lambda^2}\right\} dx_1 dx_2,$$

где $\sigma_\Delta^2(x_1, x_2)$ – дисперсия флуктуаций оптической разности хода, которая вычисляется по формуле

$$\sigma_\Delta^2(x_1, x_2) = \sigma_\xi^2 \left\{ [f^2(x_1) + f^2(x_2)] - 2f(x_1)f(x_2)\rho_\xi(x_1 - x_2) \right\},$$

$f(x)$ – частная производная от функции, описывающей оптическую разность хода и определяемой выражением

$$f(x) = \frac{\partial \Delta \xi_{1x}(x, \xi)}{\partial \xi} \bigg|_{\xi=0}.$$

Для определения параметров, характеризующих форму профиля ДР, в том числе параметров случайных искажений, в диссертации разработана методика обработки данных прямых измерений. Предлагаемая методика основана на аппроксимации реального профиля $Z^P(x, y)$ ДР с габаритными размерами l_x и l_y , финитной периодической функцией $Z^H(x, y)$, описывающей идеализированный профиль

$$Z^H(x, y) = \left[C \cdot x + A_1 \cos\left(2\pi \frac{x}{T_0} + \varphi_0\right) + A_2 \cos\left(2\pi \frac{2 \cdot x}{T_0} + 2\varphi_0\right) + A_3 \cos\left(2\pi \frac{3 \cdot x}{T_0} + 3\varphi_0\right) + \right. \\ \left. + A_4 \cos\left(2\pi \frac{4 \cdot x}{T_0} + 4\varphi_0\right) + A_5 \cos\left(2\pi \frac{5 \cdot x}{T_0} + 5\varphi_0\right) \right] \text{rect}\left(\frac{x}{l_x}, \frac{y}{l_y}\right),$$

где $C, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, T_0, \varphi_0$ – коэффициенты аппроксимации идеализированного профиля, T_0 – период, φ_0 – начальная фаза профиля ДР.

Функция $Z^H(x, y)$ описывает профиль ДР, который минимально, в смысле среднеквадратического отклонения (СКО) σ_m , отличается от реального профиля. Поэтому коэффициенты аппроксимации определяются из условия

$$\sigma_m^2 = \min_{\vec{P}} \{\sigma_p^2\} = \min_{\vec{P}} \left\{ \sum_{i=1, j=1}^{MN} [Z_{i,j}^P - Z_{i,j}^H]^2 \right\}.$$

Параметры аппроксимации идеализированного профиля представлены в виде вектора $\vec{P} = (C, A_1, A_2, A_3, A_4, A_5, T_0, \varphi_0)^T$.

На основе обработки результатов измерений профилей реальных ДР показано, что в общем случае нормированную корреляционную функцию случайных искажений формы профиля ДР ЗГ можно аппроксимировать функцией вида

$$\rho(x_1 - x_2) = \exp\left(-\frac{|x_1 - x_2|}{k_p}\right) \left\{ (1 - b_1 - b_2) + b_1 \cos\left[2\pi \frac{(x_1 - x_2)}{\gamma_1 T}\right] + b_2 \cos\left[2\pi \frac{(x_1 - x_2)}{\gamma_2 T}\right] \right\}.$$

Параметры, характеризующие нормированную корреляционную функцию случайных искажений удобно представить составляющими вектора

$$\vec{P}_N = (\sigma_\xi, k_p, b_1, b_2, \gamma_1, \gamma_2)^T,$$

где σ_ξ – СКО случайных искажений, $k_p, b_1, b_2, \gamma_1, \gamma_2$ – параметры аппроксимации нормированной корреляционной функции.

Методика обработки данных прямых измерений формы профиля ДР была использована для количественной оценки результатов контроля параметров элементарных ДР ЗГ в процессе их тиражирования. Износ рабочих матриц ЗГ оценивался по измеренным значениям геометрических параметров профиля ДР образцов ЗГ. В процессе исследований было обработано 80 образцов ЗГ с одинаковым дизайном. Образцы были получены путём вырезки из рулона отпечатанных ЗГ, которые делались в начале и конце тиража. Установлено, что относительное увеличение пространственного периода ДР образцов ЗГ к концу тиража достигает 4%, а относительное уменьшение глубины рельефа ДР образцов ЗГ к концу тиража достигает 20%. На основе анализа результатов изменений параметров элементарных дифракционных решёток ЗГ обоснованы допустимые значения погрешностей ОЭП, которые могут быть использованы для контроля ЗГ.

Предложенная методика позволяет получить исходную информацию о форме профиля и параметрах случайных искажений формы профиля дифракционных решёток ЗГ с произвольным дизайном. Но метод прямых измерений, позволяющий получить наиболее полную информацию о параметрах микрорельефа, очень

трудоёмок. Поэтому, в качестве альтернативы, предложен метод контроля на основе косвенных измерений. Для косвенных измерений предлагается использовать калибровочную зависимость, которая определяется отношением зависимостей интенсивности в первом и втором главных максимумах дифракционной картины от глубины микрорельефа

$$R_{21}(d) = I_2(d)/I_1(d).$$

Кроме этого, предлагается использовать подсветку ДР ЗГ под углом α к нормали, так как при этом увеличивается диапазон однозначности результатов измерения глубины рельефа, по сравнению с подсветкой ДР по нормали. Примеры графиков калибровочных зависимостей для случаев подсветки по нормали $\alpha = 0$ и подсветки под углом к нормали $\alpha = 60^\circ$ представлены на Рис. 2,а и Рис. 2,б соответственно.

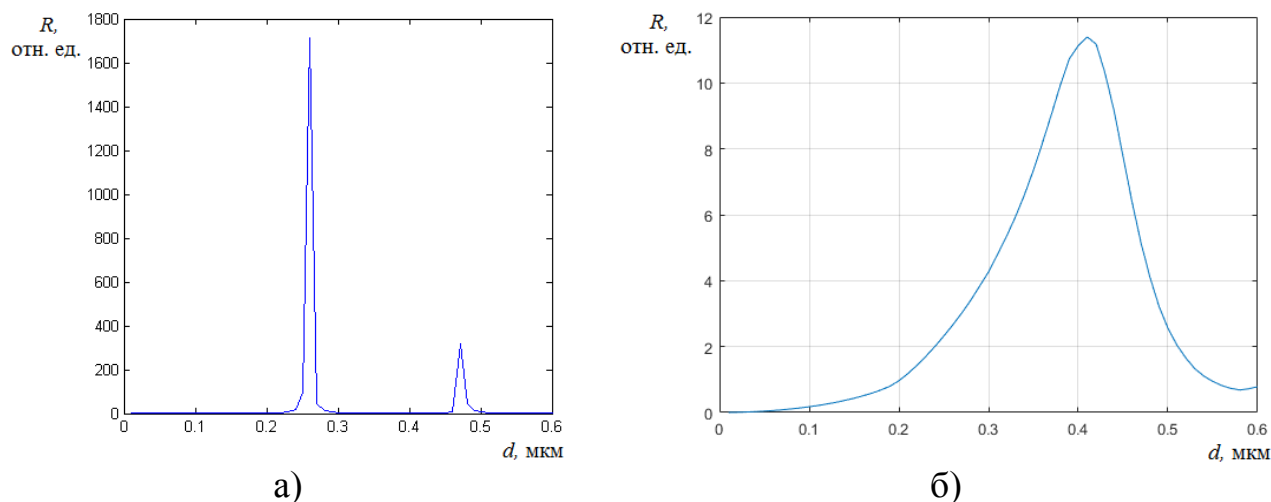


Рис. 2. Графики калибровочных зависимостей при: а) $\alpha = 0$; б) $\alpha = 60^\circ$

На Рис. 3,а и Рис. 3,б представлены графики калибровочных зависимостей при отсутствии и наличии искажений «синусоидального» профиля ДР. Калибровочные зависимости рассчитаны с учётом случайных искажений профиля при СКО флуктуаций, равных $\sigma_\xi = 0,015$ мкм (см. Рис. 3,а) и $\sigma_\xi = 0,02$ мкм (см. Рис. 3,б). По калибровочным зависимостям можно определить значения методической погрешности определения глубины профиля ДР, возникающей при пренебрежении случайными искажениями формы профиля. Из графиков на Рис. 3,а и Рис. 3,б следует, что для номинальной глубины профиля $d = 0,12$ мкм методическая погрешность измерения глубины в 2 раза отличается для указанных значений СКО случайных искажений, а именно: для случая (а) методическая погрешность составляет $\Delta_d \approx 0,006$ мкм, а для случая (б) – $\Delta_d \approx 0,012$ мкм. Аналогичные оценки методической погрешности были проведены для ДР с «трапецеидальным» и «гребенчатым» профилем.

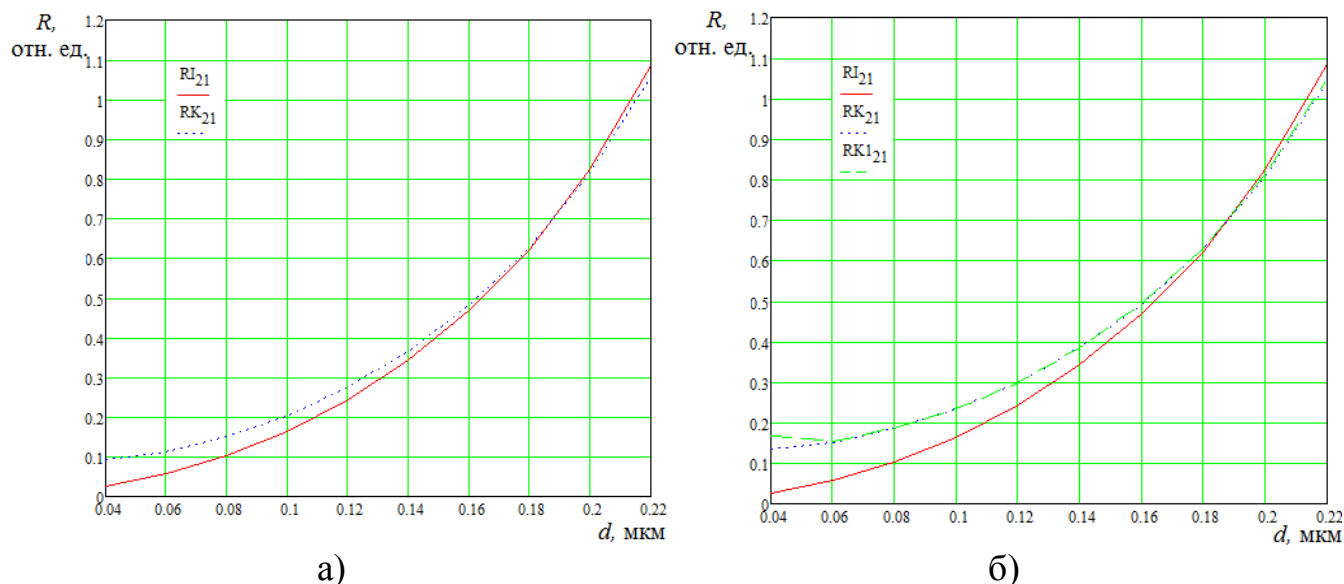


Рис. 3. Графики калибровочных зависимостей при отсутствии и наличии случайных искажений ДР с «синусоидальным» профилем

На Рис. 4,а представлены графики калибровочных зависимостей ДР с «трапецеидальным» профилем для угла $\alpha = 60^\circ$ подсветки излучением на длине волны $\lambda = 0,405$ мкм при отсутствии (сплошная линия) и наличии случайных искажений со значениями СКО, равными $\sigma_\xi = 0,01$ мкм (пунктирная линия), $\sigma_\xi = 0,015$ мкм (штриховая линия) и $\sigma_\xi = 0,02$ мкм (штрих-пунктирная линия). Калибровочные зависимости, рассчитанные с учётом случайных искажений профиля в области номинального значения глубины контролируемой ДР, значительно отличаются от идеальной калибровочной зависимости. Это отличие столь велико, что оценить глубину профиля ДР на основе измерений интенсивностей в главных максимумах дифракционной картины при таких параметрах подсветки практически невозможно.

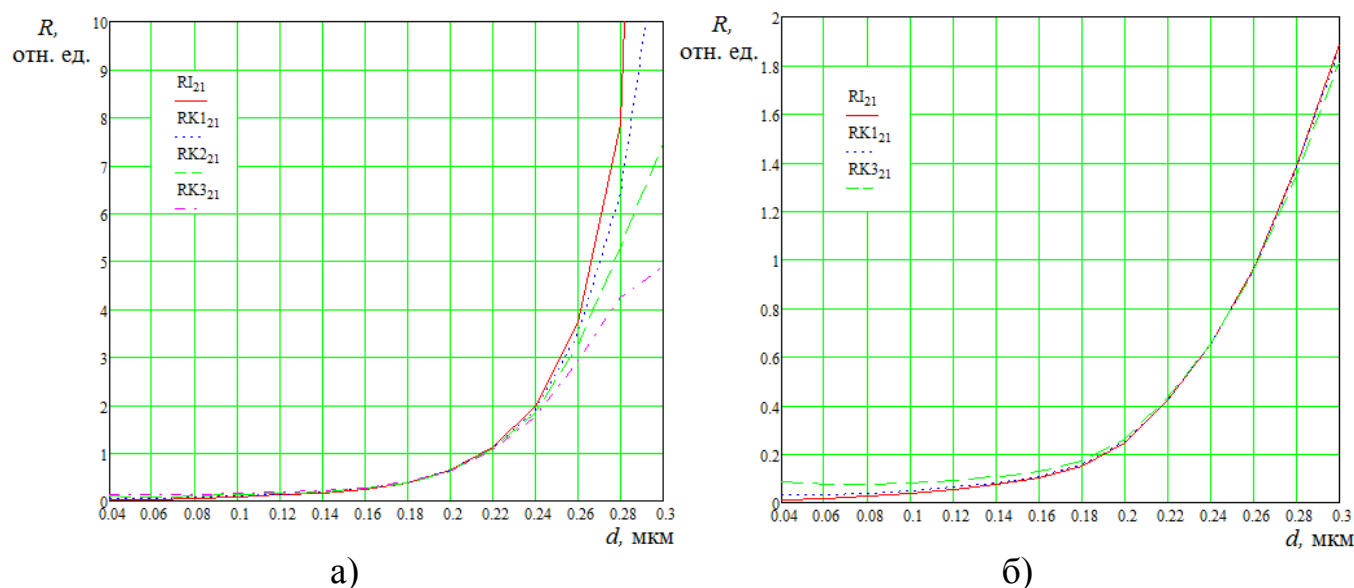


Рис. 4. Графики калибровочных зависимостей при отсутствии и наличии случайных искажений «трапецеидального» профиля

На Рис. 4,б представлены графики калибровочных зависимостей, которые рассчитаны для тех же условий, но при подсветке ДР излучением на длине волны $\lambda = 0,65$ мкм. Из графиков следует, что в данном случае методическая погрешность измерения глубины профиля в окрестности её номинального значения $d=0,30$ мкм не превышает значения $\Delta_d \approx 0,003$ мкм даже при СКО случайных искажений, равном $\sigma_\xi = 0,02$ мкм. Таким образом, за счёт выбора длины волны источника излучения и угла подсветки ДР можно минимизировать методическую погрешность измерения глубины рельефа в окрестности заданных номинальных значений.

На основе проведённых исследований обоснована методика объективного контроля качества, основные положения которой заключаются в следующем:

1. Контроль производится на всех стадиях технологического процесса;
2. Методика базируется как на прямых, так и на косвенных измерениях, причём прямые измерения используются для получения исходной информации о типовых значениях параметров формы профиля ДР;
3. При изготовлении мастер-матриц ЗГ задачами контроля являются:
 - обнаружение локальных дефектов микрорельефа;
 - измерение параметров ДР, в фрагментах микрорельефа мастер-матрицы, содержащих дефекты;
 - выборочный контроль фрагментов микрорельефа с целью определения типовых значений параметров элементарных ДР.
4. Контроль износа рабочих матриц производится путём выборочной оценки качества образцов ЗГ в процессе выпуска тиража, но с контролем образцов ЗГ пробной серии на основе прямых измерений, результаты которого используются для расчёта калибровочных зависимостей при оперативном контроле ЗГ на основе косвенных измерений.

В третьей главе изложена методика проектирования оптико-электронных приборов (ОЭП) для контроля качества защитных голограмм и результаты экспериментальных исследований макетного образца ОЭП, разработанного на основе этой методики.

Согласно изложенной во второй главе методике контроля качества защитных голограмм, на первоначальном этапе требуется проверить наличие локальных дефектов на ЗГ. Для обнаружения локальных дефектов предложено использовать оптико-электронный прибор, функциональная схема которого защищена патентом РФ № 157473.

При выборочном контроле параметров профиля ДР ЗГ предложено использовать ОЭП контроля качества защитных голограмм при подсветке когерентным излучением под углом к нормали плоскости ЗГ. Функциональная схема такого оптико-электронного прибора представлена на Рис. 5.

В состав схемы входят: 1 – блок лазерных диодов с системой формирования пучков излучения; 2 – контролируемый образец ЗГ; 3 – линейка ПЗС приёмников излучения; 4 – компьютер; 5 – блок светодиодов канала наведения; 6 – ТВ-камера канала наведения; 7 – приводы моторизированной системы линейных и угловых перемещений контролируемого образца ЗГ; 8 – контроллеры приводов моторизированной системы линейных и угловых перемещений; 9 – оптическая

головка.

При выполнении измерений с помощью линейки ПЗС приёмников регистрируются координаты порядков $m=1, 2, 3...$ главных максимумов дифракционной картины, а также значения интенсивностей в этих максимумах. По измеренным значениям в компьютере вычисляются пространственный период и глубина профиля ДР. Глубина определяется по вычисленным калибровочным зависимостям, а пространственный период T_0 рассчитывается по формуле

$$T_0 = \frac{\lambda}{|\sin \beta_1 - \sin \beta_2|},$$

где β_1 и β_2 – угловое положение первого и второго главных максимумов.

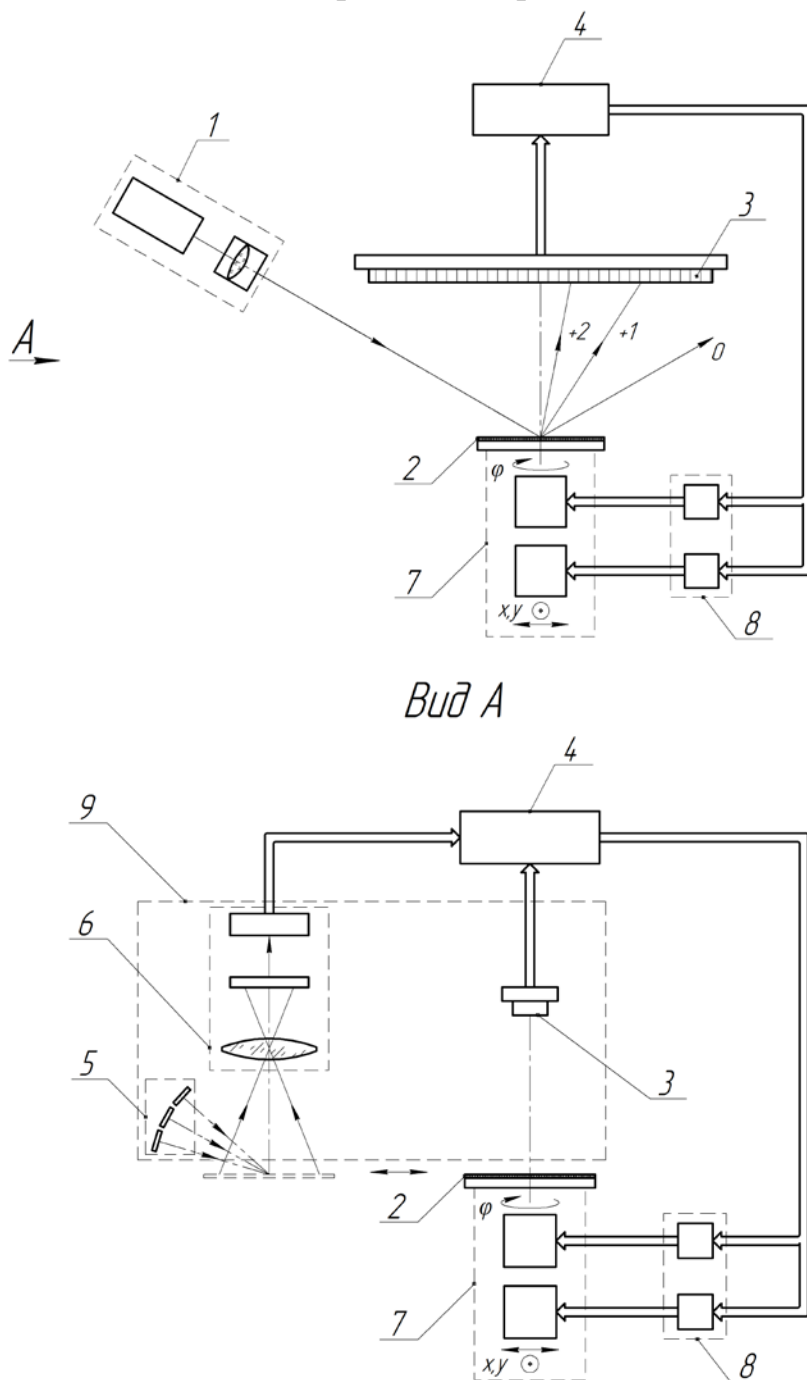


Рис. 5. Функциональная схема ОЭП для контроля качества 3Г при подсветке под углом к нормали плоскости защитной голограммы

Данная функциональная схема была взята за основу при создании макетного образца ОЭП, предназначенного для контроля ЗГ на основе метода косвенных измерений.

Разработана методика проектирования ОЭП на системотехническом уровне. Для этого на основе анализа параметров серийных образцов ЗГ были обоснованы СКО допустимой погрешности измерения пространственного периода, равное $\sigma_T^{\text{don}} \leq 0,010 \text{ мкм}$, и СКО допустимой погрешности измерения глубины профиля $\sigma_d^{\text{don}} \leq 0,006 \text{ мкм}$, а также определен перечень исходных данных для проектирования.

В методике проектирования ОЭП контроля качества ЗГ изложены рекомендации по расчёту составляющих вектора $\vec{a} = (\alpha, \lambda, h, T_x, E_{\text{П}}, P_{\text{л}})^T$ конструктивных параметров прибора, в том числе, длины волны λ и мощности $P_{\text{л}}$ излучения лазерных диодов, угла α подсветки, расстояния h от плоскости контролируемой ЗГ до плоскости линейки ПЗС. Сформулированы рекомендации по выбору линейки ПЗС приёмников, исходя из расчётных технических характеристик, таких как период T_x расположения чувствительных элементов и пороговая освещённость $E_{\text{П}}$.

Расстояние h от плоскости контролируемой защитной голограммы до плоскости линейки ПЗС выбирается из двух условий, первое из которых заключается в обеспечении регистрации главных максимумов до m -го порядка, а второе заключается в выполнении условия дифракции Фраунгофера. Эти условия имеют вид

$$h \leq \frac{l_{\text{ПЗС}}}{2 \tan \beta_{\text{max}}}; \quad h \gg \frac{(N \cdot T_x)^2}{16\lambda},$$

где $l_{\text{ПЗС}}$ – длина линейки ПЗС приёмников, T_x – период расположения чувствительных элементов, N – количество чувствительных элементов, на которые попадает излучение, β_{max} – угол дифракции m -го главного максимума.

Значение периода T_x влияет на погрешность определения пространственного периода T_0 ДР контролируемых ЗГ, так как конечные размеры чувствительного элемента вносят неопределённость в определение пространственных координат x_1 и x_2 первого и второго главных максимумов дифракционной картины в плоскости чувствительных элементов линейки ПЗС приёмников. Выражение для определения периода T_x имеет вид

$$T_x \leq \frac{\delta\beta \cdot h}{\cos^2 \beta_{\text{max}}},$$

где $\delta\beta$ – погрешность измерения угловых координат главных максимумов, которая определяется по формуле

$$\delta\beta \leq \frac{\sigma_T^{\text{don}} (\sin \beta_1 - \sin \beta_2)^2}{\cos \beta_1 - \cos \beta_2}.$$

Погрешность измерения глубины профиля ДР зависит от погрешности вычисления калибровочной зависимости $R_{21}(d)$, определяемой отношением интенсивностей первого и второго главных максимумов дифракционной картины. Кроме случайных искажений профиля, на вычисленное значение $R_{21}(d)$ влияют аддитивные помехи линейки ПЗС приёмников. При допущении о больших значениях μ_0 пикового отношения сигнала к шуму выведено выражение, позволяющее оценить погрешность вычисления отношения измеряемых величин. Это выражение имеет вид

$$\sigma_D(\mu_1) = \frac{I_1}{I_2} \cdot \left[\left(\frac{1}{\mu_1 \cdot \frac{I_2}{I_1}} - \frac{1}{\mu_1} \right)^2 + \frac{3}{4 \cdot \left(\mu_1 \cdot \frac{I_2}{I_1} \right)^2 \cdot \mu_1^2} \right]^{0,5},$$

где I_1 и I_2 – значения интенсивностей в первом и втором главных максимумах, $\mu_1 = \frac{I_1}{\sigma_N}$ – пиковое отношение сигнала к шуму, σ_N – СКО аддитивного шума.

На Рис. 6 приведены графики зависимостей СКО отношения измеряемых интенсивностей от пикового отношения сигнала к шуму. Сплошная кривая определяет эту зависимость при условии, что $I_1/I_2 = 1/0,7$, т.е. $I_1 > I_2$, а пунктирная – при обратном условии, когда $I_2 > I_1$.

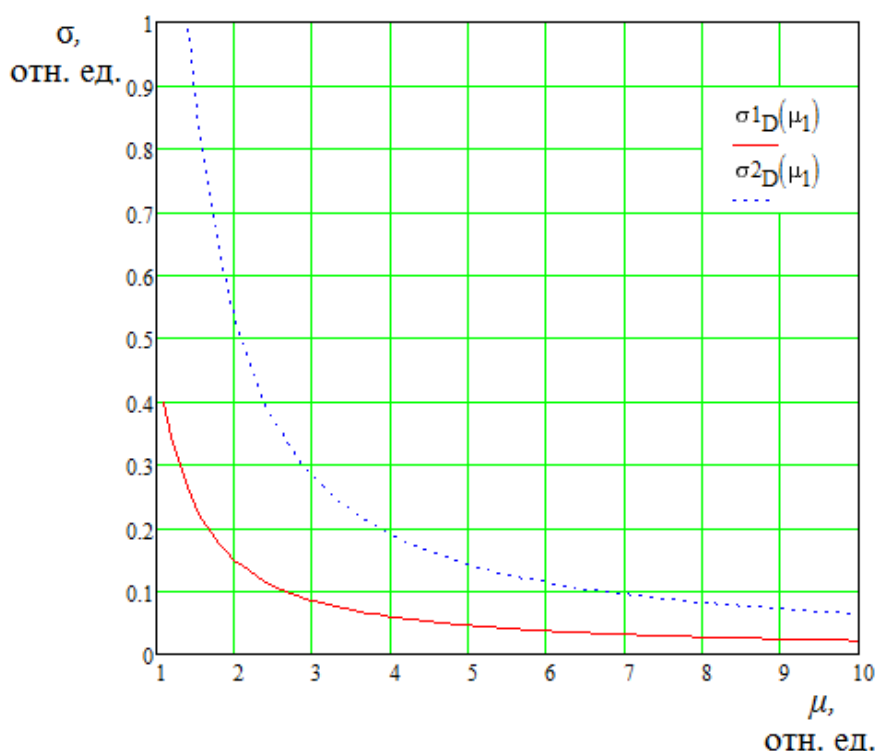


Рис. 6. Иллюстрация зависимости СКО отношения измеряемых интенсивностей от пикового отношения сигнала к шуму

В случае, когда делитель превышает делимое при пиковом отношении сигнала к шуму $\mu_0 \geq 10$, СКО погрешности частного не превышает значения $\sigma_D \approx 0,025$.

Выведенная формула позволяет рассчитать мощность P_d лазерных диодов, при которой для заданной пороговой освещённости $E_{\text{п}}$ линейки ПЗС обеспечивается допустимая погрешность оценки глубины рельефа ДР ЗГ.

Оптимизацию составляющих вектора конструктивных параметров при проектировании ОЭП контроля качества ЗГ предлагается осуществлять методом многовариантного анализа. Критерием оптимизации является минимальное значений СКО σ_d погрешности измерения глубины микрорельефа и СКО σ_T погрешности измерения пространственного периода, а именно $\min_d \{\sigma_d, \sigma_T\}$.

Методика проектирования была использована при разработке макетного образца ОЭП для контроля качества ЗГ. Внешний вид данного ОЭП представлен на Рис. 7.



Рис. 7. Внешний вид макетного образца ОЭП контроля качества ЗГ

Макетный образец ОЭП был использован при проведении экспериментальных исследований, которые проводились в два этапа. На первом этапе осуществлялась проверка адекватности математического описания явления дифракции с учётом случайных искажений профиля дифракционных решёток ЗГ. На втором этапе оценивалась погрешность макетного образца ОЭП, предназначенного для контроля защитных голограмм на основе косвенных измерений параметров профиля ДР.

Для проведения первого этапа было изготовлено 5 тестовых образцов фазовых ДР с одинаковым пространственным периодом, но различной глубиной профиля.

В ходе проведения первого этапа исследований было установлено, что отличие значений глубины профиля ДР, полученных на основе косвенных измерений, при учёте случайных искажений формы профиля от значений, полученных на основе прямых измерений, не превышает значения 0,0026 мкм, т.е. в два раза меньше определённого в работе допустимого предела СКО $\sigma_d^{\text{дон}} \leq 0,006$ мкм погрешности измерения глубины микрорельефа ЗГ. В случае пренебрежения влиянием случайных искажений формы профиля отличие значений глубины профиля ДР, полученных на основе косвенных измерений, от значений, полученных

на основе прямых измерений, достигает величины 0,0078 мкм, превышающей допустимый предел СКО погрешности измерения.

При сравнении результатов прямых и косвенных измерений пространственного периода установлено, что разница между измеренными значениями не превышает величины 0,004 мкм, что в 2,5 раза меньше допустимого значения СКО $\sigma_T^{don} \leq 0,010$ мкм погрешности измерения пространственного периода.

На основании результатов первого этапа экспериментальных исследований сделан вывод об адекватности принятого математического описания явления дифракции с учётом случайных искажений формы профиля ДР, а также правильности выведенных математических зависимостей.

На втором этапе экспериментальных исследований была проведена оценка показателей точности макетного образца ОЭП. В качестве контролируемых образцов использовались выпускаемые серийно ЗГ и мастер-матрицы ЗГ.

Из результатов второго этапа исследований следует, что отличие средних значений пространственного периода, полученных в эксперименте на основе методов прямого и косвенного измерений, не превышает величины 0,003 мкм, т.е. меньше допустимого значения СКО погрешности измерения пространственного периода. Установлено, что максимальное отличие средних значений глубины рельефа, полученных в эксперименте на основе методов прямого и косвенного измерений, достигает величины 0,0056 мкм, которая не превышает допустимого значения СКО $\sigma_d^{don} \leq 0,006$ мкм погрешности измерения глубины.

На основании полученных результатов второго этапа экспериментальных исследований сделан вывод о том, что макетный образец ОЭП, удовлетворяет требованиям по точности измерений. Этот факт подтверждает правильность положений разработанной в диссертации методики проектирования ОЭП, предназначенных для контроля ЗГ и мастер-матриц ЗГ на основе метода косвенных измерений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В диссертации получены следующие научные и практические результаты:

1. Предложен критерий принятия решения о качестве ЗГ на основе сравнения значений параметров профиля микрорельефа дифракционных решёток контролируемого и эталонного образцов ЗГ.

2. Введено понятие случайных искажений профиля микрорельефа дифракционных решёток и принято модельное описание искажений как однородного гауссова случайного поля.

3. В рамках скалярной теории дифракции впервые получены аналитические выражения, описывающие зависимости распределения интенсивности в главных максимумах дифракционной картины при наличии случайных искажений профиля микрорельефа дифракционных решёток. Адекватность принятого математического описания подтверждена в процессе экспериментальных исследований.

4. Разработана методика оценки параметров профиля микрорельефа дифракционных решёток ЗГ на основе прямых измерений, позволяющая обосновать допустимые значения погрешностей ОЭП, используемых при оценке параметров ЗГ.

5. Разработан метод оперативного контроля качества ЗГ на основе косвенных измерений глубины и пространственного периода профиля микрорельефа дифракционных решёток ЗГ.

6. Предложена методика контроля качества ЗГ, основанная на прямых и косвенных измерениях параметров профиля микрорельефа ДР, позволяющая контролировать качество ЗГ на всех стадиях технологического процесса изготовления.

7. Предложены оригинальные функциональные схемы и разработана методика проектирования ОЭП контроля качества ЗГ, эффективность которой подтверждена в ходе экспериментальных исследований макетного образца ОЭП, разработанного по данной методике.

ПУБЛИКАЦИИ, СОДЕРЖАЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Корреляционный алгоритм оценки качества мастер-матриц защитных голограмм / В.В. Колючкин [и др.] // Естественные и технические науки. 2012. № 5. С. 317–320. (0,4 п.л. / 0,2 п.л.)

2. Оценка качества микрооптических и дифракционных элементов с помощью корреляционной оптической и электронной микроскопии / В.В. Колючкин [и др.] // Естественные и технические науки. 2012. № 6. С. 354–356. (0,6 п.л. / 0,3 п.л.)

3. Применение методов инвариантного корреляционного распознавания образов для контроля качества мастер-матриц защитных голограмм / В.В. Колючкин [и др.] // Мир техники кино. 2013 № 1. С. 34–38. (0,6 п.л. / 0,4 п.л.)

4. Оптико-электронное устройство для контроля качества дифракционных и голографических элементов: патент РФ № 157473 / В.В. Колючкин [и др.] заявл. 17.04.2015; опубл. 11.11.2015. (0,5 п.л. / 0,3 п.л.)

5. Kolyuchkin V.V., Odinson S.B., Tsyganov I.K. The quality inspection method for master-matrices of security holograms // Physics Procedia. 2015. Vol. 73. P. 313–319. (0,5 п.л. / 0,4 п.л.)

6. Метод когерентного контроля глубины поверхностного микрорельефа голограммных и дифракционных оптических элементов / В.В. Колючкин [и др.] // Компьютерная оптика. 2015. Т.39, № 4. С. 515–520. (0,7 п.л. / 0,5 п.л.)

7. Kolyuchkin V.V., Odinson S.B. The influence of diffraction gratings relief noise on the intensity distribution in diffraction orders // Journal of Physics: Conference Series. 2016. Vol. 737(1). P. 012070-1–012070-5. (0,4 п.л. / 0,3 п.л.)