

УТВЕРЖДАЮ

Временный генеральный директор



АО «Государственный оптический
институт им. С.В. Вавилова»

А.Р. Роковой

ОТЗЫВ

ведущей организации АО «Государственный оптический институт им. С.В. Вавилова» на диссертационную работу Муслимова Эдуарда Ринатовича на тему «Методология проектирования спектрографов с объемно-фазовыми дифракционными решетками на основе комплексного применения трассировки лучей и анализа связанных волн», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.11.07 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы»

Диссертационная работа Муслимова Э.Р. посвящена разработке методологии проектирования спектрографов на базе объемно-фазовых дифракционных решеток, базирующейся на комплексном применении методов трассировки лучей и анализа связанных волн, и созданию на основе данной методологии принципов построения и методик расчета спектрографов с улучшенными оптическими характеристиками.

Актуальность темы диссертационной работы

Развитие спектрального приборостроения требует улучшения основных оптических характеристик спектрографов – разрешения, дисперсии и дифракционной эффективности. Однако одновременное улучшение всех этих характеристик для ряда важных прикладных задач в рамках существующих схемных решений и методов их расчета оказывается невозможным. Так, требование одновременного повышения спектральной разрешающей способности и пропускания оптического тракта в широком спектральном диапазоне, необходимое, например, для астрофизических исследований, приводит к следующему противоречию: для достижения высокой разрешающей способности используют



сложные конфигурации диспергирующего устройства, например, схему со скрещенной дисперсией, что ведет к значительному снижению пропускания. Типичное значение коэффициента пропускания оптического тракта эшелле-спектрографа составляет лишь 8%, а значения 15-20% считаются технологическим пределом. Требование повышения спектральной разрешающей способности в узком спектральном диапазоне при одновременном уменьшении габаритов и сохранении высокого пропускания также ведет к противоречию: повышение спектральной разрешающей способности при ограничении габаритов возможно лишь при увеличении частоты штрихов дифракционной решетки, однако при этом из-за ряда технологических ограничений не удается обеспечить высокую и равномерную по рабочему диапазону длин волн дифракционную эффективность. Также к противоречию приводит требование одновременного повышения относительного отверстия системы и ее спектральной разрешающей способности - введение дополнительных оптических элементов для коррекции остаточных aberrаций ведет к недопустимому снижению пропускания.

Разрешение перечисленных противоречий представляет собой важную задачу спектрального приборостроения. Обзор литературы на эту тему не выявил работ, посвященных разработке единого комплексного подхода к устранению указанных противоречий. Более того, имеется различие теоретических подходов, лежащих в основе существующих методов расчета двух групп характеристик - показателей спектрального разрешения и энергетических характеристик спектрографа. Расчет показателей разрешения опирается на методы геометрической оптики, анализ aberrаций и трассировку лучей. Для определения энергетических характеристик необходимо вычислить дифракционную эффективность решетки, что требует решения уравнений Максвелла с помощью одного из численных методов. Оба подхода в отдельности подробно разработаны, однако принципиальная разница между ними препятствует созданию методик расчета оптических схем, одновременно учитывающих обе группы характеристик.

Автором диссертации предложено использование в схемах спектрографов объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток и разработана методология проектирования спектрографов, основанная на комплексном применении методов трассировки лучей и анализа связанных волн. В предложенной автором методологии проектирования спектрографов на базе объемно-фазовых дифракционных решеток видится значительный потенциал, что и подтверждает актуальность выполненных исследований.

Степень достоверности научных положений

Достоверность научных положений основана на теоретических методах исследований с верификацией данных, использовании методов компьютерного и математического моделирования, использовании различных инструментов математического аппарата, применимых к формированию, анализу и моделированию оптических схем спектрографов.

Достоверность результатов

Обоснованность и достоверность результатов определяются использованием известных положений фундаментальных наук, корректностью используемых математических моделей и их адекватностью реальным физическим процессам. Верификация данных математических моделей автором была проверена путем согласования данных моделирования с данными натурных экспериментов и результатами исследований других авторов. На базе предложенной методологии построены лабораторные образцы спектрографов, а ряд технических решений были признаны экспертизами ФИПС изобретениями и полезными моделями, защищенными патентами РФ.

Структура, объем и основное содержание работы

Диссертационная работа состоит из введения, шести глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 306 наименований, и двух приложений. Полный объем диссертации составляет 366 страниц, включая 149 рисунков и 43 таблицы.

Во введении дана общая характеристика диссертационной работы: актуальность, цель, задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, методы исследований, достоверность, реализация и внедрение полученных результатов, апробация и публикации, основные защищаемые положения. Приведены структура и краткое содержание диссертации.

В главе 1 приведен аналитический обзор существующих спектральных приборов, показаны тенденции в развитии спектрального приборостроения, выделены противоречия, возникающие при проектировании спектрографов. На основе проведенных аналитических оценок, сформулированы цель, основная научная задача диссертационной работы и перечень направлений исследования.

В главе 2 рассматриваются теоретические основы методов расчета показателей спектрального разрешения и дифракционной эффективности, применяемые при разработке спектрографов с объемно-фазовыми голограммными дифракционными решетками. Предложена методология проектирования таких спектрографов, основанная на комплексном применении методов трассировки лучей и анализа связанных волн.

В главе 3 предложен принцип построения оптической схемы спектрографа с диспергирующим устройством на основе каскада узкополосных объемно-фазовых голограммных дифракционных решеток. Разработана методика численного моделирования работы спектрографа с каскадным диспергирующим устройством, основанная на сочетании методик трассировки лучей в непоследовательном режиме и метода строгого анализа связанных волн(RCWA) для расчета дифракционной эффективности. Представлены варианты оптических схем, разработанных по предложенной методике, результаты их компьютерного моделирования, экспериментальные результаты, полученные на лабораторном прототипе спектрографа с каскадным диспергирующим устройством.

В главе 4 предложен принцип построения и описана методика расчета оптической схемы спектрографа с высокой дисперсией на базе пары объемно-фазовых пропускающих решеток. Представлены варианты расчета конкретных оптических схем, результаты их компьютерного моделирования, также экспе-

риментальные результаты, полученные на лабораторном прототипе спектрографа с высокой дисперсией.

В главе 5 предложен принцип построения оптических схем, заключающийся в использовании голограммных решеток, нанесенных на поверхности свободной формы без осевой симметрии. Предложена методика расчета и моделирования оптических схем с голограммными решетками на подобных поверхностях, использующая трассировку лучей и расчет дифракционной эффективности методом элементарных решеток. Разработаны оптические схемы спектрографов: с плоским полем, на базе камеры Шмидта, эшелле-спектрографа.

В главе 6 содержится описание разработанных, апробированных и внедренных спектрографов, созданных в процессе работы над диссертацией.

В заключении изложены основные выводы и результаты.

Соответствие содержания диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» по пункту 2: «Разработка, совершенствование и исследование характеристик приборов, систем и комплексов с использованием электромагнитного излучения оптического диапазона волн» (разработка новых принципиальных оптических схем спектрографов с улучшенными спектральным разрешением и энергетическими характеристиками и соответствующих методик расчета), «предназначенных для решения задач: измерения геометрических и физических величин» (разработка схем спектрографов высокого разрешения для систем измерения температуры и давления на основе оптоволоконных датчиков);..., «создания оптического и оптико-электронного оборудования для научных исследований в различных областях науки и техники» (разработка схем спектрографов с каскадным дисперги-

рующим устройством и с дифракционными решетками на поверхностях свободной формы для физических и астрономических измерений).

Научная новизна кратко изложена в следующих пунктах:

1. Разработана новая методология проектирования спектрографов на базе объемно-фазовых дифракционных решеток, позволяющая решить важную научно-техническую проблему - достичь одновременного повышения их показателей спектрального разрешения и энергетических характеристик. Методология основана на использовании численных и аналитических методов трассировки лучей и анализа связанных волн. Комплексное применение данных методов отличает разработанную методологию от известных методик проектирования и построенных на их основе технических решений.
2. Разработаны спектрографы, отличающиеся высокой спектральной разрешающей способностью и высоким пропусканием оптического тракта в широком спектральном диапазоне. Принцип построения спектрографов основан на использовании каскада объемно-фазовых дифракционных решеток.
3. Разработаны спектрографы, отличающиеся повышенной спектральной разрешающей способностью в узком спектральном диапазоне и высоким пропусканием при малых габаритах. Принцип построения спектрографов основан на использовании составного диспергирующего узла, включающего две объемно-фазовых решетки.
4. Разработаны варианты спектрографов, отличающихся высоким относительным отверстием и высокой спектральной разрешающей способностью при минимальном количестве элементов в оптической схеме. Принцип построения спектрографов основан на использовании объемно-фазовых голограммных решеток, наносимых на поверхности свободной формы.

Теоретическая и практическая значимость работы

Совокупность результатов, полученных в процессе выполнения диссертационной работы, убедительно доказывает возможность создания спектрографов на основе объемно-фазовых дифракционных решеток, в которых одновременно улучшены спектральное разрешение и энергетические характеристики. Под-

тверждением этому являются разработанные методики расчета и моделирования спектрографов и реализующие их программные средства; оптические схемы спектрографов различного назначения с улучшенными спектральным разрешением и энергетическими характеристиками; лабораторные прототипы спектрографов для астрономии и опроса датчиков на базе волоконных решеток Брэгга с экспериментально подтвержденными улучшенными оптическими характеристиками; практические рекомендации по использованию разработанной методологии проектирования спектрографов.

Рекомендации по использованию результатов исследования

Результаты диссертационного исследования, в том числе предложенные автором новые методики расчета оптических схем спектрографов с объемно-фазовыми дифракционными решетками, могут быть использованы при создании современных спектральных приборов и комплексов.

Публикации по теме диссертации

По материалам диссертации опубликовано 89 научных работ, в том числе 11 статей в журналах, включенных в перечень ВАК, 5 патентов РФ, 27 статей в изданиях, цитируемых в базах данных Scopus и Web of Science, 46 работ в реферируемых трудах и сборниках докладов Всероссийских и Международных симпозиумов и конференций. Автор имеет 3 единоличные публикации в изданиях ВАК.

Замечания по содержанию и оформлению диссертации и автореферата

1. В обзоре технических решений в области проектирования спектрографов, представленном в первой главе, рассмотрены, в основном, приборы, предназначенные для проведения научных исследований. Вероятно, стоило бы подробнее рассмотреть приборы, обозначенные автором как «универсальные».
2. Во второй главе при описании метода расчета аппаратной функции не упоминается метод элементарных площадок - вариант метода, основан-

ный на подсчете числа лучей, пересекающих плоскость изображения, разбитую на узкие полосы. Этот метод был предложен Г.Г. Слюсаревым и отличается большей производительностью вычислений в сравнении с используемым автором алгоритмом, использующим интеграл свертки.

3. В Главе 3. на Рис. 3.13 представлены результаты моделирования дифракционной эффективности каскада решеток с учетом нескольких порядков дифракции. Результаты моделирования показывают эффективность, близкую к 0 для -1-го порядка, но +2й порядок на графике не показан. Неясно, проводилась ли оценка вклада, который вносит +2й порядок.
4. В тексте диссертации имеются повторы, например, в главах 2 и 3 - при описании методов вычисления, в главах 3 и 6 – при описании телескопов САО.
5. В работе не рассматриваются вопросы расчета технологических допусков на конструктивные параметры схем приборов и схем записи голограммных дифракционных решеток.
6. В разделе 5.6 рассматривается запись голограммной решетки при помощи дополнительного зеркала сложной формы. В работе показано, что для коррекции аберраций необходимо изменить форму одного из записывающих волновых фронтов, введя кому и астигматизм первого порядка. Обе эти аберрации можно ввести и с помощью обычного сферического зеркала, работающего с большим углом падения. Рассматривался ли такой вариант?
7. В тексте диссертации имеются незначительные опечатки (например, в формулах 2.51 и 3.16, в таблице 3.8), на рисунках 5.12-5.15 использованы англоязычные обозначения, некоторые обозначения используются как в заглавном, так и в строчном написании, например F' и f' для обозначения фокусного расстояния (стр. 197 и 240).

Заключение

Диссертационная работа Муслимова Эдуарда Ринатовича на тему: «Методология проектирования спектрографов с объемно-фазовыми дифракционными ре-

шетками на основе комплексного применения трассировки лучей и анализа связанных волн», является завершенной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное значение. Автором решена важная научно-техническая задача улучшения оптических характеристик спектрографов за счет создания методологии проектирования спектрографов на базе объемно-фазовых дифракционных решеток, базирующейся на комплексном применении методов трассировки лучей и анализа связанных волн. Кроме того, автором предложены принципы построения и методики расчета спектрографов с улучшенными оптическими характеристиками. Работа представляет собой целостное законченное исследование, обладающее несомненной научной новизной, теоретической и практической ценностью.

Диссертационная работа соответствует специальности 05.11.07 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» и требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, с изменениями, принятыми Постановлением Правительства Российской Федерации № 335 от 21 апреля 2016 г.

Замечания по диссертационной работе не носят принципиального характера и не влияют на общую положительную оценку работы. Результаты исследования достоверны и апробированы на российских и международных научных конференциях, форумах и семинарах. Уровень и объем публикаций автора, отражающих основные полученные результаты, соответствуют требованиям пунктов 11 и 13 «Положения о присуждении ученых степеней» Постановления Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842, с изменениями, принятыми Постановлением Правительства Российской Федерации № 335 от 21 апреля 2016 г.

Диссертация и автореферат содержат совокупность выносимых на защиту положений и полностью соответствуют научной специальности 05.11.07 «Оп-

тические и оптико-электронные приборы и комплексы». Диссертационная работа соответствует требованиям ВАК РФ, предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Муслимов Эдуард Ринатович, заслуживает присвоения ему степени доктора технических наук по специальности 05.11.07 «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы».

Диссертационная работа обсуждена и отзыв утвержден на расширенном научно-техническом совете АО «Государственный оптический институт им. С.В. Вавилова» «протокол №2 от «24» 04 2019 г.

Председатель НТС

Л.Н. Архипова

Ученый секретарь

А.В. Савушкин

СВЕДЕНИЯ О ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

по диссертации Муслимова Эдуарда Ринатовича на тему «Методология проектирования спектрографов с объемно-фазовыми дифракционными решетками на основе комплексного применения трассировки лучей и анализа связанных волн» по специальности 05.11.07 – «Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы» на соискание ученой степени доктора технических наук

Полное наименование организации	Акционерное общество "Государственный оптический институт имени С.И. Вавилова"
Сокращенное наименование организации	АО «ГОИ им. С.И. Вавилова»
Место нахождения	199053 С.-Петербург, Кадетская линия В.О., дом 5, корпус 2
Почтовый адрес	199053 С.-Петербург, Кадетская линия В.О., дом 5, корпус 2
Телефон	(812) 327-00-95
Адрес электронной почты	leader@soi.spb.ru
Адрес сайта в сети Интернет	http://www.npkgoi.ru
Список основных публикаций работников ведущей организации по теме диссертации в рецензируемых научных изданиях за последние 5 лет	<ol style="list-style-type: none"> Comparative analysis of resolution measurement methods for the optoelectronic systems/Perezyabov O.A., Maltseva N.K., Ilinski A.V// Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 3. С. 257-266. Анализ aberrаций линзового коллиматора установки для юстировки активных лазерных оптико-электронных приборов/Ершов А.Г// Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2018. Т. 61. № 10. С. 887-891. Калибровка источников излучения и приёмных устройств в широком диапазоне измерения энергии оптического излучения/Кувалдин Э.В// Метрология. 2018. № 4. С. 3-16. Проявление рассеяния излучения в методе импульсной терагерцовой спектроскопии/ Малевич В.Л., Синицын Г.В., Сочилин Г.Б., Розанов Н.Н// Оптика и спектроскопия. 2018. Т. 124. № 6. С. 844-849. Фотокаталитические прозрачные покрытия на поверхности наконечников волоконно-оптических жгутов медицинского назначения/Евстропьев С.К., Волынкин В.М., Киселев В.М., Дукельский К.В., Евстропьев К.С., Демидов В.В., Гагчин Ю.А// Квантовая электроника. 2017. Т. 47. № 12. С. 1125-1127. Оптические спектры и излучательные характеристики кристаллов двойного хлорида калия-свинца, активированных тербием (KPB2CL5:TB3+)/Ткачук А.М., Иванова С.Э., Мирзаева А.А., Исаенко Л.И./Оптика и спектроскопия. 2017. Т. 122. № 5. С. 757-771. Двухимпульсное биспектральное лазерное возбуждение и инициация плазмы в источнике экстремально-ультрафиолетового излучения для

- нанолитографии/Сейсян Р.П., Беспалов В.Г., Жевлаков А.П., Макаров Е.А., Родионов А.Ю./*Оптический журнал*. 2017. Т. 84. № 11. С. 45-54.
8. Осветитель установки для измерения пороговой мощности и энергии оптического излучения/Кувалдин Э.В., Шульга А.А./*Оптический журнал*. 2017. Т. 84. № 2. С. 52-58.
9. Лампа для юстировки спектральных приборов в диапазоне 115-175 нм/Карташева М.А., Крылов Б.Е., Левина О.В., Невяжская И.А., Тяпков В.А./*Оптический журнал*. 2017. Т. 84. № 3. С. 67-70.1
10. Малогабаритная ртутная лампа для настройки спектральных приборов: спектр излучения в диапазоне 115-400 нм/Карташева М.А., Крылов Б.Е., Левина О.В., Мурашева Л.А., Тяпков В.А., Шилина Н.В./*Оптический журнал*. 2017. Т. 84. № 11. С. 73-77.
11. Светодиодный импульсный излучатель/Кувалдин Э.В., Шульга А.А./*Оптический журнал*. 2017. Т. 84. № 9. С. 85-89.
12. Methods and technique of manufacturing silica graded-index fibers with a large central defect of the refractive index profile for fiber-optic sensors based on few-mode effects/Demidov V.V., Ter-Nersesyants E.V., Bourdine A.V., Burdin V.A., Minaeva A.Yu., Matrosova A.S., Khokhlov A.V., Komarov A.V., Ustinov S.V., Golyeva E.V., Dukelskii K.V./*Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* (см. в книгах). 2017. Т. 10342. С. 1034218.
13. Панорамные системы кругового обзора/Архипова Л.Н., Багдасаров А.А., Багдасарова О.В., Шевченко Д.Н./*Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 6. С. 20-31.
14. Быстродействие флуоресцентных фильтров на парах атомов цезия и рубидия /Кулясов В.Н., Шилов В.Б., Яковлев В.А./*Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 11. С. 31-33.
15. Измерение светорассеяния в объективах/Кувалдин Э.В., Шульга А.А./*Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 11. С. 40-46.
16. Установка для измерения основных характеристик малогабаритных объективов/Кувалдин Э.В., Киргетов М.В., Леонов М.Б./*Оптический журнал*. 2016. Т. 83. № 1. С. 94-99.
17. Spectral properties of zno and zno-al₂o₃ coatings prepared by polymer-salt method/Evstropiev S.K., Gatchin Y.A., Evstropiev K.S., Romanova E.B./*Optical Engineering*. 2016. Т. 55. № 4. С. 047108.
18. Устройства фотоники с когерентным взаимодействием излучения со средой/Архипов Р.М., Архипов М.В., Бабушкин И., Розанов Н.Н./*Ученые записки физического факультета Московского университета*. 2016. № 5. С. 165301.
19. Автоколлимационный способ измерения фокусного расстояния объектива/Ершов А.Г./*Известия высших учебных заведений. Приборостроение*. 2015. Т. 58. № 7.

- С. 537-542.
20. Гипер- и ультраспектральная видеоспектрометрия в задачах дистанционного зондирования/Горбунов Г.Г., Жарников В.Б., Чиков К.Н., Шлишевский В.Б./// Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2015. № S5. С. 188-198.
 21. Плоская линза из лейкосапфира/Ветров В.Н., Игнатенков Б.А., Якобсон В.Э.///Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 118. № 2. С. 342-345.
 22. Спектральные свойства золей сульфида цинка, стабилизированных высокомолекулярным поливинилпирролидоном/Евстропьев С.К., Гатчин Ю.А., Евстропьев К.С., Дукельский К.В., Кисляков И.М.///Оптика и спектроскопия. 2015. Т. 119. № 6. С. 931-936.
 23. A hybrid antireflection coating with a diamondlike layer/Gainutdinov I.S., Azamotov M.Kh., Galiev A.N., Nurullin I.Z., Shusharin S.N., Mihaylov A.V.///Journal of Optical Technology. 2015. Т. 82. № 1. С. 55-57.
 24. Влияние процесса структурирования объёма и поверхности материалов, включая жидкие кристаллы, на спектральные, структурные и фоторефрактивные свойства/Каманина Н.В., Кухарчик А.А., Кужаков П.В., Зубцова Ю.А., Лихоманова С.В., Шурпо Н.А., Серов С.В., Студенов В.И., Васильев П.Я./// Вестник Московского государственного областного университета. Серия: Физика-математика. 2015. № 2. С. 75-89.
 25. Свойства и оптическое применение поликристаллического селенида цинка, полученного физическим осаждением из газовой фазы/Дунаев А.А., Егорова И.Л.///Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2015. Т. 15. № 3. С. 449-456.
 26. Coupled-mode theory of multipath interference in quasi-single mode fibers/Mlejnek M., Roudas I., Downie J.D., Kaliteevskiy N., Koreshkov K.///IEEE Photonics Journal. 2015. Т. 7. № 1. С. 7001087.

Роковой А. Р.

Временный генеральный директор
АО «ГОИ им. С. И. Вавилова»

