

0-784447

На правах рукописи



БЕЛОКОПЫТОВ АЛЕКСЕЙ АНАТОЛЬЕВИЧ

**МЕТОДИКА РАСЧЕТА И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ
ВОГНУТЫХ ГОЛОГРАММНЫХ ДИФРАКЦИОННЫХ
РЕШЕТОК, ЗАПИСАННЫХ НЕГОМОЦЕНТРИЧЕСКИМИ
ПУЧКАМИ**

Специальность: 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы
и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Казань 2010

Работа выполнена в Казанском государственном техническом университете им. А.Н. Туполева и ФГУП НПО «Государственный институт прикладной оптики».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Павлычева Н.К.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Ильин Г.И.

доктор физ-мат наук, профессор
Козлов В.К.

Ведущая организация: Казанский физико-технический институт
им. Е.К. Завойского (КФТИ)

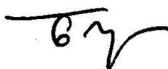
Защита состоится «01» ноября 2010 г. на заседании диссертационного совета Д212.079.06 в Казанском государственном техническом университете по адресу:

420015, г. Казань, ул. Толстого, д. 15, учебный корпус № 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технического университета

Автореферат разослан «28» сентября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Бердников А.В.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы Анализ существующих оптических схем спектральных приборов показывает, что коррекционные возможности оптических схем с классическими дифракционными решетками практически исчерпаны, более перспективным является применение вогнутых неклассических дифракционных решеток, позволяющих создавать новые схемные решения.

Существенным недостатком классических вогнутых дифракционных решеток является наличие значительных aberrаций: астигматизма, дефокусировки, меридиональной и сагиттальной комы. Изготовление вогнутых голограммных дифракционных решеток (ВГДР) при помощи сферических волновых фронтов (запись точечными источниками) позволяет исправить дефокусировку, астигматизм и меридиональную кому. Однако для светосильных приборов и приборов с высокой дисперсией, качество изображения входной щели при использовании записи точечными источниками оказывается недостаточно, т.к. начинает сказываться влияние сагиттальной комы. Одним из наиболее эффективных средств повышения качества изображения, даваемого ВГДР в плоскости регистрации, является коррекция aberrаций на стадии записи дифракционной решетки за счет намеренного искажения волновых фронтов лазерных пучков. Высокую степень коррекции aberrаций обеспечивает запись ВГДР неомоцентрическими лучками, полученными, например, с помощью вогнутых зеркал (ВГДР 2-го поколения).

Объект исследования ВГДР с коррекцией aberrаций и спектральные приборы на их основе.

Предмет исследования методы расчета, изготовления и контроля оптических характеристик ВГДР с коррекцией aberrаций.

Цель работы Целью диссертационной работы является совершенствование методов расчета, изготовления и контроля ВГДР 2-го

поколения и разработка на их основе оптической системы спектрального прибора с улучшенными оптическими и эксплуатационными характеристиками.

Задачи работы Для достижения указанной цели требовалось решить следующие задачи:

1. Провести анализ литературных данных для выявления наиболее перспективных методов расчета и изготовления ВГДР с оптимизированными абберационными характеристиками.
2. Разработать программное обеспечение, отвечающее современным требованиям, для автоматизации расчетов схем записи ВГДР, оптических схем приборов на их основе и анализа их абберационных характеристик. Провести расчет оптической схемы спектрографа и параметров голографирования для записи ВГДР 2-го поколения, провести анализ степени влияния параметров голографирования на абберационные характеристики ВГДР.
3. Разработать методы и средства изготовления ВГДР 2-го поколения. Разработать методы и средства для технологического контроля оптических характеристик дифракционных решеток.
4. Провести математическое моделирование оптических свойств спектрографа на основе ВГДР 2-го поколения. Изготовить ВГДР 2-го поколения и исследовать ее технические характеристики на макете спектрографа.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана схема записи ВГДР 2-го поколения, предназначенной для работы в спектрографе на круге Роуланда, с пространственной частотой 3600 штр/мм с применением двух цилиндрических зеркал.
2. Теоретически обоснованы требования к погрешностям расположения оптических элементов голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения.

3. Разработана методика юстировки оптической схемы записи ВГДР 2-го поколения, обеспечивающая выполнение требований к погрешностям установки оптических элементов.
4. Предложена методика юстировки и калибровки по длинам волн измерительных стендов для контроля оптических характеристик дифракционных решеток, макетов и серийных спектральных приборов с помощью узкополосных голограммных фильтров.

Достоверность результатов подтверждается хорошим совпадением результатов расчетов с данными математического моделирования изображения спектра и экспериментальными данными.

Практическая ценность работы заключается в получении следующих результатов:

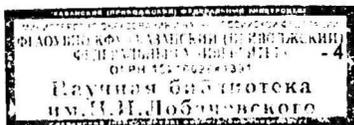
1. Создании современного программного обеспечения:
 - пакет программ «VGDR» для проведения расчетов оптических схем спектральных приборов и схем записи ВГДР;
 - программа расчета технологических параметров голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения;
2. Разработанные голографическая установка для записи ВГДР 2-го поколения, методика юстировки схем записи ВГДР 2-го поколения, измерительный стенд для технологического контроля оптических характеристик голограммных дифракционных решеток позволяют получать ВГДР с высокой степенью коррекции аберраций.
3. Рассчитана оптическая схема малогабаритного эмиссионного спектрографа для анализа основных типов металлов, сплавов, горных пород и почв и схема записи ВГДР 2-го поколения для данного спектрографа.

4. Серийный выпуск спектроанализатора на основе разработанной оптической схемы спектрографа с ВГДР 2-го поколения может удовлетворить потребности производственных и исследовательских лабораторий в отечественных приборах с высокой чувствительностью и разрешающей способностью.

Реализация результатов работы. Теоретические и практические результаты диссертационной работы были внедрены и использованы в ФГУП НПО ГИПО, г. Казань. Разработанное программное обеспечение для автоматизации оптических расчетов применяется в учебном процессе на кафедре оптико-электронных систем Казанского государственного технического университета им. А.Н. Туполева. Рассчитанная оптическая схема спектрографа легла в основу проектируемого ООО НПО «СЕТАЛ» спектроанализатора для эмиссионного анализа основных типов металлов, сплавов и почв.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Оптическая схема записи ВГДР 2-го поколения с пространственной частотой 3600 штр/мм на основе вогнутых цилиндрических зеркал, предназначенной для работы в спектрографе на круге Роуланда в диапазоне длин волн 190-360 нм.
2. Результаты расчета и анализа степени влияния погрешностей установки элементов схемы записи на абберационные характеристики ВГДР 2-го поколения.
3. Методика юстировки схемы записи ВГДР 2-го поколения, обеспечивающая выполнение требований к погрешностям установки оптических элементов схемы записи ВГДР 2-го поколения.
4. Методика юстировки и калибровки по длинам волн измерительных стенов для контроля оптических характеристик дифракционных



решеток, макетов и серийных спектральных приборов с помощью узкополосных голограммных фильтров.

Личный вклад автора. Автором рассчитана схема записи ВГДР 2-го поколения, проведен анализ влияния погрешностей установки оптических элементов схемы записи на абберрационные характеристики спектрографа, проведено математическое моделирование спектрографа с ВГДР 2-го поколения. ВГДР 2-го поколения получена лично автором. Автором разработаны пакет программ «VGDR» и программа для расчета технологических параметров голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения. При непосредственном участии автора разработаны голографическая установка для записи ВГДР 2-го поколения и измерительный стенд для контроля оптических характеристик дифракционных решеток, проведены исследования оптических характеристик ВГДР. Автором предложен метод юстировки и калибровки по длинам волн измерительных стендов для контроля оптических характеристик дифракционных решеток, макетов и серийных спектральных приборов с помощью узкополосных голограммных фильтров.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на:

18-ой международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения г.Москва 2004г., Международной конференции "Прикладная оптика" г.Санкт-Петербург 2004г., Международной конференции «Прикладная оптика 2008» г.Санкт-Петербург 2008г., Международной молодежной научной конференции «XVII Туполевские чтения» г.Казань 2009г., Международной конференции X Харитоновские тематические научные чтения г.Саров 2008г., XX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции г.Казань 2008 г.

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 10 печатных работ, в том числе 3 статьи в журналах, одобренных ВАК, 6 публикаций материалов докладов, из которых 5 на Международных конференциях и 1 на Всероссийской конференции, и 1 патент РФ на изобретение.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Общий объем составляет: 139 страниц машинописного текста, 20 таблиц, 48 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, определены цели и задачи исследования, изложены основные научные результаты, выносимые на защиту, практическая ценность, апробация результатов, определены структура и объем работы, и приведено краткое содержание диссертации.

В первой главе представлен анализ современного уровня развития спектрального приборостроения и производства дифракционных решеток, в том числе со скомпенсированными аберрациями, приводится классификация спектральных приборов и наиболее часто применяемые оптические схемы, обсуждаются достоинства и недостатки этих схем применительно к многоканальному фотоэлектрическому способу регистрации спектра, представлен обзор современных спектральных приборов, составленный на основе анализа публикаций в научно-технической литературе и информации, размещенной на Internet-сайтах крупнейших производителей спектрального оборудования, приводится классификация дифракционных решеток,

описываются способы и некоторые аспекты технологии их изготовления, приводится список крупнейших мировых производителей.

Проведенный анализ показал, что наиболее перспективной для построения спектроанализаторов с высоким разрешением является схема Пашена-Рунге (рис.1).

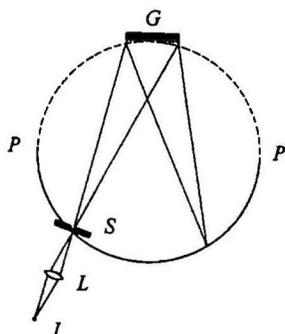


Рис. 1. Схема установки вогнутой решетки Пашена-Рунге: *I* – источник света, *L* – линза, *S* – щель, *G* – решетка, *PP'* – фокальная поверхность

Применение классических вогнутых дифракционных решеток не позволяет в полной мере использовать преимущества данной схемы и многоканального фотоэлектрического способа регистрации, так как вогнутые решетки обладают значительными aberrациями. Коррекция aberrаций может быть достигнута путем изготовления решеток с криволинейным штрихами и переменным периодом. Среди дифракционных решеток с коррекцией aberrаций наиболее широкими возможностями коррекции наряду с высокой технологичностью обладают вогнутые голограммные дифракционные решетки, записанные в негомоцентрических пучках (ВГДР 2-го поколения).

Во второй главе рассматриваются методы и средства проведения расчета параметров голографирования для записи ВГДР 2-го поколения, анализа качества изображения спектра и оптических схем спектрографов на их основе. Обоснована необходимость создания современного программного обеспечения для автоматизации расчетов.

Методы расчета оптических схем спектральных приборов с неклассическими дифракционными решетками основаны на минимизации отдельных членов разложения функции оптического пути вогнутой неклассической дифракционной решетки. Такую функцию называют также характеристической или абберационной функцией.

Характеристическая функция имеет вид:

$$V(y, z) = -yF_0 + \frac{y^2}{2r} F_1 + \frac{z^2}{2r} F_2 + \frac{y^3}{2r^2} F_3 + \frac{yz^2}{2r^2} F_4 + \frac{y^4}{8r^3} F_5 + \frac{y^2 z^2}{4r^3} F_6 + \frac{z^4}{8r^3} F_7. \quad (1)$$

Коэффициент F_1 характеризует фокусировку лучей в меридиональной плоскости, F_2 - в сагиттальной, F_3 характеризует меридиональную кому, F_4 - сагиттальную, F_5, F_6, F_7 характеризуют абберации 3-го порядка.

Равенство

$$F_i = 0 \quad (2)$$

является условием коррекции абберации, характеризуемой этим коэффициентом.

Коэффициенты F_i для голограммной дифракционной решетки имеют вид:

$$F_i = M_i - \frac{k\lambda}{\lambda_0} H_i, \quad (3)$$

где M_i содержат параметры схемы, H_i содержат параметры голографирования, λ_0 - длина волны записи.

Для автоматизации проведения расчетов с использованием современной вычислительной техники был разработан пакет программ «VGDR» позволяющий определять конструктивные параметры монохроматоров и спектрографов, при различных наборах начальных данных, рассчитывать коэффициенты голографирования, находить параметры голографирования ВГДР (классических, записанных точечными источниками и 2-го поколения), переходить от них к параметрам нарезки и наоборот, определять абберационные характеристики ВГДР: классических, записанных точечными

источниками и 2-го поколения. Внешний вид интерфейса пакета программ «VGDR» представлен на рис. 2.

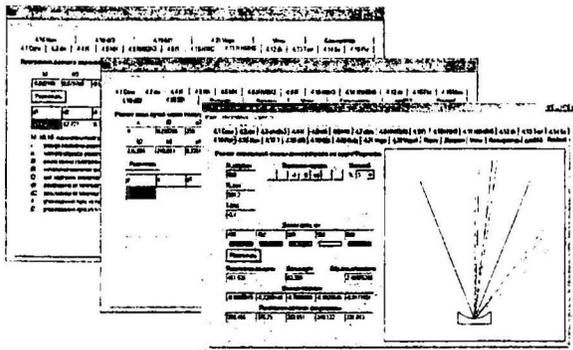


Рис. 2. Пакет программ «VGDR»

С помощью пакета программ «VGDR» была рассчитана оптическая схема спектрографа на круге Роуланда, предназначенного для эмиссионного анализа основных типов металлов, сплавов и почв (рис.3, таблица 1). В качестве диспергирующего элемента применена вогнутая дифракционная решетка с пространственной частотой 3600 штр/мм, диаметром 50мм и радиусом кривизны подложки 501,2 мм, работающая в -1 порядке дифракции.

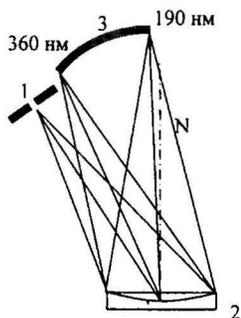


Рис. 3 Оптическая схема спектрографа на круге Роуланда: 1 – спектральная щель, 2 – вогнутая голограммная дифракционная решетка. 3 – кривая на которую фокусируется спектр

Анализ абберрационных характеристик схемы спектрографа (рис.4) показал, что применение ВГДР 2-го поколения позволяет существенно улучшить качество изображения спектральных линий.

Таблица 1

λ , нм	190	232,5	275	317,5	360
φ' , рад	0,014870	0,168668	0,326647	0,493680	0,677529
φ' , °	0,851985	9,663964	18,715510	28,285762	38,819528
d' , мм	501,145	494,088	474,698	441,354	390,497

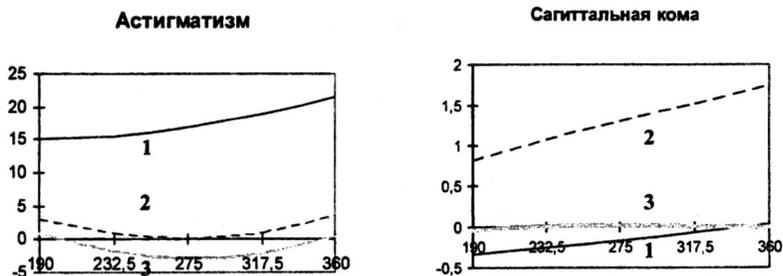


Рис. 4. Аберрации спектрографа с ВГД различных типов: 1 - классическая ВГД, 2 - ВГД, записанная точечными источниками, 3 - ВГД 2-го поколения

В частности, применение ВГД 2-го поколения позволяет на порядок снизить значения сагиттальной комы и астигматизма относительно классической ВГД, а относительно ВГД, записанной точечными источниками на два порядка снизить значение сагиттальной комы при приблизительно равных значениях астигматизма.

Проведен расчет параметров голографирования для записи ВГД 2-го поколения (таблица 2).

Таблица 2

i_1	i_2	d_{m1}	d_{m2}	d_{s1}	d_{s2}
1,141972	-0,748179	208,400	367,344	357,829	1392,020

Исследовано влияние погрешностей установки оптических элементов схемы записи ВГД на аберрационные характеристики спектрального прибора, что позволило обосновать технические требования к голографической

установке для записи ВГДР 2-го поколения. Показано, что отклонение расстояний от расчетных значений сильнее всего влияет на величину сагиттальной комы. Кроме того, чем выше степень коррекции aberrаций удается достигнуть в схеме записи, тем жестче допуски на расстояния до источников голографирования. Также, к резкому ужесточению допусков приводит увеличение апертуры ВГДР.

В рассматриваемом случае для ВГДР 2-го поколения условия коррекции aberrаций выполняются при отклонении расстояний до источников голографирования от расчетных значений не более чем на 0,2 мм, допуск на угол между записывающими пучками при $\Delta N=0,1\%$ составляет ≈ 7 угловых минут.

В третьей главе описана разработанная голографическая установка для записи ВГДР 2-го поколения, в которой интерферирующие пучки формируются с помощью цилиндрических зеркал, рассмотрены вопросы сборки, юстировки схем записи, изготовления и контроля ВГДР 2-го поколения (рис. 5).

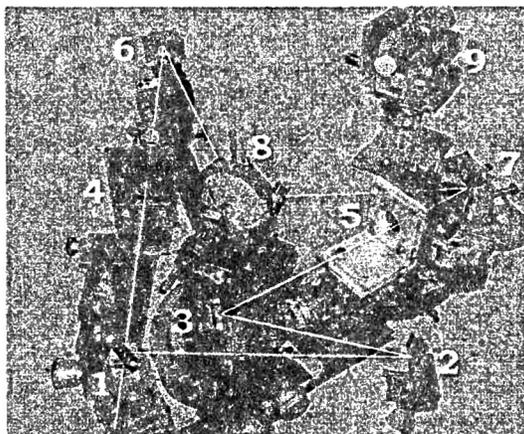


Рис. 5. Внешний вид голографической установки для записи голограммных дифракционных решеток 2-го поколения

Голографическая установка представляет собой массивную виброзащищенную плиту с размещенными на ней узлами крепления оптических элементов и юстировочными механизмами: делительным столом с установленным на нем узлом крепления подложки (8), узлами крепления цилиндрических зеркал (6,7), поворотными зеркалами (2,3), светоделителем (1) и двумя узлами крепления микрообъективов и точечных диафрагм (4,5).

Установка позволяет записывать ВГДР, как на круглых, так и на прямоугольных подложках размерами, не превышающими 70 мм, с пространственной частотой штрихов от 400 до 3600 шт/мм.

Для расчета технологических параметров голографической установки при юстировке схемы записи ВГДР 2-го поколения разработана специализированная программа, которая позволяет рассчитывать основные параметры схемы, создавать отчеты, необходимые для сборки схемы записи и ведения отчетности, автоматически рисовать эскиз, отображающий ход лучей в схеме, снижающий вероятность возникновения технологических ошибок в процессе юстировки схемы.

Разработана методика юстировки голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения, обеспечивающая размещение оптических элементов схемы записи с выполнением необходимых допусков к погрешностям установки. Методика юстировки основана на применении подложек, идентичных тем, на которых будут записываться ВГДР, с выгравированным крестом в центре рабочей поверхности. Суть методики заключается в совмещении изображений креста, полученных при отражении от подложки лазерного пучка, идущего в одном плече схемы, с лазерным пучком, идущим ему на встречу во втором плече.

Для контроля оптических характеристик дифракционных решеток разработан измерительный стенд (рис.6), использующий многоканальную фотоэлектрическую регистрирующую систему, сопряженную с персональным

компьютером и методика проведения измерений. Конструкция стенда позволяет контролировать плоские, вогнутые, отражательные и пропускающие дифракционные решетки.

Предложена новая методика калибровки измерительных стендов и макетов спектральных приборов по длинам волн с помощью узкополосных голограммных фильтров. Конструкция голограммного узкополосного фильтра защищена патентом РФ на изобретение.

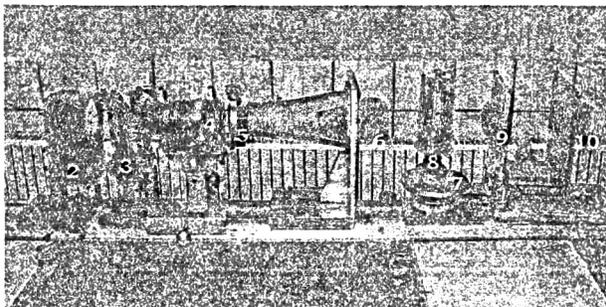


Рис. 6. Внешний вид измерительного стенда для технологического контроля оптических характеристик дифракционных решеток

Четвертая глава посвящена математическому моделированию изображения спектра в спектрографе с ВГДР 2-го поколения, а также экспериментальной проверке оптических характеристик спектрографа с ВГДР различных типов и сравнению результатов теоретического расчета с экспериментальными данными.

Достоверность результатов расчетов абберационных характеристик спектрографа, проведенных с использованием пакета программ «VGDR» подтверждена результатами поверочных расчетов, выполненных в программе «626» (разработанной под руководством И.В. Пейсахсона, ГОИ, г. Санкт-Петербург).

На измерительном стенде для контроля оптических характеристик дифракционных решеток проведено макетирование оптической схемы

спектральных линий и значительно меньшим (≈ 5 раз) астигматизмом. Ширина аппаратной функции составила ≈ 27 мкм по всему рабочему спектральному диапазону. По спектральному разрешению прибор не уступает серийному спектрографу ДФС-458, при существенно меньших (в 5-6 раз) массогабаритных характеристиках. Аберрационные характеристики хорошо согласуются с данными теоретического расчета.

Разработанная оптическая схема спектрографа также может быть использована для создания спектроскопической аппаратуры, предназначенной для проведения исследований в области вакуумного ультрафиолета и лазерной спектроскопии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках работы получены следующие результаты:

1. Проведенный анализ литературы, посвященной спектральному приборостроению и производству элементов дифракционной оптики показал, что ВГДР становятся основным диспергирующим элементом современных спектроанализаторов. Однако коррекционные возможности ВГДР 1-го поколения исчерпаны, дальнейшее повышение технических характеристик приборов возможно с применением ВГДР 2-го поколения.
2. Разработано программное обеспечение, включающее в себя:
 - комплекс программ **VGDR** для проведения расчетов оптических схем спектральных приборов и схем записи ВГДР,
 - программа расчета технологических параметров голографической установки для записи ВГДР 2-го поколения.
3. Рассчитаны оптическая схема эмиссионного спектрографа на круге Роуленда и схема записи ВГДР 2-го поколения с пространственной частотой 3600 штр/мм для него. Показано, что применение ВГДР 2-го поколения в данной

схеме позволяет одновременно уменьшить значения сагиттальной комы (на порядок) и астигматизма схемы (≈ 5 раз).

4. Проведен анализ влияния погрешностей установки элементов схемы записи на абберационные характеристики ВГДР и теоретически обоснованы требования к погрешностям сборки и юстировки схем записи.
5. Разработана специализированная голографическая установка для записи ВГДР 2-го поколения и методика ее юстировки, обеспечивающие заданные технические требования и измерительный стенд для технологического контроля оптических характеристик дифракционных решеток.
6. Впервые предложена методика юстировки и калибровки по длинам волн измерительных стендов для контроля оптических характеристик дифракционных решеток, макетов и серийных приборов при помощи узкополосных голограммных фильтров.
7. Изготовлена ВГДР 2-го поколения с пространственной частотой 3600 штр/мм. Экспериментальные исследования ВГДР 2-го поколения в схеме спектрографа хорошо согласуются с результатами теоретических расчетов.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1) Белокопытов А.А., Павлычева Н.К., Селезнев В.А. Получение голограммных дифракционных решеток в негомоцентрических пучках // Оптический журнал. -Том 74. -№3. 2007. -С.60-64.
- 2) Белокопытов А.А., Шакиров Н.Ф. Спектрограф с голограммной дифракционной решеткой второго поколения // Оптический журнал. -Т. 77. №8. 2010 г. -С.61-66.
- 3) Белокопытов А.А., Буйнов Г.Н., Шигапова Н.М. Узкополосные голограммные фильтры как эффективное средство защиты фотоприемных устройств приборов ночного видения от воздействия мощных лазерных пучков // Прикладная физика -№5. 2006. -с.113-115.

- 4) Белокопытов А.А. Голограммный фильтр. Патент РФ на изобретение №2376617 от 13.02.2008. Бюл. №35.
- 5) Белокопытов А.А. Спектрометр с голограммной дифракционной решеткой второго поколения. Сборник тезисов международной молодежной научной конференции "XVII Туполевские чтения", 26-28 мая 2009. г. Казань.
- 6) Белокопытов А.А., Буйнов Г.Н., Шигапова Н.М. Узкополосные голограммные фильтры как эффективное средство защиты фотоприемных устройств приборов ночного видения от воздействия мощных лазерных пучков // Тезисы докладов 18-ой международной конференции по фотоэлектронике и приборам ночного видения 25-28 мая 2004 г. -М. -с.148.
- 7) Белокопытов А.А., Вендеревская И.Г. Исследование люминесцентных свойств голограммных узкополосных фильтров на основе БХЖ // Международная конференция "Прикладная оптика" 18-22 октября 2004 г. - Санкт-Петербург. -Сборник трудов. -Том II. -с. 237
- 8) Белокопытов А.А., Вендеревская И.Г., Шигапова Н.М. Установки для регистрации отражательных голограмм // Сборник трудов международной конференции "Оптика 2007" 15-19 октября 2007 г. Санкт-Петербург.
- 9) Белокопытов А.А., Вендеревская И.Г., Лукин А.В., Сидорова Т.Б., Шигапова Н.М. Узкополосные голограммные фильтры (Notch-filters) с предельно высокой оптической плотностью для подавления мощных лазерных пучков в ультрафиолетовой, видимой и инфракрасной областях спектра. Особенности изготовления и аттестации // Сборник тезисов докладов международной конференции X Харитоновские тематические научные чтения. 11-14 марта 2008г. -Саров. –с.209-212.
- 10) Белокопытов А.А., Вендеревская И.Г., Любимов А.И., Шигапова Н.М. Notch-фильтры как средство защиты от лазерного излучения // Сборник материалов XX Всероссийской межвузовской научно-технической конференции. -Часть 2. -Казань 13-15 мая 2008. -С. 275.

Формат 60x84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Печ.л. 1,25. Усл.печ.л. 1,16. Уч.-изд.л. 1,0.
Тираж 100. Заказ Н 161.

Типография Издательства Казанского государственного
технического университета
420111, г. Казань, ул. К. Маркса, 10

