

**Бланк Вероника Александровна**

**МАЛОМАССОГАБАРИТНЫЕ ГИПЕРСПЕКТРОМЕТРЫ НА ОСНОВЕ  
ДИСПЕРСИОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, СОДЕРЖАЩИХ  
ОСЕСИММЕТРИЧНЫЕ СТРУКТУРЫ**

01.04.05 – Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Самара – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» на кафедре технической кибернетики и в Институте систем обработки изображений РАН – филиале Федерального государственного учреждения «Федеральный научно-исследовательский центр «Кристаллография и фотоника» Российской академии наук».

**Научный руководитель:**

**Скиданов Роман Васильевич**, доктор физико-математических наук, доцент.

**Официальные оппоненты:**

**Ежов Евгений Григорьевич**, доктор физико-математических наук, доцент, федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Пензенский государственный университет архитектуры и строительства», кафедра информационных систем и компьютерного моделирования, профессор кафедры.

**Майорова Александра Михайловна**, кандидат физико-математических наук, Самарский филиал федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук, лаборатория моделирования и автоматизации лазерных систем, старший научный сотрудник.

**Ведущая организация:**

федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук» (ИАиЭ СО РАН), г. Новосибирск.

Защита состоится 17 декабря 2019 г. в 12.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.01 на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева», по адресу: 443086, г. Самара, Московское шоссе, д. 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева» по электронному адресу: [https://ssau.ru/files/resources/dis\\_protection/Blank\\_V\\_A\\_Malomassogabaritnye\\_giperspektrometry\\_na\\_osnove.pdf](https://ssau.ru/files/resources/dis_protection/Blank_V_A_Malomassogabaritnye_giperspektrometry_na_osnove.pdf)

Автореферат разослан

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.215.01

Колпаков Всеволод Анатольевич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность

В последнее время наметилась тенденция к разработке относительно простых по конструкции гиперспектрометров для использования на беспилотных летательных аппаратах, на вращающихся платформах, оптические схемы таких спектрометров представляют собой телескопическую систему с дисперсионным элементом в фокальной плоскости [Cai, F., 2017; Zhang, H., 2017; Wu, T., 2016].

Попытки использовать аксикон в изображающих системах делаются достаточно давно [Arimoto, R., 1992]. Дифракционный аксикон представляет собой дифракционную решётку, состоящую из концентрических окружностей [Хонина, С.Н., 2011; Burvall, A., 2007]. В такой конфигурации отсутствуют характерные для гиперспектрометров с решеткой аберрационные искажения.

Также рассматривалась возможность использования дифракционной линзы для различных приложений [Казанский, Н.Л., 2011; Motogaito, A., 2013]. Дифракционная линза строит изображения для разных длин волн на разных расстояниях.

В работах [Kitaura, N., 1995; Park, Y., 2008] рассматривается спектрометр, использующий в качестве дисперсионного элемента дифракционную линзу. При этом фокусируемый дифракционной линзой свет пропускается через диафрагму и попадает на фотодиод, т.е. рассматриваемый в работах спектрометр не является изображающим.

Также дифракционная линза позволяет реализовать изображающий спектрометр [Lyons, D., 1996]. В работе описано простейшее исследование по возможности использования дифракционной линзы в качестве основы для изображающего спектрометра. Однако, поскольку в качестве дисперсионного элемента выступала бинарная дифракционная линза, авторы вынуждены были рассмотреть упрощенные примеры объектов для демонстрации работы такого спектрометра. В качестве исходных объектов рассматривались несколько разноцветных символов на мониторе, каждый из которых излучает в относительно узком спектральном диапазоне, кроме того для удобства символы были разделены пространственно, что еще сильнее упрощает задачу.

В последнее время появилось много конструкций спектрометров, которые можно использовать совместно с мобильными устройствами [Yang, C., 2010; Chang, C.I., 2013]. Их использование позволяет любому человеку проводить ряд анализов, которые до этого были доступны только специализированным лабораториям.

В последнее десятилетие гиперспектрометры широко используются в различных областях исследований. Чаще всего такие гиперспектрометры используют на спутниках или самолетах, но все больший интерес вызывают миниатюрные спектрометры для создания портативных устройств [Chang, C.I., 2013].

В работах [Yang, C., 2011; Yang, C., 2012] рассмотрены компактные спектрометры на основе линзы-решетки. Такой ДОЭ обладает двойной функциональностью, работая, одновременно, как изображающая линза и как дифракционная решетка. Устройства, использующие в своем составе гармоническую линзу, позволяют существенно уменьшить массу, так как толщина гармонической линзы – это толщина пластины, на которой нанесен рельеф.

В рамках данной диссертации предполагается рассмотреть конструкции гиперспектрометров с дисперсионными элементами на плоской поверхности. При этом некоторые дисперсионные элементы будут иметь более сложную структуру, чем дифракционная решетка. В качестве дисперсионных элементов будут рассматриваться: дифракционный аксикон, 4-х уровневая дифракционная линза, а также ДОЭ, сочетающий в одном микрорельефе линзу и дифракционную решетку.

## **Степень разработанности темы**

В статьях R. Arimoto, В.В. Котляра, С.В. Карпеева были рассмотрены свойства дифракционных аксиконов и возможность их использования в изображающих системах. Френелевские линзы известны еще с 1991 года, на основе таких линз исследованы неизображающие спектрометры в статьях K. Miyamoto, D. Faklis, N. Kitaura, D. Lyons, Y. Park, Н.Л. Казанского. Наиболее интересным вариантом является объединение изображающих и дифракционных свойств в элементе, этой теме посвящены работы С. Yang, Q. Zhou. Так как в таком случае появляется наиболее компактная схема.

Однако, необходимо подчеркнуть, что в работах вышеперечисленных авторов:

1. Не исследовалась возможность использования радиально-симметричных элементов в качестве дисперсионного элемента в составе изображающих гиперспектрометров.

2. Не рассмотрена возможность использования френелевского спектрометра, основанного на 4-х уровневой дифракционной линзе в изображающем режиме.

3. Не рассматривалась возможность сочетания дифракционной решетки и линзы в одном рельефе. Так же не рассматривался изображающий вариант спектрометра, основанного на этом элементе.

На основе проведенного обзора были сформулированы цель и задачи диссертации.

### **Цель диссертационной работы**

Разработка, моделирование и экспериментальное исследование изображающих спектрометров с улучшенными свойствами на основе использования плоских дисперсионных элементов, в том числе в виде радиально-симметричных структур.

### **Задачи диссертационной работы**

1. Исследование функции рассеяния точки в изображающем гиперспектрометре с длиннофокусным входным объективом и дифракционным аксиконом в качестве дисперсионного элемента;

2. Экспериментальное исследование возможности использования 4-х уровневой дифракционной линзы с малой глубиной резкости в качестве дисперсионного элемента, а так же реализовать наиболее простую оптическую схему полнокадрового изображающего гиперспектрометра;

3. Экспериментальное исследование возможности использования оптических элементов с двойной функциональностью в изображающем гиперспектрометре.

### **Научная новизна**

1. Предложено использование дифракционного аксикона в качестве дисперсионного элемента вместо линейной решетки. Показано, что функция рассеяния точки в изображающем гиперспектрометре с длиннофокусным входным объективом и дифракционным аксиконом в качестве дисперсионного элемента сохраняет свою форму по всему угловому полю изображения, при этом ширина функции рассеяния точки составляет 120 мкм, а это меньше ширины функции рассеяния точки в этой же оптической схеме с линейной дифракционной решеткой, в которой она достигает максимального значения в 150 мкм;

2. Показано, что использование 4-х уровневой дифракционной линзы в качестве дисперсионного элемента изображающего спектрометра позволяет добиться сопоставимых параметров с существующими спектрометрами на основе спектральных узкополосных фильтров, а именно: размер изображения - 200\*200 при ширине ФРТ 70 мкм, спектральное разрешение - 5 нм и ошибка формирования спектра не более 13%;

3. Показано, что при объединении в одном рельефе гармонической линзы и дифракционной решетки можно получить изображающий режим работы гиперспектрометра, в отличие от существующего элемента, в котором дифракционная

решетка и линза Френеля являются разными микрорельефами. При этом спектральное разрешение от 8 нм до 15 нм и пространственное разрешение до  $50\text{мм}^{-1}$ .

### **Методы исследований**

В диссертационной работе используются геометрикооптическое моделирование, моделирование на основе интегральных преобразований, натурный эксперимент.

**Теоретическая значимость.** Рассмотрен новый тип дисперсионных элементов.

**Практическая значимость.** Практическая значимость исследования заключается в возможности использования разработанных методов и подходов при разработке компактных изображающих спектрометров.

### **На защиту выносятся:**

1. Функция рассеяния точки в изображающем гиперспектрометре с длиннофокусным входным объективом и дифракционным аксиконом в качестве дисперсионного элемента сохраняет свою форму по всему угловому полю изображения, при этом ширина функции рассеяния точки составляет 120 мкм, а это меньше ширины функции рассеяния точки в этой же оптической схеме с линейной дифракционной решеткой, в которой она достигает максимального значения в 150 мкм;

2. Использование 4-х уровневой дифракционной линзы в качестве дисперсионного элемента изображающего спектрометра позволяет добиться сопоставимых параметров с существующими спектрометрами на основе спектральных узкополосных фильтров, а именно: размер изображения -  $200*200$  при ширине ФРТ 70 мкм, спектральное разрешение - 5 нм и ошибка формирования спектра не более 13%;

3. Элемент с объединенным рельефом гармонической линзы и дифракционной решетки позволяет получить изображающий режим работы гиперспектрометра, в отличие от существующего элемента, в котором дифракционная решетка и линза Френеля являются разными микрорельефами. При этом спектральное разрешение от 8 нм до 15 нм и пространственное разрешение до  $50\text{мм}^{-1}$ .

**Достоверность результатов** работы обеспечивается качественным совпадением результатов математического моделирования с результатами натуральных экспериментов, и с результатами расчёта в коммерческих пакетах FRED и ZEMAX.

### **Апробация результатов диссертации**

Основные результаты и положения диссертации были представлены на конференциях: XII Всероссийский молодежный самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике Самара, 12-15 ноября 2014 г.; Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2015) Самара, 29 июня-01 июля 2015 г.; XIII Международная конференция «Оптические технологии в телекоммуникациях» г. Уфа, 16-18 ноября 2015г.; XIII Всероссийский молодежный самарский конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике Самара, 11-14 ноября 2015 г.; XII Международная конференция «голография. наука и практика. (ГОЛОЭКСПО-2015)» Казань, 12-15 октября 2015 г.; Международная конференция и молодёжная школа «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2016) Самара, 17-19 мая 2016 г.; Международный семинар «Основы лазерных микро- и нанотехнологий» г. Санкт-Петербург, 27 июня-1июля 2016г.; XIII международная конференция «Голография. Наука и практика» (ГОЛОЭКСПО - 2016) Ярославль, 12-15 сентября 2016 г.; III Международной конференции и молодёжной школы «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2017) г. Самара, 25-27 апреля 2017 г.; Симпозиум: Оптика и биофотоника 2017, г. Саратов, 26-29 сентября 2017 г.; XV Всероссийский молодежный самарский конкурс-конференция научных работ по

оптике и лазерной физике Самара, 14-18 ноября 2017 г.; IV Международной конференции и молодежной школы «Информационные технологии и нанотехнологии». г. Самара, 24-27 апреля 2018 г.; XV международной конференции по голографии и прикладным оптическим технологиям (HOLOEXPO - 2018)г. Нижний Новгород, 11-13 сентября 2018 г.

### Публикации

По теме диссертации опубликовано 24 работы, в том числе 8 статей в научных журналах и изданиях, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией для опубликования основных научных результатов диссертации на соискание ученой степени кандидата и доктора наук.

### Личный вклад автора

Изложенные результаты в диссертации получены соискателем, либо при его непосредственном участии. Соискателем самостоятельно проводились разработка математических моделей изображающих спектрометров и проведение экспериментов с этими спектрометрами. Постановка задач и обсуждение результатов проводились совместно с научным руководителем.

Разработаны математические модели: спектрометра с аксиконом в качестве дисперсионного элемента; спектрометр с 4-х уровневой дифракционной линзой в качестве дисперсионного элемента, а так же спектрометр на основе линзы-решетки. Разработаны экспериментальные макеты и проведены натурные эксперимент. А так же собраны устройства изображающих спектрометров на основе дифракционной линзы и на основе линзы-решетки.

### Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка, включающего 92 наименования. Работа изложена на 106 листах машинописного текста, содержит 72 рисунка, 2 таблицы.

### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ

**Во введении** обоснованы актуальность темы, новизна, теоретическая и практическая значимость и достоверность результатов работы, проведён обзор научной литературы по теме диссертационного исследования и сформулированы основные результаты, выносимые на защиту.

**Первая глава** посвящена обзору существующих конструкций гиперспектрометров.

**Во второй главе** исследуется изображающий гиперспектрометр на основе дифракционного аксикона.

На рисунке 1 изображена схема установки, где: 1 – линза с диафрагменным числом 10, 2- вертикальная щелевая диафрагма, 3,5-линзы с фокусным расстоянием 100 мм, 4-аксикон нулевого порядка, 6-ПЗС камера. В данной схеме использовался аксикон с периодом 25 мкм. Ширина щелевой диафрагмы 50 мкм.

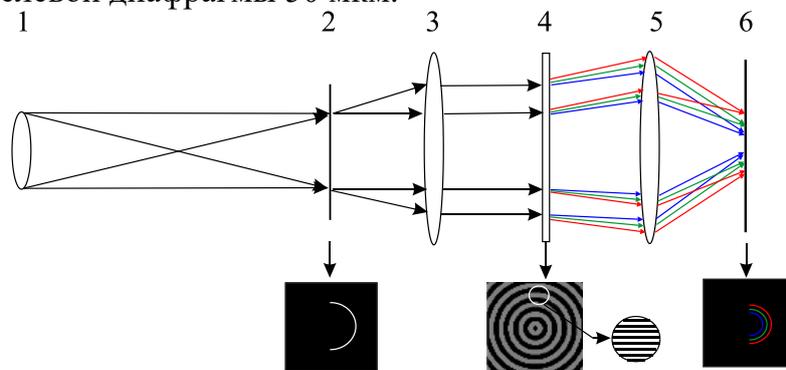


Рисунок 1 – Схема установки гиперспектрометра с аксиконом

Проведено моделирование работы гиперспектрометров на основе дифракционной решетки и дифракционного аксикона в коммерческом пакете FRED, а так же получена функции рассеяния точки для этих гиперспектрометров.

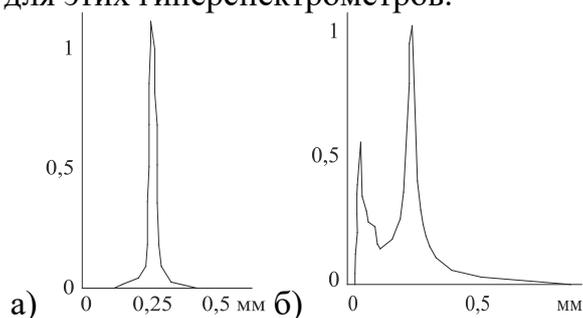


Рисунок 2 – Функции рассеяния точки для изображающего спектрометра с дифракционной решёткой: функция рассеяния точки, находящейся вблизи оптической оси (а), функция рассеяния точки, смещенной по одной из координат (б)

Как видно из рисунка 2б функция рассеяния точки существенно уширяется для внеосевого случая почти в 10 раз.

На рисунке 3 изображены функции рассеяния точки для гиперспектрометра с аксиконом, полученные в коммерческом пакете FRED. На рисунке 3а изображена ФРТ с углом отклонения  $\phi = 175^\circ$ , на 3б ее сечение, а на 3в сечение ФРТ вдоль широкой части. На 3г изображена ФРТ с углом отклонения  $\phi = 40^\circ$ , на 3д ее сечение, а на 3е сечение ФРТ вдоль широкой части.

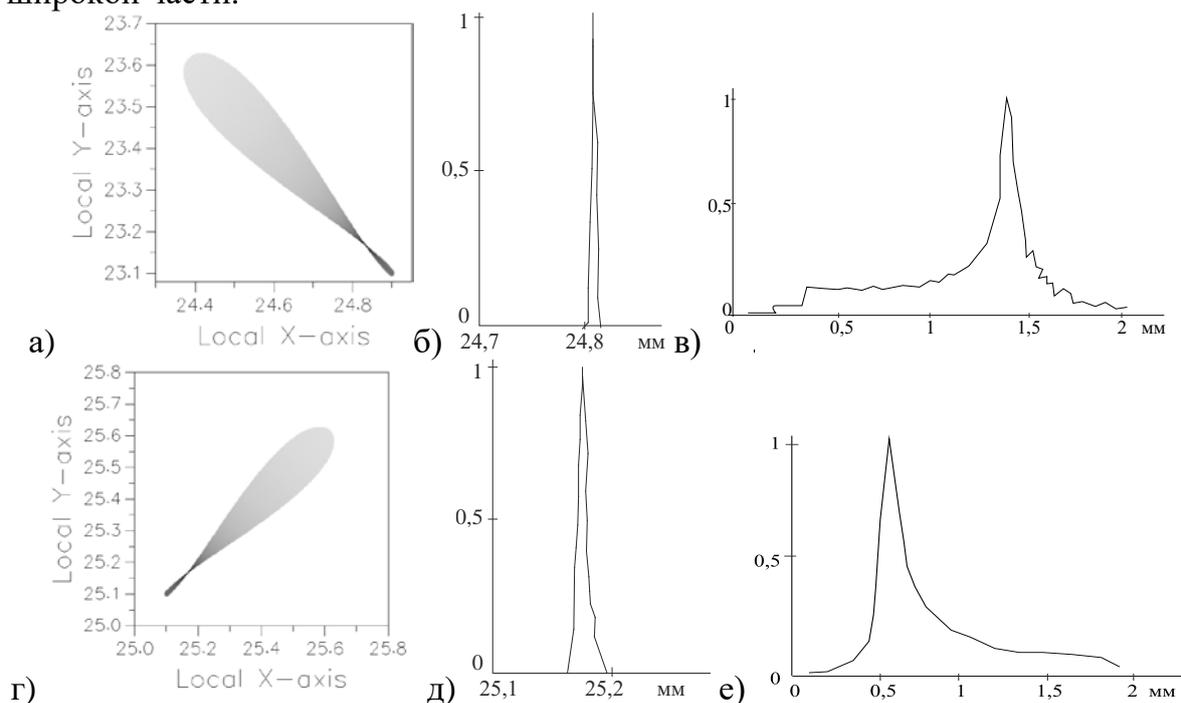


Рисунок 3 – Функции рассеяния точки для гиперспектрометра с аксиконом при разных положениях точки в кольцевой диафрагме: ФРТ (а), ее сечение (б) и сечение вдоль широкой части ФРТ для  $\phi = 175^\circ$  (в); ФРТ для  $\phi=40^\circ$  (г), ее сечение (д) и сечение вдоль широкой части ФРТ для  $\phi=40^\circ$  (е)

Из получившихся ФРТ для гиперспектрометра с аксиконом можно сделать вывод, что они по форме примерно одинаковы для любых точек объекта, на кольцевой диафрагме меняется только ориентация в зависимости от местонахождения точки в кольцевой диафрагме. Ширина функции рассеяния точки на всех рисунках также примерно одинакова. По горизонтальной координате ширина ФРТ примерно 15 мкм, по радиальной

координате 120 мкм. Ширина ФРТ в такой же оптической системе, но с дифракционной решеткой для внеосевой точки составляет 70 мкм и 150 мкм, по x и y координатам соответственно. Т.е. ширина функции рассеяния точки в системе с аксиконом сопоставима с шириной функции рассеяния точки в системе с дифракционной решёткой, при этом она сохраняется для любой точки изображения.

Была разработана моделирующая программа, которая сканирует изображение полукольцевой щелью. В телескопической системе аксикон был расположен в фокальной плоскости. После того как была получена последовательность изображений на выходе гиперспектрометра для разного положения щели относительно изображения, при помощи специальной программы производилась сборка гиперспектрального изображения из полуколец. На рисунках 4а-г показано восстановление чёрно-белых модельных изображений с помощью сканирования полукольцевой щелью.

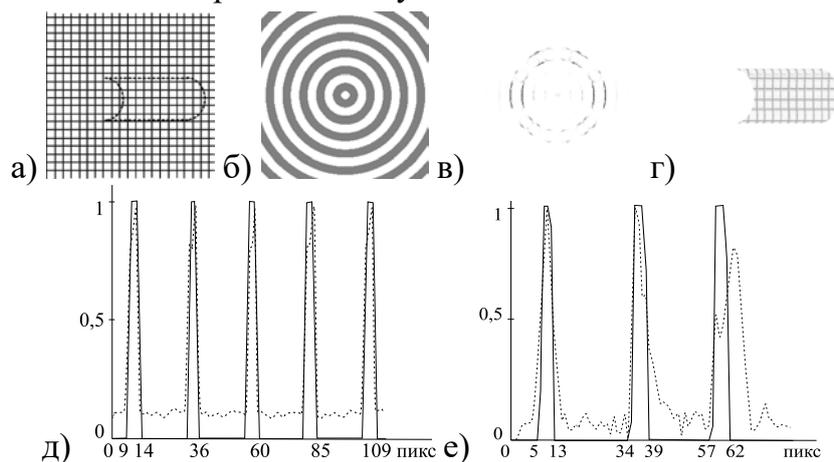


Рисунок 4 – Восстановление изображения полукольцевой щелью:

- а) исходное изображение; б) аксикон; в) изображение на выходе гиперспектрометра;
- г) восстановленное изображение; д) сечение вертикальных линий;
- е) сечение горизонтальных линий

ФРТ можно определить за счет изменения уширения вертикальных и горизонтальных линий. Из рисунков 4д и 4е было получено, что уширение вертикальной линии составило 1 пикс, что соответствует 6 мкм, а уширение горизонтальной 2 пикс, что соответствует 12 мкм.

Преобразование Фурье позволяет моделировать только монохроматический свет. Для того чтобы имитировать сборку гиперспектрального изображения на разных длинах волн было проведено несколько вычислительных экспериментов, в которых менялся период аксикона, что для данной модели полностью идентично изменению длины волны.

Таким образом, на рисунке 5а изображено исходное полутоновое изображение, на 5б изображение восстановлено с длиной волны 450нм, на 5в – с длиной волны 500нм, а на 5г – с длиной волны 550нм.

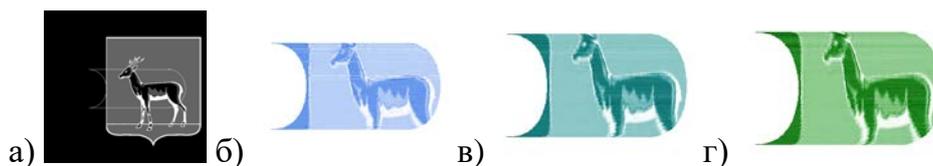


Рисунок 5 – Восстановление полутонового изображения: а) исходное изображение; б) восстановленное изображение с длиной волны 450нм; в) восстановленное изображение с длиной волны 500нм; г) восстановленное изображение с длиной волны 550нм

Как видно из рисунков 4-5 предложенная оптическая схема в целом работает. Восстанавливается форма изображения, если сравнивать изображения по границам погрешность в среднем составляет не более 2 пикселей, т.е. примерно на ширину кольцевой диафрагмы. Компоненты с разной длиной волны пространственно разделяются (рисунок 5).

На основании полученных результатов можно сделать вывод о принципиальной возможности использования дифракционного аксикона в качестве дисперсионного элемента гиперспектрометра.

**В третьей главе** было проведено исследование изображающих спектрометров на основе дифракционных и гармонических линз.

Для проверки возможности восстановления спектрального распределения для каждой точки изображения, для объектов с широким спектром, был проведён эксперимент, в котором строилась серия изображений белого светодиода с помощью дифракционной линзы с фокусным расстоянием 50мм на длине волны равной 550нм. Для эксперимента использовалась четырёхуровневая дифракционная линза. Диаметр линзы составлял 10 мм.

На рисунке 6 представлена оптическая схема установки.

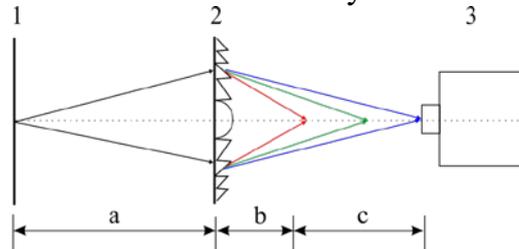


Рисунок 6 – Схема установки. 1 – объект, расположенный на расстоянии  $a$  от дифракционной линзы 2, 3 – ПЗС камера, расположенная на расстоянии  $b=40$ мм от дифракционной линзы. ПЗС-камера установлена на перемещающемся столике с шагом перемещения  $0,5$ мм,  $c=30$ мм

После получения последовательности распределений интенсивности на разных расстояниях  $I_j(x,y)$  необходимо решить систему линейных уравнений.

$$I_j(x,y) = \sum_{i=1}^N I(x,y,\lambda_i) \frac{A}{A + (b_j - b_i)^2 k_i^2 \pi / 4}, j = \overline{1, N}, \quad (1)$$

где  $I(x,y,\lambda_i)$  – элементы спектрального изображения,  $b_i, b_j$  – расстояния соответствующие длинам волн,  $k_i$  – диафрагменное число дифракционной линзы,  $I_j(x,y)$  – распределения интенсивности снятые на расстояниях  $b_j$ ,  $A$  – площадь пикселя в ПЗС матрице. Диафрагменное число для дифракционной линзы определяется по формуле  $k_i = d/b_i$ , где  $d$  – диаметр линзы. Формула (1) была выведена из геометрических соображений. Для точного фокуса, когда расстояние  $b_j$  соответствует длине волны, считаем, что размер пятна рассеяния меньше размера пикселя ПЗС матрицы ( $4,65\text{мкм} \times 4,65\text{мкм}$ ). Это действительно так, диаметр линзы 10 мм при фокусном расстоянии 50 мм, т.е. размер дифракционного пятна рассеяния будет около 4мкм. При смещении на определенное расстояние размер пятна считается исходя из геометрических соображений. Для изображающего спектрометра эта система уравнений усложняется, поскольку надо учесть вклад в рассеянную компоненту соседних точек на объекте

$$I_j(x, y) = \sum_{i=1}^N \int_{u^2+v^2 < R^2} \frac{I(x+u, y+v, \lambda_i) A}{A + (b_j - b_i)^2 k_i^{-2} \pi / 4} dudv, j = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где  $R = (b_j - b_i) k_i^{-1}$  – размер пятна размытия точки при смещении из фокуса, при  $j=i$ , в расчетах будем считать, что пятно рассеяния по площади совпадает с площадью пикселя. В дискретном случае интеграл в формуле (2) вырождается в сумму по пятну рассеяния точки для соответствующей длины волны. Система уравнений (2) для широкого спектрального диапазона имеет высокую вычислительную сложность. Количество точек в дискретном варианте, по которым проводится суммирование, может достигать нескольких тысяч. Для случая, когда объект, для которого формируется спектральное изображение, относительно компактен, вычислительная сложность несколько снижается.

В результате решение системы уравнений (2) для изображений диода, для одной из его точек было получено следующее спектральное распределение (рисунок 7).

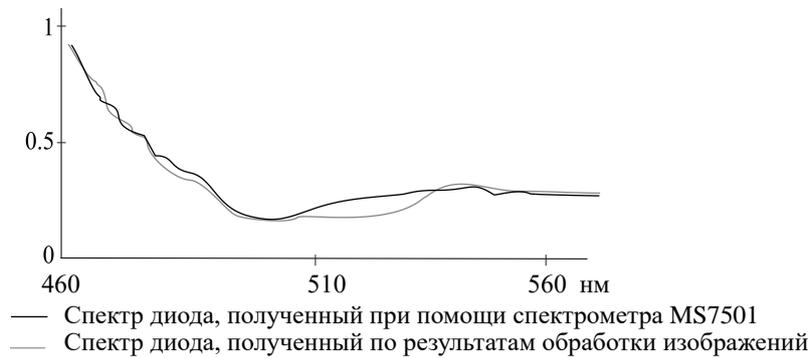


Рисунок 7 – Спектр диода, полученный при помощи спектрометра и по результатам обработки набора экспериментальных изображений по формуле (2)

СКО восстановления спектра составило 11%.

Также было рассмотрено спектральное изображение структуры из зеленых, красных и белого светодиодов в форме креста, в центре располагается белый диод, по вертикали зеленые диоды, по горизонтали красные диоды (рисунок 8). Спектры таких диодов довольно сильно отличаются друг от друга. При получении спектрального изображения такого объекта, подтверждается, что спектрометр на основе дифракционной линзы действительно является изображающим.

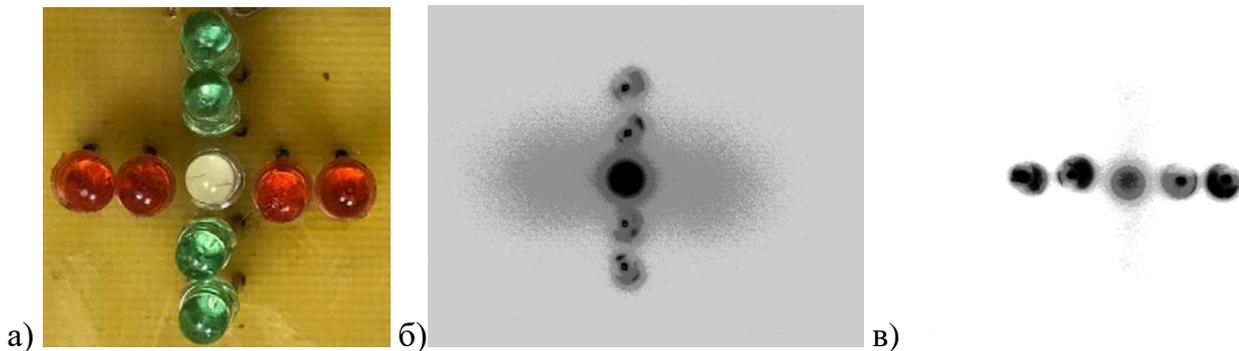


Рисунок 8 – Изображение структуры из зеленых, красных и белого диода (в центре).  
 (а) – исходное изображение; (б) – положение матрицы, при котором видны зеленые диоды,  
 (в) – положение матрицы, при котором видны красные диоды

Из рисунка 8 хорошо видно, что изображения красного и зеленого диода формируются на разных расстояниях от линзы. На рисунке 9 представлены спектры,

полученные для зеленого и красного диодов в сравнении с их же спектрами, измеренными на MS7501.

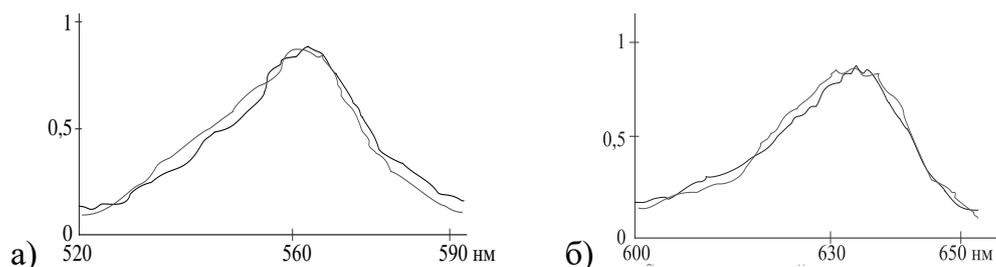


Рисунок 9 – Спектр зеленого диода, полученный в эксперименте в сравнении с его же спектром, измеренным на MS7501 (а), спектр красного диода, полученный в эксперименте в сравнении с его же спектром, измеренных на MS7501 (б)

Значение СКО на рисунке 9а - 8%, на рисунке 9б – 11%.

Результаты проведенных экспериментов по формированию спектрального изображения из серии изображений снятых при сканировании вдоль оптической оси дифракционной линзы показали, что погрешность формирования спектральных изображений с помощью дифракционной линзы составила 8-13%, что примерно соответствует погрешности существующих образцов гиперспектральных камер.

На основе обработки изображений на рисунке 8 были получены оценки для полихроматической функции рассеяния точки на разных длинах волн. На рисунке 10 представлено сечение такой ФРТ на длине волны 550нм. Ширина ФРТ по полуспаду интенсивности составляет около 70мкм. Так, при использовании светочувствительной матрицы NOIL2SM1300A с размером элемента 14мкм, можно будет сформировать резкое изображение разрешением 264\*256, что примерно соответствует разрешению в [Ми, Т, 2019] при этом разрешение матрицы NOIL2SM1300A позволяет снимать с частотой 6266Гц, что позволяет формировать гиперспектральное изображение даже с большей частотой, чем в [Ми, Т, 2019].

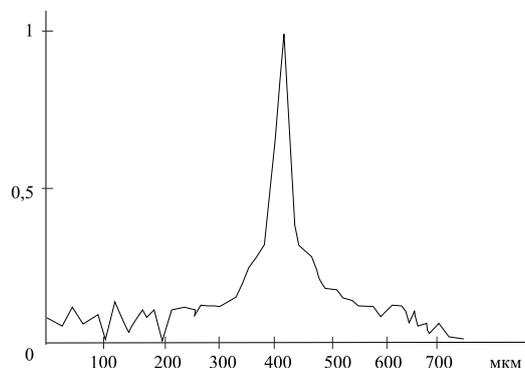


Рисунок 10 – Мультиспектральная функция рассеяния точки

Так же проводились эксперименты по формированию гиперкуба с цветных изображений при помощи перемещения ПЗС камеры. Число каналов для этого гиперспектрометра равно 60. Таким образом, спектральное разрешение составляет 5 нм. На рисунке 11 продемонстрирована серия гиперспектральных изображений на различных длинах волн, изменяющиеся в зависимости от расстояния до ПЗС камеры.

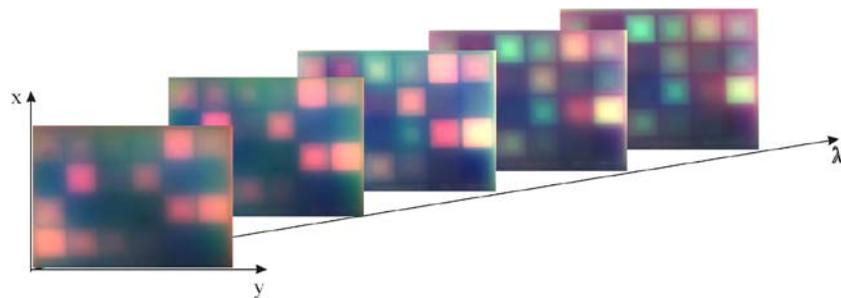


Рисунок 11 – Серия гиперспектральных изображений

Для демонстрации качества изображений получаемых на гиперспектрометре с дифракционной линзой на рисунке 12 представлены изображения, полученные с цветного изображения, распечатанного на бумаге.

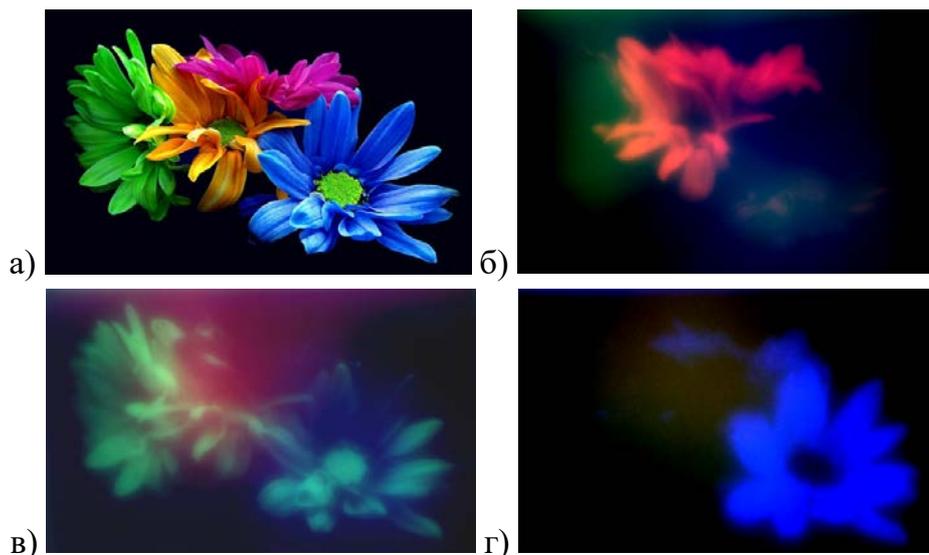


Рисунок 12 – Изображения, полученные с цветного изображения гиперспектрометром на основе дифракционной линзы: а) исходное изображение; б) 610 нм; в) 500 нм; г) 450 нм

Исходя из полученных результатов, можно говорить о работоспособности этого простейшего изображающего спектрометра, состоящего всего из одной 4-х уровневой дифракционной линзы. А так же в результате эксперимента показана возможность получения полноразмерных гиперспектральных изображений на разных длинах волн.

Также рассматривается дифракционный оптический элемент, сочетающий в себе свойства линзы и дифракционной решетки. На основе этого элемента был собран лабораторный макет изображающего гиперспектрометра и экспериментально получены гиперспектральные изображения.

На станции лазерной записи был изготовлен элемент с микрорельефом в резисте, нанесенным на кварцевую подложку, который сочетает рельеф гармонической линзы и дифракционной решетки. Фокусное расстояние линзы 120 мм, период решетки 8 мкм. Высота рельефа 6 мкм.

Произведем некоторые расчеты по изготовленной гармонической линзе.

Количество гармоник, укладываемых в видимом диапазоне от 400 нм до 700 нм всего 4 (таблица 1). Так как для  $\lambda = 550$  нм и  $m=6$  получаем:

Таблица 1 – Длины волн точно фокусируемые гармонической линзой

$\lambda$ , нм	412	472	550	660
k	8	7	6	5

где k – гармоника.

Например, оптическая сила такой линзы в воздухе вычисляется по формуле

$$P \equiv \frac{1}{f} = \frac{k\lambda}{r_1^2}, \quad (3)$$

где  $f$  – фокусное расстояние линзы,  $\lambda$  – рассчитанная длина волны,  $r_1^2$  – радиус первой зоны Френеля.

Используя формулу (3) вычислили  $\Delta f$ , значение которой равно 20,5 мм.

Дифракционная эффективность вычисляется по формуле

$$\eta = \sin^2 \left( \frac{m\lambda_0}{\lambda} - k \right) \quad (4)$$

Дифракционная эффективность по формуле (4) для всех длин волн равна 100%, у которых число гармоник является целым. Рассчитав дифракционную эффективность для длин волн: 511 нм и 605 нм, получили 93% и 90% соответственно.

На основе гармонической линзы с дифракционной решеткой был собран изображающий спектрометр, оптическая схема, которого продемонстрирована на рисунке 13. В качестве источника света (1) использовался прожектор со светодиодами, 2 – гармоническая линза с дифракционной решеткой, фокусное расстояние которой 120 мм, 3 – объектив с фокусным расстоянием 50 мм и 4 – ПЗС-матрица расположена на фокусном расстоянии объектива.

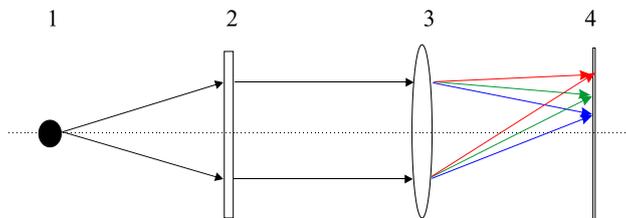


Рисунок 13 – Оптическая схема изображающего спектрометра, основанного на гармонической линзе с дифракционной решеткой

В первую очередь, для получения частотно-контрастной характеристики было снято изображение черно-белой светотехнической таблицы, и восстановлено при помощи компьютерной обработки на разных длинах волн. На рисунке 14а исходное изображение черно-белой светотехнической таблицы, а на 14б восстановленное изображение на длине волны 550 нм. Также для сравнения результатов, полученных с помощью гиперспектрометра на основе линзы-решетки, было получено изображение при помощи объектива Гелиос-44-М4 на рисунке 14в.

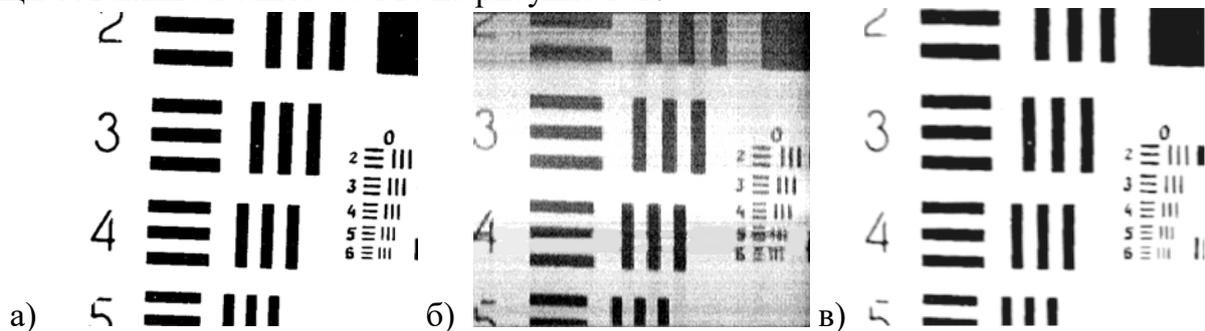


Рисунок 14 – Черно-белая светотехническая таблица: а) исходная; б) восстановленное изображение на длине волны 550 нм (250\*230); в) полученное изображение объективом Гелиос-44-М4 (485\*440)

На основе полученных результатов был построен график функции ЧКХ (рисунок 15).

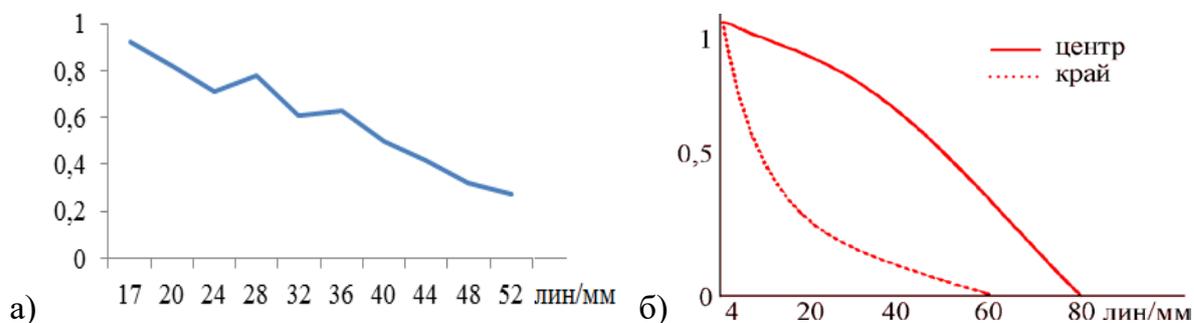


Рисунок 15 – Функция ЧКХ: а) для изображающего спектрометра на длине волны 550 нм; б) для объектива Гелиос-44-М4

Видно, что ЧКХ для линзы-решетки сопоставима с ЧКХ объектива Гелиос-44-М4, а некоторое ухудшение качества полученного изображения вполне объяснимо, поскольку формирование изображения в гиперспектрометре осуществляется в процессе сборки из набора полос.

Был проведен эксперимент по сканированию и восстановлению изображений представленных на рисунке 16а. На рисунке 16б представлены восстановленные контрастные изображения на длине волны 550 нм.

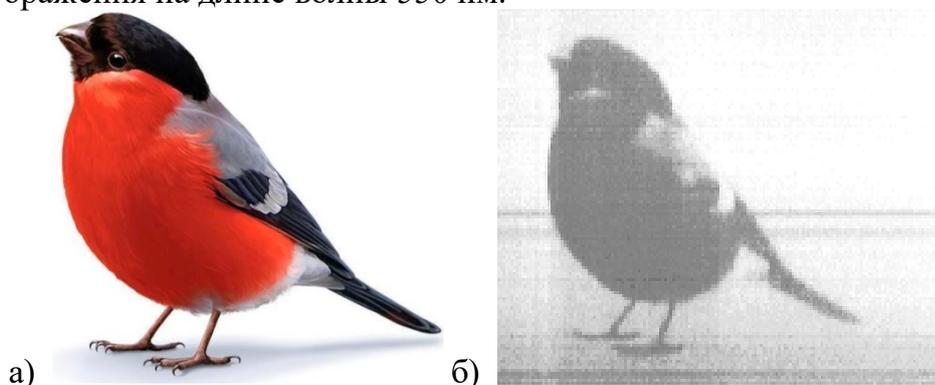


Рисунок 16 – Исходные цветные изображения – а и восстановленные изображения на длине волны 550 нм – б

Количество каналов в этом случае определяется шириной спектра, соответственно получается от 20 до 40 каналов в диапазоне от 400 до 700 нм. Спектральное разрешение 8-15 нм. Полученные характеристики, лучше, чем характеристики существующего компактного изображающего спектрометра на основе дифракционной линзы и двух призм [Cai, F, 2017]. Поскольку там получено спектральное разрешение 17 нм в диапазоне от 400 до 677 нм.

Показано, что при использовании таких дифракционных элементов с двойной функциональностью можно уменьшить устройство до маломассогабаритных размеров, которые позволят работать с мобильными устройствами.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В настоящей диссертации исследована возможность минимизации количества оптических элементов в составе изображающих гиперспектрометров. Доказано, что в изображающем гиперспектрометре с длиннофокусным входным объективом и дифракционным аксиконом в качестве дисперсионного элемента функция рассеяния точки сохраняет свою форму по всему угловому полю изображения. Изготовлены элементы с рельефом 4-х уровневой дифракционной линзы, а так же гармонической линзы и дифракционной решетки. Реализован изображающий режим работы гиперспектрометров, основанных на дифракционной линзе и линзе-решетки.

Основными результатами работы являются:

1. Экспериментально показано, что функция рассеяния точки в изображающем гиперспектрометре с длиннофокусным входным объективом и дифракционным аксиконом в качестве дисперсионного элемента сохраняет свою форму по всему растру изображения, при этом ее ширина меньше ширины функции рассеяния точки в этой же оптической схеме с линейной дифракционной решеткой по направлению перпендикулярном щелевой диафрагме в 1,25 раза, а в направлении вдоль щелевой диафрагмы - в 4,5 раза;

2. Экспериментально показана возможность использования 4-х уровневой дифракционной линзы в качестве дисперсионного элемента в изображающем спектрометре. Реализована наиболее простая оптическая схема полнокадрового изображающего гиперспектрометра при сканировании вдоль оптической оси. Показано, что использование 4-х уровневой дифракционной линзы в качестве дисперсионного элемента изображающего позволяет добиться сопоставимых параметров с существующими спектрометрами на основе спектральных узкополосных фильтров, а именно: размер изображения - 200\*200 при ширине ФРТ 70 мкм, спектральное разрешение - 5 нм и ошибка формирования спектра не более 13%;

3. Реализован изображающий гиперспектрометр, в котором дифракционная решетка и гармоническая линза совмещены в одном микрорельефе. Это позволяет получить спектральное разрешение от 8 до 15 нм в диапазоне от 400 нм до 700 нм и пространственное разрешение до 50 мм<sup>-1</sup>. Что лучше, чем разрешение существующего компактного изображающего спектрометра на основе дифракционной линзы и двух призм, в котором спектральное разрешение составляет 17 нм в диапазоне от 400 нм до 677 нм.

#### **Основные публикации по теме диссертации:**

**Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК и журналах, реферируемых Scopus,**

#### **WoS:**

1. Скиданов, Р.В. Изображающий гиперспектрометр на основе системы, выполняющей кольцевое преобразование Радона [Текст] / Р.В. Скиданов, **В.А. Бланк** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. – 2015. – Т. 17(2). – С. 21-25.
2. **Blank, V.A.** Diffraction lens in imaging spectrometer [Text] / **V.A. Blank**, R.V. Skidanov // CEUR Workshop Proceedings. – 2015. – Vol. 1490. – P. 17-26.
3. Скиданов, Р.В. Исследование изображающего спектрометра на основе дифракционной линзы [Текст] / Р.В. Скиданов, **В.А. Бланк**, А.А. Морозов // Компьютерная оптика. – 2015. – Т. 39(2). – С. 218-223.
4. **Blank V.A.**, Skidanov R.V. Experimental study of the Optical Transfer Function (OTF) and spectral accuracy of the imaging hyperspectrometer based on the Offner scheme [Text] / **V.A. Blank**, R.V. Skidanov // CEUR Workshop Proceedings. – 2016. – Vol. 1638. – P. 8-15.
5. Скиданов, Р.В. Двухдиапазонная дифракционная решетка для спектрометра на основе схемы Оффнера [Текст] / Р.В. Скиданов, **В.А. Бланк** // Компьютерная оптика. - 2016. – Т. 40(6). – С. 968-971.
6. Skidanov, R.V. Diffraction axicon as the dispersive element for imaging hyperspectrometer [Text] / R.V. Skidanov, **V.A. Blank** // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. – 2016. – Vol. 9807. – P. 98070G.
7. **Blank, V.A.** Imaging hyperspectrometer-consol [Text] / **V.A. Blank**, R.V. Skidanov // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 201. – P. 129-134.
8. **Blank, V.A.** Hyperspectrometer based on a harmonic lens with diffraction grating [Text] / **V.A. Blank**, R.V. Skidanov // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 1096. – P. 1-7.

## Публикации в прочих изданиях

9. **Бланк, В.А.** Построение гиперспектральных изображений с помощью аксикона нулевого порядка [Текст] / **В.А. Бланк** // Сборник тезисов XII Всероссийского молодежного Самарского конкурс-конф. Научных работ по оптике и лазерной физике. – М: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, 2014. – 520 с.
10. **Бланк, В.А.** Дифракционные оптические элементы с двойной функциональностью в изображающих гиперспектрометрах [Текст] / **В.А. Бланк**, Р.В. Скиданов // Голография. Наука и практика. – 2016. – С. 191-193.
11. **Бланк, В.А.** Гиперспектрометр, основанный на гармонической линзе с дифракционной решеткой [Текст] / **В.А. Бланк**, Р.В. Скиданов // Сборник трудов ИТНТ-2018. – Новая техника, 2018. – с. 86-90.