

МИНОБРНАУКИ РОССИИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

**Интерференционная микроскопия тонких слоев в оптическом волновом  
поле с широкими частотным и угловым спектрами**

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД ОБ ОСНОВНЫХ РЕЗУЛЬТАТАХ ПОДГОТОВЛЕННОЙ  
НАУЧНО-КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ (ДИССЕРТАЦИИ)

аспиранта 4 курса

направления 03.06.01 «Физика и астрономия»

физического факультета

Дьяченко Антона Андреевича

Научный руководитель

профессор кафедры оптики и биофотоники,

д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ Рябухо В.П.

Саратов 2019

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы.**

В настоящее время когерентно оптические методы исследования занимает широкое место при решении задач исследования и контроля микроструктуры объектов, внутренней структуры образцов. Эти методы используются для изучения физических свойств исследуемых микрообъектов. Когерентно-оптические методы отличаются своей высокой точностью, простотой реализации, высокой чувствительностью. Работа данных методов основана на использовании когерентных свойств оптического излучения и применение этих свойств для анализа получаемых результатов.

К когерентным методам исследования в широком смысле можно отнести любой метод, основанный на анализе излучения прошедшего через объект, либо отразившегося от него. В рамках данной работы, тем не менее, термин «когерентные методы» будет рассматриваться в более узком смысле, а именно, как методы, основанные на анализе интерференционных эффектов, возникающих при взаимодействии когерентных волновых полей.

В настоящее время к наиболее распространенным и традиционным когерентно-оптическим методам, используемых для визуализации и изучения исследуемых микрообъектов, можно отнести оптическую когерентную томографию, интерференционную микроскопию, голографическую аналоговую и цифровую микроскопию, дифракционную фазовую микроскопию, интерференционную конфокальную микроскопию.

Все указанные выше методы основаны на взаимном наложении взаимнокогерентных волновых полей, одно из которых является опорным, т.е. свойства которого заранее известны и определены условиями эксперимента или устройством используемой оптической системы, а второе поле – предметное – несет информацию об исследуемом объекте (в следствие прохождения или отражения от исследуемого объекта). В формируемой в этом случае интерференционном поле содержится информация, характеризующаяся функцией взаимной когерентности интерферирующих полей и позволяет получить необходимую информацию. Существуют разнообразные методы анализа и получения информации их регистрируемых интерферограмм, среди которых можно отметить анализ интерференционного сигнала во временной и спектральной областях, а также корреляционные методы.

Особый интерес вызывают методы интерференционной микроскопии. Схожие по своим основным способам работы с методами ОКТ, данные методы в основном направлены на изучение поверхностной микроструктуры исследуемых объектов для определения их оптических и физических свойств.

Широкое применение методов интерференционной микроскопии обусловлено большим количеством решаемых задач и разнообразием изучаемых объектов.

Отдельный интерес для изучения представляют собой особый класс объектов, которые обладают неоднородной внутренней оптической структурой

– слоистые объекты. Широкое применение и распространение таких объектов в различных областях обуславливает актуальность таких исследований, и, в то же время, приводит к ряду трудностей при их исследованиях. К этим трудностям, в первую очередь, относится малая толщина, как самих объектов, так и их внутренних оптических слоев. Использование для исследования таких объектов оптических систем с когерентным и низко когерентным источником освещения приводит к формированию дополнительных интерференционных картин, являющихся результатом наложения волн, отраженных границами слоев этих объектов. Формирование дополнительных интерференционных картин, с одной стороны, является «помехой» использования традиционных методов интерференционной микроскопии при исследовании этих объектов, а с другой – позволяет проводить исследования без использования какой-либо опорной волны, что может существенно упростить схемы используемых оптических систем.

Развитие теории формирования интерференционных картин тонких слоистых объектов, наблюдаемых в оптическом микроскопе при освещении исследуемых объектов излучением с широким частотным и угловым спектрами, разработка алгоритмов анализа формируемых интерференционных картин и методы определения толщин (оптических и геометрических) исследуемых микрообъектов объектов и являются темами данной работы.

**Актуальность темы исследования** объясняется высокой практической значимостью контроля за параметрами толщин тонких слоев, определение их микроструктуры и оптических свойств, а также требованием простоты применяемой экспериментальной установки алгоритмов и методов интерференционной микроскопии, что обеспечивает доступность и возможность применения метода для решения широкого класса задач в высокоразрешающей оптической микроскопии.

**Цель диссертационной работы** – развитие теоретического аппарата интерференционной микроскопии, связанного с анализом интерференционных изображений тонких слоистых микрообъектов, формируемых в оптическом микроскопе без участия опорной волны, учитывающего когерентные свойства оптических полей с широкими частотными и угловыми спектрами, на основе которого усовершенствуются методы определения оптических и геометрических толщин исследуемых объектов.

Для достижения поставленной цели поставлены и решались следующие **задачи**:

- Разработка математической модели формирования интерференционного поля изображения тонкого слоистого объекта на выходе оптического микроскопа при освещении объекта оптическим полем с широкими частотным и угловым спектрами.

- Анализ влияния свойств оптической системы на структуру формируемого оптическим микроскопом интерференционного поля слоистого объекта и учет когерентных свойств освещающего поля на структуру интерференционного поля и цвет интерференционной картины.

- Разработка методов измерения оптических толщин тонких слоистых микрообъектов по цвету их интерференционных изображений.
- Влияние свойств цветовых моделей представления изображений и их графических форматов разработанные алгоритмы.

**Объектом** исследования является математическая модель формирования полихроматических интерференционных изображений тонких слоев, формируемые в оптическом микроскопе.

**Предмет** исследования:

- проявление когерентных свойств освещения в изменении цвета интерференционных изображений;
- методы определения оптических толщин тонких слоистых микрообъектов по цвету интерференционных изображений.

**Достоверность научных результатов**, представленных в работе, подтверждается соответствием полученных результатов (как теоретических, так и экспериментальных) с известными экспериментальными данными, и подтверждением предложенных в работе методов измерения оптических толщин слоистых объектов.

#### **Научная новизна диссертационной работы**

- Разработана теоретическая модель формирования интерференционных изображений слоистых объектов в оптическом микроскопе, учитывающая частотные и угловые спектральные свойства освещения, свойства регистрирующей аппаратуры и оптические свойства исследуемых микрообъектов.

- Показано совместное количественное влияние частотных и угловых спектральных свойств освещения на цвет интерференционного изображения слоистого микрообъекта, на основе чего установлены пределы применения существующих математических моделей описания процессов формирования интерференционных изображений.

- Разработан новый метод измерения оптических толщин тонких слоистых объектов, основанный на колориметрических измерениях полихроматического интерференционного изображения микрообъектов в оптической микроскопии.

- Предложен метод измерения оптических толщин тонких пленок основанный на спектральных методах анализа интерференционных изображений микрообъектов.

#### **Теоретическая и практическая значимость исследования**

Предложенная теоретическая модель формирования интерференционных изображений слоистых объектов обладает полнотой представления основных физических процессов, возникающих в процессе распространения оптических

полей в микроскопе и образования изображения. Эта модель учитывает основные параметры оптической системы, исследуемых объектов и устройств фоторегистрации, что позволяет проводить комплексный анализ наблюдаемых в экспериментах результатов и предсказывать появление новых эффектов.

Проведенный анализ разработанной математической модели показал корректное описание представленных в известных автору работах физических эффектов и результатов.

Основной областью применения предложенной модели является высокоразрешающая оптическая микроскопия, в которой, как правило, и используется освещение микрообъектов с широкими частотным и угловым спектрами, и возникают интерференционные эффекты, анализу которых посвящена диссертационная работа. Тем не менее, универсальность данной модели позволяет ее использовать и в других смежных областях, таких как оптическая когерентная томография и интерференционная микроскопия.

Разработанный на основе полученных теоретических результатов метод измерения оптических толщин тонких слоистых объектов обладает простотой технической реализации, что позволяет использовать его в широких областях применения, таких как радиоэлектроника, наноматериалы, биомедицина и др.

#### **Положения и результаты, выносимые на защиту**

1. Теоретическая модель формирования интерференционных изображений слоистых объектов в оптической микроскопии позволяющая учитывать влияние спектральных свойств освещающего поля на структуру интерференционных изображений.
2. Описание процессов формирования цветных интерференционных изображений слоистых объектов при использовании в системах оптической микроскопии микрообъективов с высокой числовой апертурой нельзя проводить без учета совместного влияния частотного и углового спектров освещающего поля.
3. Количественное изменение цвета интерференционного изображения слоистого микрообъекта при увеличении числовой апертуры освещения в пределах 0,4 - 0,85 составляет от 30%-50%.
4. Разработанный колориметрический алгоритм определения оптических толщин позволяющий проводить измерения оптических толщин тонких слоистых объектов в диапазоне 100 – 1000 нм без использования калибровочных измерений и дополнительной предобработки изображений.

**Научно-квалификационная работа** состоит из введения, трех глав, и заключения. Первая глава посвящена описанию формирования интерференционных полей слоистых объектов в оптической микроскопии. Во второй главе описывается математическая модель формирования полихроматических интерференционных изображений слоистых микрообъектов и исследование проявления эффектов частотного и углового

спектров освещающего поля на структуру этих изображений. В третьей главе описываются методы определения оптических толщин тонких слоев по цвету их интерференционных изображений и рассматриваются вопросы влияния на эти методы цветовых моделей представления изображения. Полный объем работы составляет 105 страниц, включая 25 рисунков и 2 таблицы. Список литературы содержит 101 наименование.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В данной диссертационной работе развиты теоретические модели интерференционной микроскопии, связанные с расчетом и анализом полихроматических интерференционных изображений слоистых микрообъектов в оптической микроскопии без участия опорной волны при использовании освещения с широким частотным и угловым спектрами. Рассмотрено влияние оптических свойств объекта, используемой оптической системы, а также когерентных свойств освещения на структуру интерференционного изображения. Разработан новый метод определения оптических толщин слоистых микрообъектов.

В рамках исследования получены и приведены в диссертационной работе основные результаты:

1. Разработана теоретическая модель формирования полихроматического изображения слоистого микрообъекта в оптической микроскопии с учетом свойств исследуемого объекта (количество слоев, их толщина), частотных спектральных свойств оптической системы, когерентных свойств формируемого оптической системой освещения, а также свойств регистрирующей аппаратуры.
2. На основе рассмотренной модели получены аналитические выражения, позволяющие описать распределение интенсивности интерференционного поля, образованного наложением взаимнокогерентных волн, отраженных границами слоев микрообъекта в плоскости регистрации изображения, что позволяет моделировать полихроматические интерференционные изображения слоистых микрообъектов с заданными параметрами.
3. При использовании в высокоразрешающей микроскопии микрообъективов с высоким увеличением необходимо учитывать не только частотный спектр освещающего поля, но конечную ширину углового спектра, при анализе полихроматических интерференционных изображений.
4. Разработан метод определения оптических толщин слоистых микрообъектов по анализу их интерференционного изображения, на основе колориметрического сравнения цветов экспериментального и опорного изображений. Применение данного метода позволяет избежать необходимости разработки «сложной» экспериментальной установки, при этом сохранив высокую точность измерения. Анализ разработанного метода показал возможность проводить измерения с точностью  $\pm 15$  нм.
5. Применение предложенного метода для решения конкретных задач медицинской диагностики показали высокую корреляцию с результатами полученными в результате традиционных лабораторных исследований

крови. Данный результат позволяет судить о работоспособности предложенного метода и показывает одну из возможностей его применения.

6. В рамках исследований помимо основных задач можно выделить, т.н. сопутствующие задачи. К одной из таких относится алгоритм автоматизированного анализа изображений. В работе представлены результаты морфологической обработки и сегментации исследуемого интерференционных изображений эритроцитов в мазке крови. Данный метод позволяет в автоматическом режиме определять координаты, размеры и другие параметры измеряемых объектов и позволяет расширить применение методов измерения слоистых микрообъектов.

Полученные результаты предоставляют широкие возможности для их применения как в области оптической микроскопии, так и в областях интерференционной микроскопии, ОКТ и других когерентных методах исследования.

### **Апробация работы.**

Основные результаты научных исследований представлены на следующих научных симпозиумах, конференциях и школах:

1. XXIX Международная Школа-симпозиум по когерентной оптике и голографии (Томск, 2015 г.)
2. International Symposium Optics and Biophotonics-III (SFM'15), (Саратов, 2015 г.)
3. Heart Failure 2015/ 2nd World Congress on Acute Heart Failure, (Севилья, Испания 2015 г.)
4. Международная Молодежная конференция Физика.СПб (Санкт-Петербург, 2015 г.)
5. International Symposium Optics and Biophotonics-IV (SFM'16), (Саратов, 2016 г.)
6. VI Международная конференция «Фотоника и информационная оптика» (Москва, 2017 г.)
7. International Symposium Optics and Biophotonics-V (SFM'17), (Саратов, 2017 г.)
8. XXX Международная Школа-симпозиум по голографии, когерентной оптике и фотонике (Калининград, 2017 г.)
9. International Symposium Optics and Biophotonics-VI (SFM'18), (Саратов, 2018 г.)
10. International Symposium: Photonics Asia-2018. (Пекин, Китай, 2018)
11. X Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики-2018» (Санкт-Петербург, 2018 г.)
12. International Symposium: Photonics West. (Сан-Франциско, США, 2019)
13. VIII Международная конференция «Фотоника и информационная оптика» (Москва, 2019 г.).

Исследования по теме диссертации проводились в рамках проекта РНФ "Методы лазерной корреляционной интерферометрии для прецизионных

измерений микроструктуры объектов технического и биологического происхождения", № 16-19-10528.

### **Публикации:**

По результатам исследования автором было опубликовано 10 работ из них 6 в статьях российских и международных журналов, входящих в список изданий, рекомендованных ВАК для публикации материалов кандидатских диссертаций.

1. Дьяченко, А. А. Метод интерференции белого света в тонких пленках для анализа морфологии эритроцитов / А. А. Дьяченко, А. А. Пайзиев, В. П. Рябухо, Л. И. Малинова // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т.58, №11-3. – С. 116-119.
2. Дьяченко, А. А. Компьютерный анализ интерференционных цветов эритроцитов в мазке крови для оценки степени эритроцитарного анизоцитоза / А. А. Дьяченко, Л. И. Малинова, В. П. Рябухо // Методы компьютерной диагностики в биологии и медицине – 2015: материалы Всероссийской молодежной конференции. Саратов: Изд-во «Саратовский источник»– 2015. – С. 260-263.
3. Dyachenko, A. A. Morphological analysis of red blood cells by polychromatic interference microscopy of thin films / A. A. Dyachenko, V. P. Ryabukho, L. I. Malinova // Journal of Physics: Conference Series. - 2016. - Т. 769. № 1. - P. 012018.
4. Malinova, L. I. Red blood cell distribution width assessment by polychromatic interference microscopy of thin films in chronic heart failure / L. I. Malinova, A. A. Dyachenko, Ryabukho V. P. // Cardiovascular Research. – 2016. – Т. 111, № S1. – P. S78.
5. Дьяченко А. А. Определение оптических толщин слоистых объектов по интерференционным цветам изображений в микроскопии белого света / А. А. Дьяченко, В. П. Рябухо // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, №5. – С. 670-679.
6. Дьяченко А. А. Проявление пространственных и временных спектральных свойств оптической системы в полихроматической интерференционной микроскопии / А. А. Дьяченко, В. П. Рябухо // VI международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М: Изд-во НИЯУ «МИФИ». С. 278-279.
7. Дьяченко А. А. Эффекты пространственно-временной когерентности при формировании в микроскопии интерференционных изображений тонких пленок / А. А. Дьяченко, Л. А. Максимова, В. П. Рябухо // Сборник трудов X Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018» Под ред. проф. В.Г. Беспалова, проф. С.А. Козлова.– СПб: Университет ИТМО, 2018. – 467 с.
8. Дьяченко А. А. Проявление эффектов углового спектра освещающего поля в полихроматической интерференционной микроскопии слоистых

- объектов / А. А. Дьяченко, Л. А. Максимова, В. П. Рябухо // Компьютерная оптика. – 2018. – Т. 42, №6. – С. 959-969.
9. Максимова Л. А. Формирование микроскопических интерференционных изображений тонких слоев при большой числовой апертуре поля освещения / Л. А. Максимова, А. А. Дьяченко, Н. Ю. Мысина // VIII международная конференция по фотонике и информационной оптике: Сборник научных трудов. М: Изд-во НИЯУ «МИФИ». С. 681-683.
10. Дьяченко А. А. Учет цветовых моделей представления цвета интерференционных изображений в алгоритмах определения оптических толщин тонких слоистых объектов в высокоразрешающей интерференционной микроскопии / А. А. Дьяченко, В. П. Рябухо // Компьютерная оптика. – 2019. – Т. XX, №X. – С. XX-XX. (принята в печать)