

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ТОЛЩИН СЛОИСТЫХ ОБЪЕКТОВ ПО ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫМ ЦВЕТАМ ИЗОБРАЖЕНИЙ В МИКРОСКОПИИ БЕЛОГО СВЕТА

А.А. Дьяченко^{1,2}, В.П. Рябухо^{1,2}

¹Институт проблем точной механики и управления РАН, Саратов, Россия,

²Саратовский государственный университет, Саратов, Россия

Аннотация

Рассмотрены закономерности формирования цветных интерференционных картин однослойных тонких фазовых объектов в оптической микроскопии при использовании полихроматического излучения. Получены выражения для распределения интенсивности интерференционного поля изображения с учетом спектральных свойств излучения. Разработан алгоритм компьютерного расчета и формирования цветных интерференционных изображений в белом свете в зависимости от оптической толщины слоистого объекта в рамках цветовой модели RGB. Представлены результаты моделирования изображений, показаны изменения в цвете и структуре интерференционной картины при варьировании параметров оптической системы микроскопа, формы, размеров и оптических свойств объекта. Показана возможность определения оптической толщины слоя объекта путем численного сравнения интерференционных цветов, получаемых в численном и натурном экспериментах.

Ключевые слова: оптическая микроскопия, интерференционные изображения, когерентность, интерференционный цвет, цифровая обработка изображений, тонкие пленки.

Цитирование: 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. – DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-670-679.

Введение

В оптической микроскопии для визуализации и измерений фазовых объектов используются интерференционные методы, которые имеют высокие осевое разрешение, точность измерений и чувствительность, по сравнению с обычной микроскопией, и достаточно широкие функциональные возможности в технологических и биомедицинских приложениях [1–6]. Эти методы и средства их реализации, объединенные в единую область – интерференционную микроскопию, занимают важное место в решении задач контроля микроструктуры отражающих и прозрачных объектов в технике и биомедицине. При наблюдении и анализе фазовых объектов с применением обычной микроскопии возникают трудности их визуализации ввиду низкого контраста объект – фон [2]. Кроме этого, осевое разрешение обычных микроскопов, ограничиваемое числовой апертурой объектива [2, 7], оказывается недостаточным для анализа объектов с толщиной в микронном и субмикронном диапазонах.

К интерференционным методам микроскопии относятся: интерференционная микроскопия с использованием низкокогерентных и лазерных источников света [4–6, 8, 9], голографическая аналоговая и цифровая микроскопия [10, 11], полнопольная когерентная томография [12, 13], дифракционная фазовая микроскопия [14], интерференционная конфокальная микроскопия [15]. Отличительной стороной этих методов служит регистрация, анализ и обработка интерференционных картин, изображений и сигналов.

Методы интерференционной микроскопии основаны на когерентном сложении поля изображения объекта с когерентной ему опорной волной. В результате

такого сложения формируется интерференционное изображение, параметры которого зависят от микроструктуры исследуемого объекта, частотного спектра и временной когерентности, углового спектра и пространственной когерентности освещающего объект поля. Интерференционные изображения возникают и в обычной микроскопии в отсутствие специально сформированного опорного пучка света. Такие эффекты интерференции обусловлены когерентным характером формирования изображений, когда микроскопом разрешается область пространственной когерентности освещающего волнового поля [2, 7], и в том случае, когда объект имеет тонкую слоистую структуру, оптическая толщина которой не превышает половины длины продольной когерентности освещающего объект поля – когда отраженные границами слоев волны оказываются взаимно когерентными [7].

Особый интерес представляют интерференционные эффекты в тонких пленках [7, 16–20]. При освещении белым светом пленки ее микроскопическое изображение приобретает интерференционную окраску, которая зависит от ее оптической толщины. Кроме того, на цвет влияют и другие факторы – спектральный состав излучения, амплитудные коэффициенты отражения света от объекта и фазовые сдвиги волн при отражении от ее поверхности, коэффициент поглощения слоя пленки и его спектральная зависимость, спектральные параметры как самого объекта, так и регистрирующей изображение аппаратуры.

В технике методы анализа интерференционных цветов используются для измерения толщины диэлектрических и полупроводниковых пленок [17, 19], контроля за толщиной смазочных покрытий [20, 21], измерения толщин окисных пленок на поверхности

металлов и полупроводников, толщины зазоров между поверхностями диэлектриков в оптической промышленности [22, 23], а также для определения механических напряжений в прозрачных средах, в частности, при производстве технического стекла, изделий из стекла и пластика [24].

Существенным недостатком этих методов является субъективное восприятие и оценка цвета картины, наблюдаемой непосредственно в системе микроскопа или отображаемой средствами компьютерной техники, используемой для записи и наблюдения изображений. Для устранения этой субъективности необходима разработка компьютерного алгоритма анализа цвета интерференционной картины.

С физической точки зрения ключевая задача в разработке методов и алгоритмов анализа интерференционных цветов сводится к теоретическому описанию процессов формирования и цифровой записи интерференционных изображений слоистых объектов в микроскопии. В работе [9] рассматривается интерференционный микроскоп Линника и формирование в нем интерференционных изображений с использованием опорной волны. Основное внимание уделяется рассмотрению интерференционных картин и интерференционных сигналов, образующихся в результате интерференции опорной волны с объектными волнами, отраженными границами слоев объекта. Использование опорной волны предопределило введение дополнительной плоскости отсчета, относительно которой вводятся разности хода всех интерферирующих волн. Полученные математические выражения для интерференционных изображений допускают переход к случаю отсутствия опорной волны, но в работе в основном рассматриваются процессы формирования и компьютерного моделирования интерференционных изображений и сигналов с использованием опорной волны, в том числе и в случае относительно толстых слоев, когда отсутствует интерференция волн, отраженных границами слоя. И не рассматривается возможность решения обратной задачи – проведения измерений оптической толщины слоев по цветам интерференционных изображений путем количественного сравнения цветов экспериментальных и смоделированных изображений. Наша работа направлена на решение именно этой задачи с использованием теоретических подходов из [9].

В рамках данной работы рассмотрена теория формирования цветных интерференционных изображений слоистых объектов в белом свете в микроскопах без опорного плеча с учетом влияния параметров системы цифровой записи изображения, коэффициентов отражения от границ объекта и возникающих фазовых сдвигов отраженных волн. К целям и задачам данной работы относится рассмотрение вопросов регистрации цветных изображений цифровыми средствами записи, влияние их спектральных свойств на результат записи, возможность использования количественных данных цветов интерференционных картин для реализации метода определения оптических

толщин слоистых микрообъектов по интерференционным цветам их изображений.

1. Формирование интерференционного изображения слоистого объекта

Вид изображения в микроскопе может существенным образом зависеть от условий освещения объекта, спектрального состава и когерентных свойств излучения [2]. Свойства освещающего излучения проявляются в параметрах изображений микрообъектов при реализации режимов некогерентного, частично когерентного или когерентного формирования изображений, а также в интерференционных изображениях объектов со слоистой структурой. Формальный анализ процессов формирования интерференционных изображений наиболее прост и нагляден в режиме пространственно когерентного освещения объекта – при освещении квазиплоской волной. В микроскопии отражающих объектов (рис. 1) такой режим устанавливается при использовании в осветительной системе достаточно малой апертурной диафрагмы, отображаемой конденсорной линзой в заднюю фокальную плоскость микрообъектива – освещение по Кёллеру [2, 7]. В этом случае объект освещается квазипараллельным пучком света – в каждую точку его поверхности падает пучок лучей с малой угловой апертурой, определяемой размерами изображения апертурной диафрагмы и фокусом объектива. Если при этом размер зрачка объектива существенно превышает размеры изображения апертуры освещающей системы, то в микроскопе реализуется режим пространственно когерентного освещения и когерентного формирования изображения структуры объекта [2, 7]. На рис. 1 представлена оптическая схема микроскопа с записью цифровых изображений отражающих объектов.

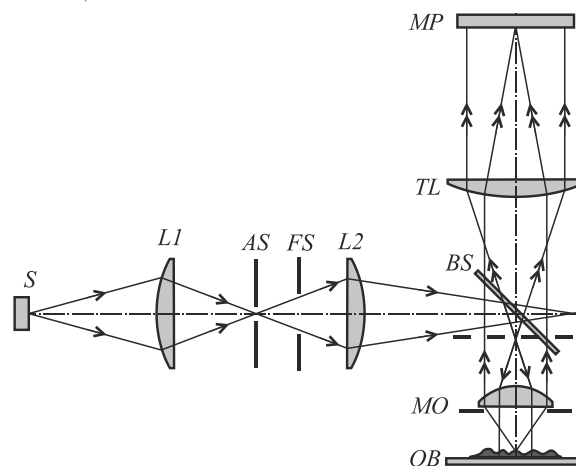


Рис. 1. Схема микроскопа: S – протяженный источник света, L1, L2 – линзы осветительной системы, AS – апертурная диафрагма, FS – диафрагма поля зрения, BS – делитель пучка, MO – микрообъектив, OB – объект, TL – тубусная линза, MP – матричный фотодетектор

При исследовании объектов с прозрачной слоистой структурой дополнительные интерференционные эффекты возникают в результате сложения волн, отраженных границами слоев. Для таких интерференцион-

ных эффектов необходимо, чтобы оптическая толщина слоя была меньше половины длины продольной когерентности освещающего поля. При использовании полихроматического света в этом случае возникает цветная интерференционная картина при визуальном наблюдении или при записи изображения с помощью цветных фотодетекторов. Такому условию соответствуют пленки толщиной от долей до единицы микрометра, поскольку длина временной когерентности видимого света составляет $\approx 2,3$ мкм.

В оптических микроскопах, как правило, используется протяженный пространственно некогерентный источник белого света – лампа накаливания или светодиод. Использование такого источника необходимо из энергетических требований и для реализации режима пространственно квазиинкогерентного освещения объекта и, соответственно, квазиинкогерентного процесса формирования изображения, что во многих практических случаях оказывается предпочтительнее когерентного или частично когерентного режимов формирования изображения [2]. Использование регулируемой апертурной диафрагмы AS (рис. 1), переотображаемой конденсорной линзой L2 в заднюю фокальную плоскость микрообъектива MO, позволяет создавать режим пространственно когерентного освещения объекта и когерентного формирования изображения. При минимальной диафрагме ее изображение в задней фокальной плоскости микрообъектива становится почти точечным, и в этом случае объект освещается вдоль оптической оси почти плоской волной. В теоретической части данной работы рассмотрен именно такой режим работы микроскопа для упрощения формального анализа формирования интерференционных изображений. Длина продольной когерентности в этом случае равна длине временной когерентности, определяемой только шириной частотного спектра света [7]. Однако при использовании широкой апертурной диафрагмы и, соответственно, освещении объекта полем с широким угловым спектром продольная длина когерентности поля становится зависимой от ширины частотного и ширины углового спектров поля [25, 26], что должно проявиться в интерференционных изображениях, в том числе и в его интерференционном цвете.

При исследовании слоистых объектов отраженное объектом волновое поле состоит из нескольких волн, отраженных границами слоев. В простейшем, но часто встречающемся на практике случае однослойного объекта в формировании интерференционного изображения участвуют две волны. Эти волны могут быть взаимно когерентными, создавая интерференционное изображение объекта, если их оптическая разность хода Δ , возникающая при прохождении светом слоя и отражении от его границ, оказывается меньше длины временной когерентности волнового поля l_c , воспринимаемого фотодетектором. При использовании источника белого света в изображении возникают интерференционные эффекты, создавая цветовую окраску в изображении во всем диапазоне цветовой шкалы при его визуальном наблюдении. При исполь-

зовании цветных матричных фотодетекторов и компьютерной визуализации изображений регистрируются и воспроизводятся цветные интерференционные изображения, как правило, отличающиеся от визуально воспринимаемых этих же изображений. Поэтому математическая модель интерференционного изображения должна учитывать как спектральные свойства источника света, так и регистрирующей аппаратуры, а также цветовые модели формирования цифровых изображений.

Цветное интерференционное изображение можно представить в виде некогерентной суперпозиции монохромных изображений, формирующихся на разных длинах волн. Цвет результирующего изображения определяется соотношением интенсивностей этих изображений. Интенсивность интерференционного изображения на определенной длине волны зависит от разности фаз $\Delta\phi$ интерферирующих волн, которая определяется оптической разностью хода волн Δ в слое объекта и фазовыми сдвигами ϕ_1 и ϕ_2 , возникающими при отражении волн от границ слоя:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta + (\phi_1 - \phi_2), \tag{1}$$

где Δ зависит от толщины слоя d , его показателя преломления n и угла падения волны θ (рис.2):

$$\Delta = 2d\sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2(\theta)}, \tag{2}$$

где n_0 – показатель преломления среды до слоя.

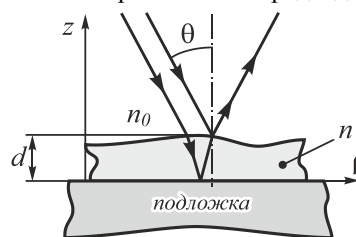


Рис. 2. Оптическая разность хода волн, отраженных границами слоя толщиной d с показателем преломления n на поверхности подложки при падении квазиплоской волны под углом θ из среды с показателем преломления n_0

При нормальном падении света на поверхность объекта, $\theta \approx 0$, оптическая разность хода становится равной $\Delta \approx 2dn$. Вариации угла падения θ в небольших пределах при почти нормальном падении не вносят существенных изменений в разность хода Δ , и приближенное выражение $\Delta \approx 2dn$ можно использовать при освещении объекта полем с достаточно малой угловой апертурой и при небольших наклонах объекта относительно оптической оси микроскопа. Однако при освещении объекта полем с широкой угловой апертурой, что происходит при широко открытой апертурной диафрагме системы освещения, разность хода Δ волн, отраженных границами слоя, существенно зависит от ширины угловой апертуры поля, и это необходимо учитывать в эксперименте и в математической модели интерференционного изображения слоя как в монохроматическом, так и в полихроматическом свете.

Интенсивность изображения $I(\vec{\rho})$ однослойного объекта с двумя отражающими границами, как наблюдаемая в эксперименте величина, пропорциональна среднему по времени квадрату модуля суммы полей [7], отраженных границами слоя:

$$\begin{aligned} I(\vec{\rho}) &\sim \left\langle \left| E_1(t, \vec{\rho}) + E_2(t, \vec{\rho}) \right|^2 \right\rangle = \\ &= I_1(\vec{\rho}) + I_2(\vec{\rho}) + 2\text{Re} \left\langle E_1(t, \vec{\rho}) E_2^*(t, \vec{\rho}) \right\rangle = \\ &= I_1(\vec{\rho}) + I_2(\vec{\rho}) + 2\text{Re} \Gamma_{12}(\vec{\rho}), \end{aligned} \tag{3}$$

где $\langle \dots \rangle$ – усреднение по времени, эквивалентное усреднению по ансамблю реализаций стационарных волновых полей; $I_1(\vec{\rho}) = \left\langle \left| E_1(t, \vec{\rho}) \right|^2 \right\rangle$ и $I_2(\vec{\rho}) = \left\langle \left| E_2(t, \vec{\rho}) \right|^2 \right\rangle$ – интенсивности отраженных границами слоя полей; $\Gamma_{12}(\vec{\rho}) = \left\langle E_1(t, \vec{\rho}) E_2^*(t, \vec{\rho}) \right\rangle$ – функция взаимной когерентности возмущений полей в различных точках $\vec{\rho}(x, y)$ изображения [26].

В случае, когда отражение и пропускание границ слоя, его поглощательная способность и коэффициент преломления сильно зависят от частоты света, то интерферирующие волны будут иметь отличающийся спектральный состав и, следовательно, эффекты интерференции будут определяться взаимным спектром и взаимными когерентными свойствами интерферирующих волн. В более простых условиях, когда отражающие и пропускающие свойства объекта практически не зависят от частоты света ω , можно считать, что на фотодетектор приходят две волны с одинаковым спектральным составом. В этом случае функция взаимной когерентности $\Gamma_{12}(\vec{\rho})$ может быть выражена [26] через функцию автокогерентности – временной когерентности – одного из интерферирующих полей, $\Gamma_{12}(\vec{\rho}) \sim \Gamma_{11}(\vec{\rho}, \Delta)$, где Δ – оптическая разность хода волн. Если энергетические коэффициенты отражения границ слоя R_1 и R_2 не зависят от частоты ω , то (3) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} I(\vec{\rho}) &= I_0(\vec{\rho}) [R_1^2 + R_2(1 - R_1)^2 + \\ &+ 2\sqrt{R_1 R_2} (1 - R_1) |\gamma(\Delta(\vec{\rho}))|] \times \\ &\times \cos \left(\frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta(\vec{\rho}) + \Delta\phi_{12} + \psi \right), \end{aligned} \tag{4}$$

где $I_0(\vec{\rho})$ – интенсивность света в изображении поверхности подложки в отсутствие объекта при полном отражении от поверхности подложки,

$$\gamma(\Delta(\vec{\rho})) = \frac{\Gamma_{11}(\vec{\rho}, \Delta(\vec{\rho}))}{\Gamma_{11}(\vec{\rho}, \Delta = 0)} = \frac{\Gamma_{11}(\vec{\rho}, \Delta(\vec{\rho}))}{I_0(\vec{\rho})} -$$

комплексная степень временной когерентности света, λ_0 – средняя длина волны света, $\Delta\phi_{12} = \phi_1 - \phi_2$, $\psi = \arg \gamma(\Delta) - 2\pi\Delta(\vec{\rho})/\lambda_0$.

Выражение (4) определяет изменение интенсивности изображения в зависимости от разности хода

$\Delta(\vec{\rho})$ в различных точках изображения. Если $\Delta(\vec{\rho})$ превышает длину когерентности l_c , то взаимная когерентность складываемых колебаний нарушается и функция $|\gamma(\Delta)|$ стремится к нулю. В этом случае происходит некогерентное сложение волн и картина интерференции исчезает.

Выражение (4) позволяет проводить компьютерное моделирование интерференционного изображения тонкой пленки с изменяющейся толщиной $d(\vec{\rho})$ в градациях серого с заданными свойствами оптической системы. Для оптического поля в изображении необходимо знать его среднюю длину волны λ_0 , ширину спектра $\Delta\lambda$ и аналитическое выражение для модуля степени когерентности $|\gamma(\Delta)|$, которое можно представлять в виде Гауссовой функции: $|\gamma(\Delta)| \approx \exp(-\Delta^2/l_c^2)$, где l_c – длина когерентности, определяемая шириной спектра $\Delta\lambda$, $l_c \approx \lambda_0^2 / \Delta\lambda$ [7].

Использование выражения (4) эффективно при моделировании интерференционных изображений в градациях серого. При моделировании цветных интерференционных изображений необходимо использовать спектральное представление интерферирующих волновых полей и, соответственно, спектральное представление всего интерференционного уравнения.

2. Спектральное представление уравнения интерференции

При формальном описании интерференционного изображения в белом свете и регистрации его цифровыми устройствами следует учитывать спектральные свойства оптической системы и матричного фотодетектора [9]. Для этого необходимо использовать спектральную форму записи волновых полей [7]:

$$E_0(\vec{\rho}, t) = \int_0^\infty g(\omega) \tau(\omega) f(\omega) \exp(i\omega t) d\omega, \tag{5}$$

$$\begin{aligned} E_1(\vec{\rho}, t) &= E_0(\vec{\rho}, t - \Delta t_1(\vec{\rho})) \sqrt{R_1(\omega)} \exp(i\phi_1) = \\ &= \int_0^\infty \sqrt{R_1(\omega)} \exp(i\phi_1) g(\omega) \tau(\omega) f(\omega) \times \\ &\times \exp(i\omega[t - \Delta t_1]) d\omega, \end{aligned} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} E_2(\vec{\rho}, t) &= E_0(\vec{\rho}, t - \Delta t_2(\vec{\rho})) \times \\ &\times \sqrt{R_2(\omega)} (1 - R_1(\omega)) \exp(i\phi_2) = \\ &= \int_0^\infty \sqrt{R_2(\omega)} \exp(i\phi_2) (1 - R_1(\omega)) \times \\ &\times g(\omega) \tau(\omega) f(\omega) \exp(i\omega[t - \Delta t_2(\vec{\rho})]) d\omega, \end{aligned} \tag{7}$$

где $E_0(\vec{\rho}, t)$ – поле изображения подложки в отсутствие объекта при полном отражении от её поверхности, $E_1(\vec{\rho}, t)$ и $E_2(\vec{\rho}, t)$ – волновые поля, отраженные границами слоя объекта, $\Delta t_1(\vec{\rho})$ и $\Delta t_2(\vec{\rho})$ – временные интервалы запаздывания волн, отраженных границами слоя, относительно волнового поля $E_0(\vec{\rho}, t)$:

$\Delta t_1 = -2d(\bar{\rho})n_0/c$, $\Delta t_2 = 2d(\bar{\rho})(n-n_0)/c$, $d(\bar{\rho})$ – геометрическая толщина слоя, $g(\omega)$ – амплитудный спектр излучения источника, $\tau(\omega)$ – амплитудное спектральное пропускание оптической системы микроскопа, $f(\omega)$ – совместный амплитудный спектр чувствительности и пропускания фильтра фотодетектора.

Интенсивность изображения определяется операцией усреднения мгновенной интенсивности суммарного поля:

$$\begin{aligned}
 I(\bar{\rho}) &\sim \langle |E_1(\bar{\rho}, t) + E_2(\bar{\rho}, t)|^2 \rangle = \\
 &= \int_0^\infty R_1(\omega)g^2(\omega)\tau^2(\omega)f^2(\omega)d\omega + \\
 &+ \int_0^\infty R_2(\omega)(1-R_1(\omega))^2g^2(\omega)\tau^2(\omega)f^2(\omega)d\omega + \quad (8) \\
 &+ 2\text{Re} \left[\exp(i(\phi_1 - \phi_2)) \int_0^\infty \sqrt{R_1(\omega)R_2(\omega)}(1-R_1(\omega)) \times \right. \\
 &\left. \times g^2(\omega)\tau^2(\omega)f^2(\omega)\exp\left(i\omega\frac{\Delta(\bar{\rho})}{c}\right)d\omega \right],
 \end{aligned}$$

где использовано фильтрующее действие дельта-функции $\delta(\omega-\omega') \sim \langle \exp(i(\omega-\omega')t) \rangle$.

Выражение (8) позволяет проводить моделирование интерференционного изображения, используя спектральные свойства источника света, оптических элементов микроскопа, объекта и фотодетектора.

3. Формирование цветного интерференционного изображения

При моделировании полихроматических интерференционных картин необходимо учитывать особенности записи изображений матричными фотодетекторами (ПЗС, КМОП [28]) и численного представления цветных изображений. Для описания записи цветного изображения следует использовать формализованное понятие цвета и цветового пространства. Цвет каждого пиксела изображения задается определенным набором численных значений, которые называются цветовыми координатами представления цвета [29].

В данной работе использовалась цветовая модель RGB, применяемая в системах цифровой регистрации и визуализации цветных изображений. Модель RGB – аддитивная модель цвета, и RGB-изображение представляет собой трехмерный массив пикселов, структура которого представлена на рис. 3.

В системе RGB цветное изображение представляется набором матриц трех монохромных изображений – в красном, зеленом, синем цвете. Монохромные изображения называют цветовыми каналами или компонентами. Каждый из этих каналов представляет собой монохромное изображение в градациях серого. Число бит, используемых для представления величины цветного пиксела, определяет область значений цвета изображения. В данной работе использованы 8-битные изображения для цветовых компонент изображения,

что в результате формирует RGB-изображение с глубиной цвета 24 бита.

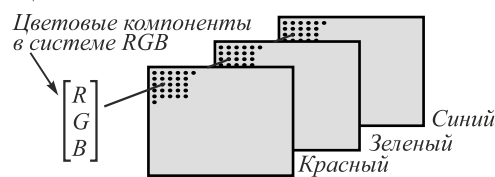


Рис. 3. Принцип формирования RGB-изображения

В цифровых системах записи цветных изображений перед матрицей фотодетекторов располагаются светофильтры, которые выделяют из всего спектра излучения определенные спектральные интервалы, а также ИК-фильтр, отсекающий ИК-излучение в области чувствительности фотодетекторов. Полноцветное изображение определяется суммой трех изображений, получаемых при прохождении полного светового поля через светофильтры цветочных каналов.

Таким образом, для моделирования цветного интерференционного изображения с использованием выражения (8) необходимо иметь три подобных выражения, в которых используются функции спектрального пропускания светофильтров, отвечающих за формирование каждой цветовой компоненты RGB-изображения: $f_R^2(\omega)$, $f_G^2(\omega)$ и $f_B^2(\omega)$, спектральную функцию источника света $g^2(\omega)$, соответствующую белому свету, например, теплового источника, и спектральную функцию пропускания всей оптической системы микроскопа $\tau^2(\omega)$. Иными словами, необходимо рассчитать три числовые матрицы пространственного распределения интенсивности света $I(\bar{\rho})$, каждая из которых представляет интерференционное изображение, образованное при прохождении интерферирующих полей через светофильтр, соответствующий основному цвету цветовой модели. Выражения для интерференционных изображений в цветовых каналах имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 I_{ch}(\bar{\rho}) &= \int_0^\infty R_1(\omega)f_{ch}^2(\omega)g^2(\omega)\tau^2(\omega)d\omega + \\
 &+ \int_0^\infty R_2(\omega)(1-R_1(\omega))^2f_{ch}^2(\omega)g^2(\omega)\tau^2(\omega)d\omega + \\
 &+ 2\text{Re} \left[\exp(i(\phi_1 - \phi_2)) \int_0^\infty \sqrt{R_1(\omega)R_2(\omega)}(1-R_1(\omega)) \times \right. \\
 &\left. \times g^2(\omega)\tau^2(\omega)f_{ch}^2(\omega)\exp\left(i\omega\frac{\Delta(\bar{\rho})}{c}\right)d\omega \right], \quad (9)
 \end{aligned}$$

где индекс $ch = R, G, B$ обозначает цветовой канал.

Выражения (9) позволяют рассчитать распределения интенсивностей монохромных интерференционных изображений в цветовых каналах и моделировать цветное интерференционное изображение в виде RGB-изображения.

4. Моделирование цветных интерференционных изображений

Для расчетов и формирования интерференционных изображений мы использовали спектральные

кривые чувствительности светофильтров $f_{ch}^2(\lambda)$ матричных фотодетекторов, используемых в микроскопах. На рис. 4 приведены кривые пропускания светофильтров (с учетом влияния ИК-фильтра) цифровой фотокамеры TourCam UCMOS03100KPA микроскопа Микромед Полар-1, с помощью которого проводилось наблюдение и запись цветных интерференционных изображений слоистых микрообъектов.

На рис. 5 приведен совместный спектр излучения источника и пропускания оптической системы микроскопа $g^2(\omega)\tau^2(\omega)$, определенный с помощью спектрометра OceanOptics USB2000 путем измерения спектра излучения непосредственно перед матричным фотодетектором при установке алюминиевого зеркала в предметной плоскости микроскопа.

На рис. 6 представлены интерференционные изображения тонкого клина с изменяющейся по линейному закону оптической толщиной $z(x) = nd(x) = nax$, сформированные с использованием (9). Для упрощения коэффициенты отражения света гранями клина принимались равными $R_1 = R_2 = 0,5$ при $\varphi_1 = \varphi_2 = \pi$. Представлены интерференционные изображения цветных каналов и результирующее цветное изображение.

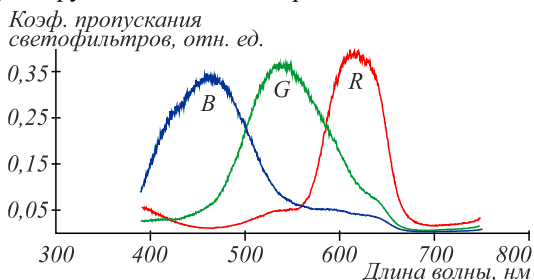


Рис. 4. Кривые пропускания красного R, зеленого G и синего B светофильтров матрицы фотокамеры TourCam

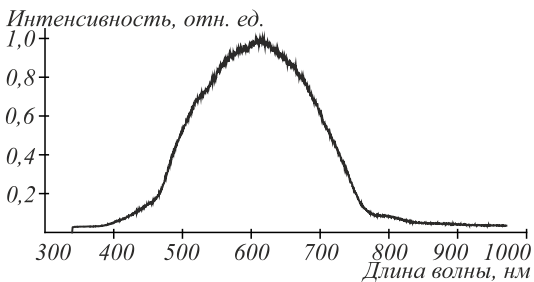


Рис. 5. Спектр оптического излучения, падающего на матрицу фотодетектора, при использовании в предметной плоскости микроскопа алюминиевого зеркала

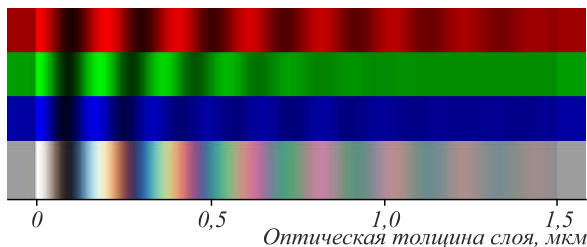


Рис. 6. Интерференционные изображения тонкого клина в разных цветовых каналах и результирующее цветное интерференционное изображение

Разработанная модель позволяет представлять интерференционные изображения объектов с более сложным рельефом поверхности, оптической толщины. В качестве примера на рис. 7 приведены двумерные интерференционные изображения тонкого слоя с профилем оптической толщины $z(\rho)$, определяемым выражением:

$$z(x, y) = nz_0 \exp \left(- \left[\left(\frac{x^2}{\rho_x^2} \right) + \left(\frac{y^2}{\rho_y^2} \right) \right]^\alpha \right). \quad (10)$$

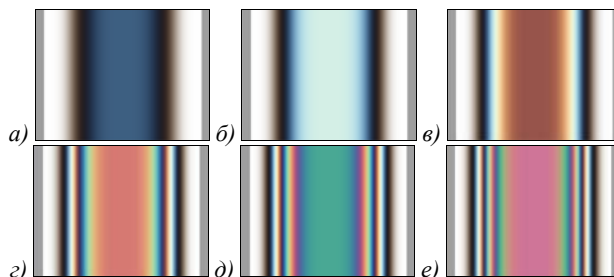


Рис. 7. Двумерные цветные интерференционные изображения тонкого слоя с изменением оптической толщины в соответствии с уравнением (11) при $n = 1,1$, $\alpha = 2$ и $\rho_x = 1,25$, $\rho_y = \infty$: а – $z_0 = 125$ нм, б – $z_0 = 175$ нм, в – $z_0 = 250$ нм, г – $z_0 = 425$ нм, д – $z_0 = 525$ нм, е – $z_0 = 625$ нм

На рис. 8 приведены трехмерные изображения объекта с осесимметричным профилем поверхности, определяемым (10), на поверхности которых наложена соответствующая профилю смоделированная цветная картина интерференционных полос.

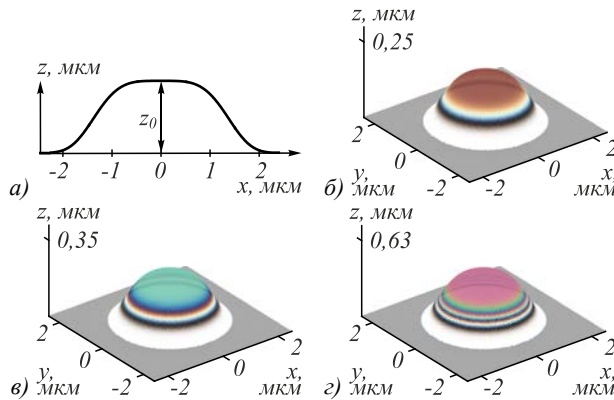


Рис. 8. Трехмерные интерференционные изображения тонкого слоя с осесимметричным изменением оптической толщины в соответствии с уравнением (11) при $n = 1,1$, $\alpha = 2$, $\rho_x = \rho_y = 1,25$ мкм: а – профиль центрального сечения поверхности слоя, б – г – трехмерные интерференционные изображения слоя с цветными интерференционными полосами: б – $z_0 = 0,25$ мкм, в – $0,35$ мкм, г – $0,63$ мкм

5. Определение толщины тонких пленок

Модель формирования полихроматической интерференционной картины можно использовать для определения оптических толщин объектов в виде тонких пленок по цвету их интерференционного изображения путем количественного сравнения цветов экспериментального и рассчитанного изображений. При моделировании изображения должны быть

учтены частотный состав освещающего поля, спектральное пропускание оптической системы микроскопа, спектральные характеристики фильтров, чувствительность фотодетектора и др. Кроме этого, должны быть учтены оптические свойства самого объекта – априорные данные о комплексных коэффициентах отражения света границами объекта. Возможность оперирования при моделировании этими факторами в явном виде отражена в (9).

В качестве модельного объекта для формирования интерференционного изображения можно использовать тонкий клин с линейно изменяющейся оптической толщиной. Это обеспечивает возможность получения непрерывной зависимости цвета интерференционной картины от оптической толщины объекта во всем интервале оптических толщин, в котором формируется цветное интерференционное изображение в белом свете.

Алгоритм сравнения цветов интерференционных изображений – экспериментального и смоделированного, заключается в поиске совпадения значений цветов изображений, определяемого одновременным равенством интенсивностей цвета в каждом цветовом канале сравниваемых изображений. С математической точки зрения сравнение цветов изображений может состоять в определении близких к нулю разностей значений интенсивностей в каждом цветовом канале этих изображений:

$$\delta I_{ch} = |I_{ch}(\Delta) - I_{ch}^{exp}|, \tag{11}$$

где $I_{ch}(\Delta)$ – интенсивность рассчитанного изображения в цветовом канале ch при оптической толщине объекта Δ , I_{ch}^{exp} – интенсивность экспериментального изображения в том же цветовом канале ch в выбранной области изображения объекта.

Обращение в ноль разности δI_{ch} соответствует равенству интенсивностей цветов смоделированного и экспериментального изображений в данном канале. Таким образом, задача сравнения цветов сводится к нахождению значений оптической толщины, при которой обращается в ноль разность δI_{ch} в соответствии с (11) одновременно для каждого цветового канала. В результате определяется оптическая толщина Δ в выбранной области объекта.

Этот метод определения толщины нами применялся для анализа толщин эритроцитов в мазке крови путем определения статистического распределения их толщин. В [30] представлены результаты измерений и показана работоспособность метода для решения задач медицинской диагностики.

На рис. 9а приведено наблюдаемое в оптическом микроскопе интерференционное изображение группы эритроцитов в сухом мазке крови на подложке с высоким коэффициентом отражения – кремниевой пластине с полированной поверхностью [30].

Различие интерференционных цветов в изображениях эритроцитов указывает на вариации их толщин в мазке. На рис. 9б, в представлены эксперименталь-

ное изображение отдельного эритроцита в мазке и изображение приблизительно того же цвета, смоделированного с использованием (9) и (10) при $\alpha = 10$, $\rho_x = 4,5$ мкм, $\rho_y = 4,5$ мкм и оптической толщине $n_{z0} = 0,6$ мкм. Некоторое изменение толщины эритроцита в его пределах – клиновидность составила $\delta(nz) \approx 0,02$ мкм.

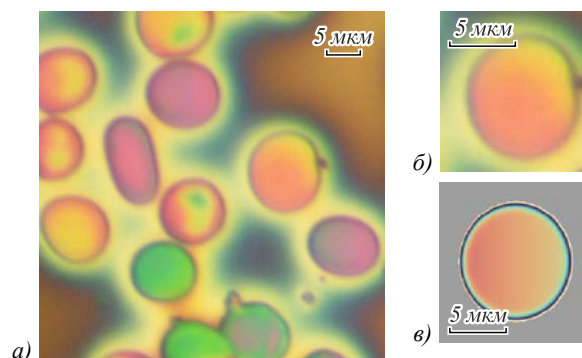


Рис. 9. Цветное интерференционное изображение группы эритроцитов в мазке крови на пластине кремния (а) и изображения одиночного эритроцита: экспериментально (б), смоделированное с приблизительно тем же интерференционным цветом и, соответственно, той же оптической толщиной, что и реальный эритроцит (в)

Обсуждение и заключение

Разработано теоретическое описание формирования и цифровой записи полихроматических интерференционных изображений слоистых объектов в микроскопии в белом свете. Данное описание важно не только с феноменологической точки зрения, но и как теоретическая основа метода измерения толщин тонких прозрачных слоев с использованием интерференции белого света. Интерференционный цвет изображения слоя определяется его оптической толщиной. Это дает возможность использовать разработанный алгоритм компьютерного формирования интерференционного изображения слоя для определения оптической толщины тонких слоев по цвету их интерференционного изображения.

Метод определения оптической толщины основан на количественном сравнении цвета интерференционного изображения, наблюдаемого в микроскопе, с цветом интерференционного изображения, получаемого расчетным путем для модельного объекта с задаваемой оптической толщиной и оптическими свойствами. Для этой цели удобно использовать модель оптического клина – тонкого слоя с меняющейся по известному закону оптической толщиной. В этом случае воспроизводится набор интерференционных цветов в определенном диапазоне оптических толщин, ограничиваемом длиной когерентности и шириной спектра используемого света. Обработка экспериментального изображения позволяет определить численные значения цвета в контролируемой области изображения. Для определения оптической толщины объекта интерференционный цвет в данной области

сравнивается с моделируемой линейкой интерференционных цветов. По известной зависимости цвета от толщины определяется значение искомой оптической толщины объекта. Метод определения оптических толщин слоев по цветам их интерференционных изображений может быть использован в технике и в биомедицинских приложениях.

Цвет интерференционного изображения слоя также зависит от спектрального состава излучения источника, спектральных свойств оптических элементов микроскопа, отражения света границами слоя и его пропускания, от величины фазовых сдвигов волн при отражении от границ слоя, от спектральных свойств матричного фотодетектора, используемого для цифровой записи изображения. Влияние всех этих факторов заложено в теоретическую модель формирования цветного интерференционного изображения и может быть учтено при компьютерном формировании изображения.

Как показали наши предварительные исследования [31], еще одним фактором существенного влияния на интерференционный цвет изображения слоя служит ширина углового спектра, освещающего объект волнового поля, определяемая размерами апертурной диафрагмы осветительной системы и числовой апертурой объектива микроскопа. При достаточно широком угловом спектре освещающего слоя разность фаз и взаимная когерентность волн, формирующих интерференционное изображение, начинают зависеть от ширины угловой апертуры поля [25], что проявляется и в цвете изображения слоя [31]. Поэтому дальнейшее развитие теоретической модели формирования в микроскопе цветных интерференционных изображений тонкослойных объектов должно учитывать влияние углового спектра освещающего объект волнового поля совместно с влиянием частотного спектра поля. Это позволит расширить функциональные возможности метода контроля оптических толщин слоистых микрообъектов путем использования для его реализации высоко разрешающих микроскопов с объективами с большой числовой апертурой и светосильной системой освещения.

Благодарности

Авторы выражают благодарность А.А. Пайзиеву за предложение использования высокоотражающих подложек в микроскопии эритроцитов и Л.И. Малиновой за разработку биомедицинских приложений метода полихроматической микроскопии.

Исследования выполнены за счёт гранта Российского научного фонда (проект №16-19-10528).

Литература

1. **Розенберг, Г.В.** Интерференционная микроскопия / Г.В. Розенберг // Успехи физических наук. – 1953. – Вып. 50, № 6. – С. 271-302. – DOI: 10.3367/UFN.0050.195306d.0271.
2. **Марешаль, А.** Структура оптического изображения. Дифракционная теория и влияние когерентности света / А. Марешаль, М. Франсон. – пер. с франц. – М.: Мир, 1964. – 295 с.
3. **Hariharan, P.** Optical interferometry / P. Hariharan. – 2nd ed. – Amsterdam, Boston: Academic Press, 2003. – 351 p. – ISBN: 978-0-12-311630-7.
4. **Вишняков, Г.Н.** Интерференционная микроскопия субнанометрового разрешения по глубине. Экспериментальные исследования / Г.Н. Вишняков, Г.Г. Левин, В.Л. Минаев, И.Ю. Цельмина // Оптика и спектроскопия. – 2014. – Т. 116, № 1. – С. 170-176.
5. **Игнатьев, П.С.** Лазерная модуляционная интерференционная микроскопия как средство контроля формы и шероховатости оптических поверхностей / П.С. Игнатьев, Л.С. Кольнер, К.В. Индукаев, В.И. Телешевский // Измерительная техника. – 2015. – № 7. – С. 32-35.
6. **De Groot, P.** Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography / P. de Groot // Advanced in Optics and Photonics – 2015 – Vol. 7, Issue 1 – P. 1-65. – DOI: 10.1364/AOP.7.000001.
7. **Борн, М.** Основы оптики / М. Борн, Э. Вольф // М.: Наука, 1973. – 720 с.
8. **Каленков, Г.С.** Гиперспектральная голографическая фурье-микроскопия / Г.С. Каленков, С.Г. Каленков, А.Е. Штанько // Квантовая электроника. – 2015. – Т. 45, № 4. – С. 333-338.
9. **Лычагов, В.В.** Низкокогерентная интерферометрия слоистых структур в полихроматическом свете с цифровой записью и обработкой интерферограмм / В.В. Лычагов, В.П. Рябухо, А.Л. Кальянов, И.В. Смирнов // Компьютерная оптика. – 2010. – Т. 34, № 4. – С. 511-524.
10. **Yu, X.** Review of digital holographic microscopy for three-dimensional profiling and tracking / X. Yu, J. Hong, C. Liu, M.K. Kim // Optical engineering. – 2014. – Vol. 53(11), – 112306. – DOI: 10.1117/1.OE.53.11.112306.
11. **Optical inspection of microsystems / ed. by W. Osten.** – Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group, 2007. – 503 p. – ISBN: 978-0-8493-3682-9.
12. **Abdulhalim, I.** Multiple interference and spatial frequencies' effect on the application of frequency-domain optical coherence tomography to thin films' metrology / I. Abdulhalim, R. Dadon // Measurement Science and Technology. – 2009 – Vol. 20, Issue 1. – 015108. – DOI: 10.1088/0957-0233/20/1/015108.
13. **Handbook of full-field optical coherence microscopy. Technology and applications / ed. by A. Dubois.** – Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd., 2016. – 790 p. – ISBN: 978-9-8146-6916-0.
14. **Bhaduri, B.** Diffraction phase microscopy with white light / B. Bhaduri, H. Pham, M. Mir, G. Popescu // Optics Letters. – 2012. – Vol. 37, Issue 6. – P. 1094-1096. – DOI: 10.1364/OL.37.001094.
15. **Handbook of biological confocal microscopy / ed. by J.E. Pawley.** – 3rd ed. – Berlin: Springer, 2006. – 985 p. – ISBN: 978-0-387-25921-5.
16. **Kim, S-W.** Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry / S.-W. Kim, G.-H. Kim // Applied Optics. – 1999. – Vol. 38, Issue 28. – P. 5968-5973. – DOI: 10.1364/AO.38.005968.
17. **Parthasarathy, S.** A color vision system for film thickness determination / S. Parthasarathy, D. Wolf, E. Hu, S. Hackwood, G. Beni // Proceedings of 1987 IEEE Conference on Robotics and Automation. – 1987. – P. 515-519.
18. **Muller, R.H.** Optimum angle of incidence for observing thin-film interference colors / R.H. Muller, M.L. Sand // Applied Optics. – 1987. – Vol. 26, Issue 24. – P. 5211-5220. – DOI: 10.1364/AO.26.005211.
19. **Birnie, D.** Optical video interpretation of interference colors from thin transparent films on silicon / D. Birnie // Materials Letters. – 2004. – Vol. 58, Issue 22-23. – P. 2795-2800.
20. **Kitagawa, K.** Thin-film thickness profile measurement by three-wavelength interference color analysis / K. Kitagawa // Applied Optics. – 2013. – Vol. 52, Issue 10. – P. 1998-2007. – DOI: 10.1364/AO.52.001998.
21. **Hartl, M.** Computer-aided evaluation of chromatic interferograms / M. Hartl, I. Krupka, R. Poliščuk, M. Liška // Journal of WSCG. – 1997. – Vol. 5, No. 1-3. – P. 163-172.

22. **Hyyarinen, T.S.** Direct sight imaging spectrograph: a unique add-on component brings spectral imaging to industrial applications / T.S. Hyyarinen, E. Herrala, A. Dall'Avà // *Proceedings of SPIE*. – 1998. – Vol. 3302. – P. 165-175. – DOI: 10.1117/12.304581.
23. **Jin, G.** Imaging ellipsometry revisited: developments for visualization of thin transparent layers on silicon substrates / G. Jin, R. Jansson, H. Arwin // *Review of Scientific Instruments*. – 1996. – Vol. 67. – P. 2930-2936. – DOI: 10.1063/1.1147074.
24. **Александров, А.Я.** Поляризационно-оптические методы механики деформированного тела / А.Я. Александров, М.Х. Ахметзянов. – М.: Наука, 1973. – 576 с.
25. **Ryabukho, V.P.** Wiener-Khinchin theorem for spatial coherence of optical wave field / V.P. Ryabukho, D.V. Lyakin, A.A. Grebenyuk, S.S. Klykov // *Journal of Optics*. – 2013. – Vol. 15, Issue 2. – 025405 (11 p.). – DOI: 10.1088/2040-8978/15/2/025405.
26. **Лякин, Д.В.** Продольные корреляционные свойства оптического поля с широкими угловым и частотным спектрами и их проявление в интерференционной микроскопии / Д.В. Лякин, В.П. Рябухо // *Квантовая электроника*. – 2013. – Т. 43, № 10. – С. 949-957.
27. **Лякин, Д.В.** Взаимная пространственно-временная когерентность оптических полей в интерферометре с амплитудным делением / Д.В. Лякин, П.В. Рябухо, В.П. Рябухо // *Оптика и спектроскопия*. – 2017. – Т. 122, № 2. – С. 336-345. – DOI: 10.7868/S0030403417020179.
28. **Бирюков, Е.** Эволюция датчиков изображения: от ПЗС к КМОП / Е. Бирюков // *Компоненты и технологии*. – 2007. – № 10. – С. 24-27.
29. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с. – ISBN: 5-94836-028-8.
30. **Дьяченко, А.А.** Метод интерференции белого света в тонких плёнках для анализа морфологии эритроцитов / А.А. Дьяченко, А.А. Пайзиев, В.П. Рябухо, Л.И. Малинова // *Известия вузов. Физика*. – 2015. – Т. 58, № 11/3. – С. 116-119.
31. **Дьяченко, А.А.** Проявление пространственных и временных спектральных свойств оптической системы в полихроматической интерференционной микроскопии / А.А. Дьяченко, В.П. Рябухо // VI Межд. конференция по фотонике и информационной оптике: сборник научных трудов. – М.: НИЯУ МИФИ. – 2017. – 278-279 с.

Сведения об авторах

Дьяченко Антон Андреевич, аспирант кафедры оптики и биофотоники Саратовского государственного университета и инженер лаборатории проблем когерентно-оптических измерений в точной механике Института проблем точной механики и управления РАН. Область научных интересов: интерференционная микроскопия, интерферометрия, когерентность. E-mail: anton-1047@yandex.ru.

Рябухо Владимир Петрович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры оптики и биофотоники Саратовского государственного университета и заведующий лабораторией проблем когерентно-оптических измерений в точной механике Института проблем точной механики и управления РАН. Область научных интересов: интерферометрия, голография, когерентность. E-mail: ryp-optics@yandex.ru.

ГРНТИ: 29.31.29.

Поступила в редакцию 7 июня 2017 г. Окончательный вариант – 5 июля 2017 г.

MEASUREMENT OF THE OPTICAL THICKNESS OF A LAYERED OBJECT FROM INTERFERENCE COLORS IN WHITE-LIGHT MICROSCOPY

A.A. Dyachenko^{1,2}, V.P. Ryabukho^{1,2}

¹Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences, Saratov, Russia,

²Saratov State University, Saratov, Russia

Abstract

Regular features in generating coloured interference patterns from single-layer thin objects in polychromatic optical microscopy are considered. Expressions for the intensity distribution of the image interference fields are obtained with due account for the spectral properties of radiation. The proposed algorithm for computer-aided calculation and generation of coloured interference patterns in white light depending on the optical thickness of the layered object is based on a RGB colour model. Numerically simulated interference patterns are presented and changes in their colour and structure under varying parameters of the microscope optical scheme and object optical properties are discussed. We show that it is possible to determine the optical thickness of the object layer through the numerical comparison of interference colours obtained in the natural and numerical experiments.

Keywords: interference microscopy, interference images, coherence, interference color, digital image processing, thin films.

Citation: Dyachenko AA, Ryabukho VP. Measurement of the optical thickness of a layered object from interference colors in white-light microscopy. *Computer Optics* 2017; 41(5): 670-679. DOI: 10.18287/2412-6179-2017-41-5-670-679.

Acknowledgements: Authors express their gratitude to A.A. Paiziev for his suggestion of using highly reflective substrates in red blood cells microscopy and to L.I. Malinova for the development of biomedical applications of the polychromatic interference method. This research was funded by the grant of the Russian Science Foundation (project №16-19-10528).

References

[1] Rosenberg GV. Interference microscopy [In Russian]. *Physics-Uspokhi* 1953; 50: 271-302. DOI: 10.3367/UFNr.0050.195306d.0271.

[2] Maréchal A, Francon M. Diffraction structure des images: Influence de la coherence de la lumiere par. Paris: *Revue d'optique théorique et instrumentale*, 1960.

- [3] Hariharan P. Optical interferometry. 2nd ed. Amsterdam, Boston: Academic Press; 2003. ISBN: 978-0-12-311630-7.
- [4] Vishnyakov GN, Levin GG, Minaev VL, Tsel'mina IYu. Interference microscopy of subnanometer depth resolution: Experimental study. Optics and Spectroscopy 2014; 116(1): 156-160. DOI: 10.1134/S0030400X14010226.
- [5] Ignat'ev PS, Kol'ner LS, Indukaev KV, Teleshevskii VI. Laser modulation interference microscopy as a means of controlling the form and roughness of optical surfaces. Measurement Techniques 2015; 58(7): 772-776. DOI: 10.1007/s11018-015-0792-1.
- [6] De Groot P. Principles of interference microscopy for the measurement of surface topography. Advanced in Optics and Photonics 2015; 7(1): 1-65. DOI: 10.1364/AOP.7.000001.
- [7] Born M, Wolf E. Principles of optics: Electromagnetic theory of propagation, interference and diffraction of light. 7th ed. Cambridge: Cambridge University Press; 1999. ISBN: 978-0521642224.
- [8] Kalenkov GS, Kalenkov SG, Shtan'ko AE. Hyperspectral holographic Fourier-microscopy. Quantum Electronics 2015; 45(4): 333-338. DOI: 10.1070/QE2015v045n04ABEH015584.
- [9] Lychagov VV, Ryabukho VP, Kalyanov AL, Smirnov IV. Low-coherence interferometry of stratified structures using polychromatic light and digital interferogram recording and processing [In Russian]. Computer optics 2010; 34(4): 511-524.
- [10] Yu X, Hong J, Liu C, Kim MK. Review of digital holographic microscopy for three-dimensional profiling and tracking. Optical engineering 2014; 53(11): 112306. DOI: 10.1117/1.OE.53.11.112306.
- [11] Osten W, ed. Optical Inspection of Microsystems. Boca Raton, London, New York: Taylor & Francis Group; 2007. ISBN: 978-0-8493-3682-9.
- [12] Abdulhalim I, Dadon R. Multiple interference and spatial frequencies' effect on the application of frequency-domain optical coherence tomography to thin films' metrology. Meas. Sci. Technol. 2009; 20(1): 015108. DOI: 10.1088/0957-0233/20/1/015108.
- [13] Dubois A, ed. Handbook of full-field optical coherence microscopy. Technology and applications. Singapore: Pan Stanford Publishing Pte. Ltd.; 2016. ISBN: 978-9-8146-6916-0.
- [14] Bhaduri B, Pham H, Mir M, Popescu G. Diffraction phase microscopy with white light. Opt Lett 2012; 37(6): 1094-1096. DOI: 10.1364/OL.37.001094.
- [15] Pawley JE, ed. Handbook of biological confocal microscopy. 3rd ed. Berlin: Springer; 2006. DOI: 10.1117/1.600871.
- [16] Kim SW, Kim GH. Thickness-profile measurement of transparent thin-film layers by white-light scanning interferometry. Appl Opt 1999; 38(28): 5968-5973. DOI: 10.1364/AO.38.005968.
- [17] Parthasarathy S, Wolf D, Hu E, Hackwood S, Beni G. A color vision system for film thickness determination. Proceedings of 1987 IEEE Conference on Robotics and Automation 1987: 515-519. DOI: 10.1109/ROBOT.1987.1087984.
- [18] Muller RH, Sand ML. Optimum angle of incidence for observing thin-film interference colors. Appl Opt 1987; 26(24): 5211-5220. DOI: 10.1364/AO.26.005211.
- [19] Birnie D. Optical video interpretation of interference colors from thin transparent films on silicon. Mater Lett 2004; 58(22-23): 2795-2800. DOI: 10.1016/j.matlet.2004.04.018.
- [20] Kitagawa K. Thin-film thickness profile measurement by three-wavelength interference color analysis. Appl Opt 2013; 52(10): 1998-2007. DOI: 10.1364/AO.52.001998.
- [21] Hartl M, Křupka I, Poliščuk R, Liška M. Computer-aided evaluation of chromatic interferograms. Journal of WSCG 1997; 5(1-3): 163-172.
- [22] Hyvarinen TS, Herrala E, Dall'Ava A. Direct sight imaging spectrograph: a unique add-on component brings spectral imaging to industrial applications. Proc SPIE 1998; 3302: 165-175. DOI: 10.1117/12.304581.
- [23] Jin G, Jansson R, Arwin H. Imaging ellipsometry revisited: developments for visualization of thin transparent layers on silicon substrates. Rev Sci Instrum 1996; 67: 2930-2936. DOI: 10.1063/1.1147074.
- [24] Aleksandrov AY, Akhmetzyanov MH. Polarization optical methods of deformed body mechanics [In Russian]. Moscow: "Nauka" Publisher; 1973.
- [25] Ryabukho VP, Lyakin DV, Grebenyuk AA, Klykov SS. Wiener-Khintchin theorem for spatial coherence of optical wave field. J Opt 2013; 15(2): 025405. DOI: 10.1088/2040-8978/15/2/025405.
- [26] Lyakin DV, Ryabukho VP. Longitudinal correlation properties of an optical field with broad angular and frequency spectra and their manifestation in interference microscopy. Quantum Electronics 2013; 43(10): 949-957. DOI: 10.1070/QE2013v043n10ABEH015187.
- [27] Lyakin DV, Ryabukho PV, Ryabukho VP. Mutual spatiotemporal coherence of optical fields in an amplitude-splitting interferometer. Optics and Spectroscopy 2017; 122(2): 329-338. – DOI: 10.1134/S0030400X17020175.
- [28] Biryukov E. Evolution of image sensors: from CCD to CMOS [In Russian]. Components and technology 2007; 75: 24-27.
- [29] Gonzalez RC, Woods RE. Digital image processing. 3rd ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice Hall; 2008. ISBN: 978-0-13-168728-8.
- [30] Dyachenko AA, Paiziev AA, Ryabukho VP, Malinova LI. Method of white light interference in thin film for analysis morphology of red blood cells [In Russian]. Russian Physics Journal 2015; 58(11/3): 116-119.
- [31] Dyachenko AA, Ryabukho VP. Effect of spatial and temporal spectral properties of the optical systems in polychromatic interference microscopy [In Russian]. Proceedings of the VI International Conference on Photonics and Information Optics. Moscow: "NRNU MIPhI" Publisher; 2017: 278-279.

Authors' information

Anton Andreevich Dyachenko, Post-graduate student of Optics and Biophotonics department of Saratov State University and engineer in Problems of Coherent-Optical Measurements in Precision Mechanics laboratory of the Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences. Research interests: interference microscopy, interferometry, coherence. E-mail: anton-1047@yandex.ru.

Vladimir Petrovich Ryabukho, Doctor of Physical-Mathematical Sciences, Professor of Optics and Biophotonics department of Saratov State University and Head of the Laboratory of Problems of Coherent-Optical Measurements in Precision Mechanics of the Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences. Research interests: interferometry, interference microscopy, holography, coherence. E-mail: rvp-optics@yandex.ru.

Received June 7, 2017. The final version – July 5, 2017.