

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

Кафедра оптики и биофотоники

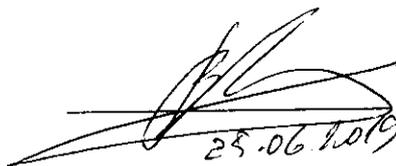
Цифровая голографическая микроскопия в частично когерентном свете

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студентки 2 курса 254 группы
направления 03.04.02 «Физика»
физического факультета

Клычковой Дарьи Михайловны

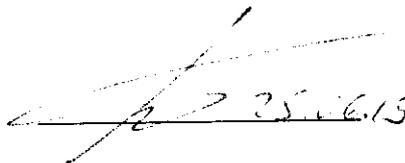
Научный руководитель
профессор кафедры
оптики и биофотоники,
д.ф.-м.н., профессор



25.06.2019

В.П. Рябухо

Заведующий кафедрой
оптики и биофотоники
д.ф.-м.н., профессор



25.06.19

В.В. Тучин

Введение

Интерференционная микроскопия (ИМ), позволяющая измерять оптическую толщину микрообъектов с точностью до долей длины волны, проводить численную фокусировку восстанавливаемых изображений, а также устранять искажения в изображениях, вызываемые другими аберрациями оптической системы [1], играет важную роль во многих исследованиях биологии, медицины и техники.

В ИМ чаще всего используется квазимонохроматическое пространственно когерентное освещение, поскольку при нем процесс юстировки схемы довольно прост. Однако использование такого освещения при наличии дефектов на оптических элементах приводит к возникновению когерентных шумов в регистрируемом сигнале. Снижение уровня когерентных шумов в регистрируемом сигнале возможно за счет использования частично пространственно когерентного освещения [2, 3]. Однако это может негативно отразиться на возможностях ИМ. В [4] теоретически показано, что в цифровой голографической микроскопии (ЦГМ) на пропускание использование частично пространственно когерентного освещения, должно приводить к уменьшению модуля пространственного спектра сигнала когерентности в цифровой голограмме на высоких пространственных частотах при увеличении оптической дефокусировки изображения объекта. Это может привести к снижению поперечного разрешения восстанавливаемых численно сфокусированных изображений.

Целью данной работы является проведение экспериментального исследования эффекта уменьшения модуля пространственного спектра сигнала когерентности на высоких пространственных частотах при оптической дефокусировке изображения объекта в ЦГМ на пропускание с квазимонохроматическим частично пространственно когерентным освещением и сравнения результатов эксперимента с результатами численного моделирования, выполненного на основании теории, а также теоретического исследования влияния частично пространственно когерентного освещения на

сигнал когерентности в ИМ тонких слоев с квазимонохроматическим освещением. В рамках поставленной цели решались задачи сборки оптической схемы ЦГМ в режиме внеосевой голографии с частично пространственно когерентным освещением на пропускание, записи цифровых голограмм объекта при различных величинах дефокусировки, анализа соответствующих пространственных спектров, численного моделирования для сравнения результатов эксперимента с теорией, вывода выражения, описывающего взаимную спектральную плотность полей, отраженных от границ объекта, в ИМ тонких слоев, численного моделирования сигнала когерентности в ИМ тонких слоев с квазимонохроматическим освещением.

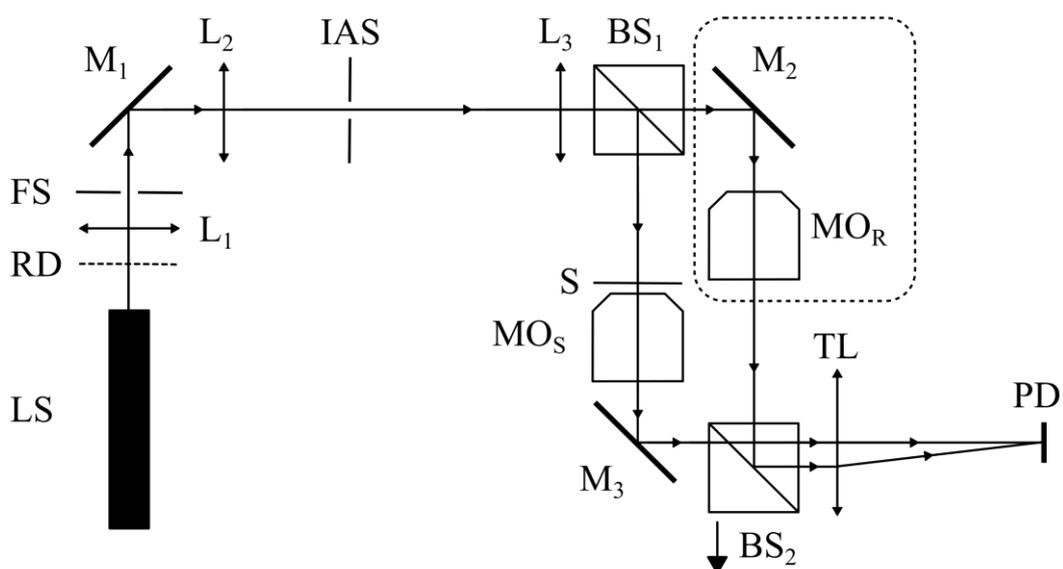
Основная часть данной работы состоит из двух пунктов: «Пространственный спектр сигнала когерентности при дефокусировке изображения объекта в цифровой голографической микроскопии с квазимонохроматическим частично пространственно когерентным освещением» и «Сигнал когерентности в интерференционной микроскопии тонких слоев с квазимонохроматическим освещением».

Экспериментально показанный эффект уменьшения модуля пространственного спектра сигнала когерентности на высоких пространственных частотах при дефокусировке изображения объекта в ЦГМ на пропускание с квазимонохроматическим частично пространственно когерентным освещением и полученное выражение, описывающее взаимную спектральную плотность полей, отраженных от границ объекта, в ИМ тонких слоев определяют научную новизну работы.

Положения и результаты, выносимые на защиту:

1. При дефокусировке изображения объекта в ЦГМ на пропускание с квазимонохроматическим частично пространственно когерентным освещением наблюдается уменьшения модуля пространственного спектра сигнала когерентности.
2. Выражение, описывающее взаимную спектральную плотность полей, отраженных от границ объекта, в ИМ тонких слоев.

В первом пункте «Пространственный спектр сигнала когерентности при дефокусировке изображения объекта в цифровой голографической микроскопии с квазимонохроматическим частично пространственно когерентным освещением» описываются подход к исследованию, экспериментальная установка (рис. 1.1), эксперимент и обработка экспериментальных данных и сравнение результатов эксперимента и численного моделирования.



LS – гелий-неоновый лазер; RD – вращающийся рассеиватель; L_1 , L_2 , L_3 – линзы системы освещения; FS – полевая диафрагма системы освещения; IAS – апертурная диафрагма системы освещения; M_1 , M_2 , M_3 – плоские зеркала; BS_1 , BS_2 – светоделительные кубы; S – объект; MO_S , MO_R – идентичные микрообъективы; TL – тубусная линза; PD – матричный фотодетектор

Рисунок 1.1 – Схема цифрового голографического микроскопа на пропускание в режиме внеосевой голографии с квазимонохроматическим частично пространственно когерентным освещением

На рисунке 1.2 представлено сравнение результатов экспериментального исследования и численного моделирования при различных величинах оптической дефокусировки Δz и числовой апертуры освещения NA_i .

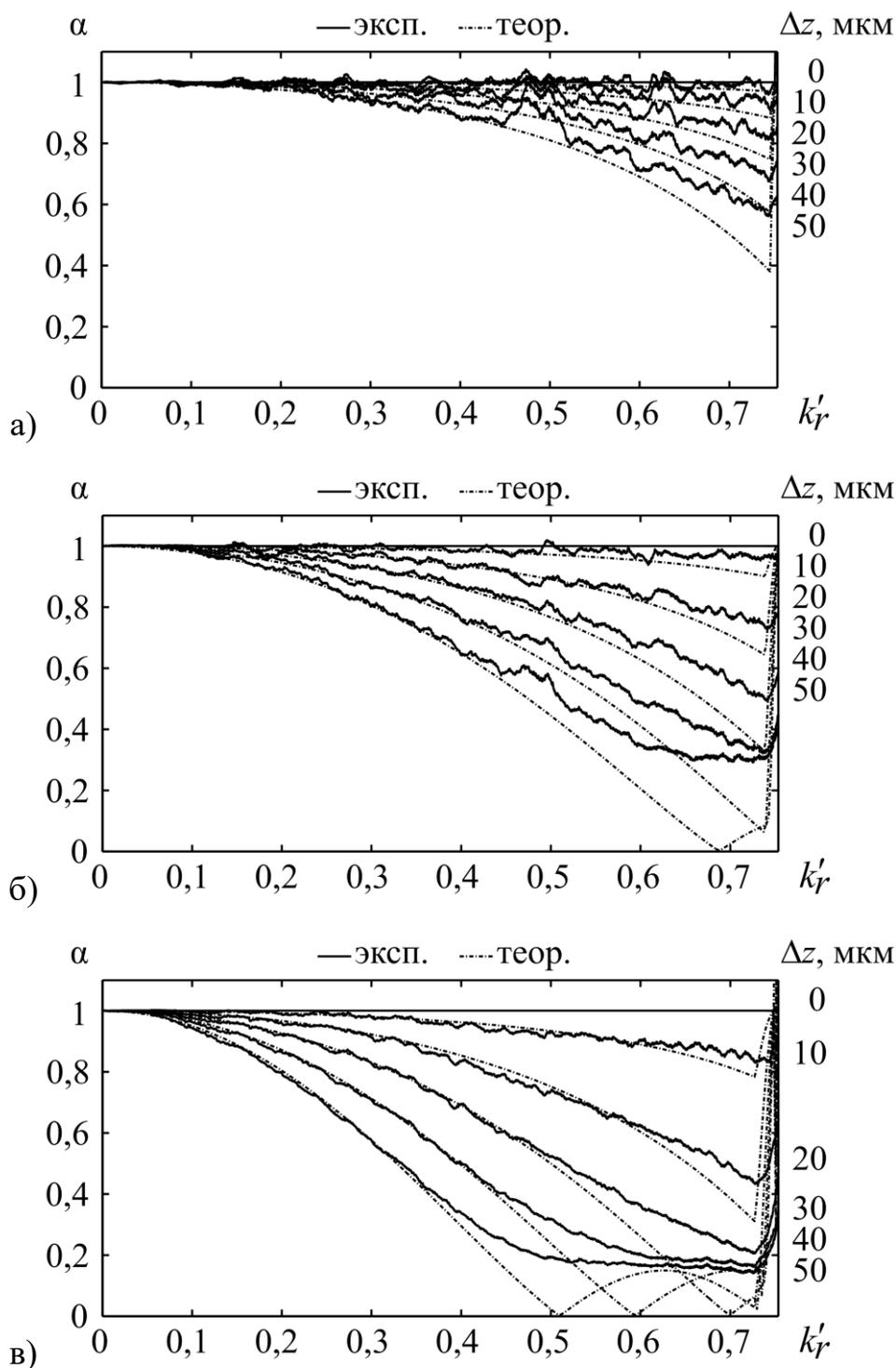


Рисунок 1.2 – Сравнение экспериментальных (сплошные) и теоретических (штрих-пунктирные) зависимостей α при различных величинах дефокусировки Δz : а) $NA_i = 0,004$; б) $NA_i = 0,008$; в) $NA_i = 0,016$

Из рисунка 1.2 видно, что при малых значениях нормированных пространственных частот $k_r' < 0,4$ наблюдается высокая степень сходства экспериментальных и теоретических зависимостей. При больших значениях

нормированных пространственных частот $k_r' > 0,4$ теоретические и экспериментальные зависимости отличаются. Вероятно, отличие связано с тем, что теоретическое выражение, используемое при численном моделировании, получено в параксиальном приближении, т. е. справедливо для низких частот, тогда как часть анализируемого пространственного спектра находится за пределами параксиальной области. Наличие в теоретических зависимостях осцилляций на высоких частотах и их отсутствие в экспериментальных зависимостях может быть объяснено отличием формы распределения интенсивности освещающего поля по апертуре системы освещения, используемой при численном моделировании, от наблюдаемой в эксперименте.

Во втором пункте **«Сигнал когерентности в интерференционной микроскопии тонких слоев с квазимонохроматическим освещением»** представлен вывод выражения (2.1), описывающего взаимную спектральную плотность полей, отраженных от первой и второй границ объекта, в ИМ тонких слоев, на основании теоретической модели формирования сигнала в ИМ, предложенной в [4].

Выражение (2.1) для взаимной спектральной плотности полей, отраженных от первой и второй границ объекта, в ИМ тонких слоев получено с использованием методов скалярной теории дифракции в параболическом (параксиальном) приближении, представления линз тонкими фазовыми транспарантами и предположения о δ -коррелированности поля освещения. Из этого следует, что на основании выражения (2.1) может быть выполнен анализ только такой оптической системы, которая удовлетворяет вышеперечисленным приближениям. Однако применимость полученного выражения (2.1) можно распространить и на анализ оптических систем с большими угловыми апертурами, если предположить, что aberrации оптических элементов скорректированы так, что форма выражений, используемых при выводе (2.1), сохраняется при переходе от малых угловых апертур к большим угловым апертурам [4].

$$\begin{aligned}
& \Gamma(\omega; x, y) \approx (f' / 2\pi f_L')^2 \times \\
& \times \iiint \iiint \iiint \iiint I_0 \left(\omega; -\frac{f'}{k} k_x'', -\frac{f'}{k} k_y'' \right) \exp\{i[(x_S - x'_S)k_x'' + (y_S - y'_S)k_y'']\} dk_x'' dk_y'' \times \\
& \quad \times r_1^*(\omega; k_x', k_y'; x'_S, y'_S) t_1(\omega; k_x, k_y; x_S, y_S) \times \\
& \quad \times r_2(\omega; k_x, k_y; x_S, y_S) t_1'(\omega; k_x, k_y; x_S, y_S) \times \\
& \quad \times \exp[-i(k_x x_S - k_x' x'_S + k_y y_S - k_y' y'_S)] \times \\
& \quad \times \exp[i(z_S(x_S, y_S) - |f|)((kn_{im})^2 - k_x^2 - k_y^2)^{1/2}] \times \\
& \quad \times \exp[-i(z_S(x'_S, y'_S) - |f|)((kn_{im})^2 - (k_x')^2 - (k_y')^2)^{1/2}] \times \\
& \quad \times \exp[ih(x_S, y_S)((kn_0)^2 - k_{xP1}^t(x_S, y_S)^2 - k_{yP1}^t(x_S, y_S)^2)^{1/2}] \times \\
& \quad \times \exp[ih(x_S, y_S)((kn_0)^2 - k_{xP2}^r(x_S, y_S)^2 - k_{yP2}^r(x_S, y_S)^2)^{1/2}] \times \\
& \times \exp[i(z_S(x_S, y_S) - |f|)((kn_{im})^2 - k_{xP2P1}^t(x_S, y_S)^2 - k_{yP2P1}^t(x_S, y_S)^2)^{1/2}] \times \\
& \quad \times \exp[-i(z_S(x'_S, y'_S) - |f|)((kn_{im})^2 - k_{xP1}^r(x'_S, y'_S)^2 - k_{yP1}^r(x'_S, y'_S)^2)^{1/2}] \times \quad (2.1) \\
& \quad \times dx'_S dy'_S dx_S dy_S A \left(\omega; \frac{f'}{k} k_x, \frac{f'}{k} k_y \right) A^* \left(\omega; \frac{f'}{k} k_x', \frac{f'}{k} k_y' \right) \times \\
& \quad \times \exp \left[-i \frac{f'}{f_L'} ((k_x - k_x')x + (k_y - k_y')y) \right] dk_x' dk_y' dk_x dk_y.
\end{aligned}$$

Также во втором пункте рассматривается влияние величины числовой апертуры освещения на сигнал когерентности в интерференционной микроскопии тонких слоев с квазимонохроматическим освещением в случае объекта, представляющего собой плоскопараллельный слой и оптический клин.

На рисунке 2.1 представлены графики зависимости нормированного на единицу интерференционного слагаемого $A(\omega; n_0 h)$ в ИМ тонких слоев с квазимонохроматическим освещением в случае объекта, представляющего собой плоскопараллельный слой с показателем преломления $n_0 = 1,5$ от оптической толщины $n_0 h$ слоя при различных величинах числовой апертуры освещения NA_i . Из рисунка 2.1 видно, что с ростом числовой апертуры освещения от $NA_i = 0$ до $NA_i = NA$, наблюдается уменьшение полуширины

интерференционного слагаемого $A(\omega; n_0 h)$, а, следовательно, и уменьшение полуширины модуля сигнала когерентности.

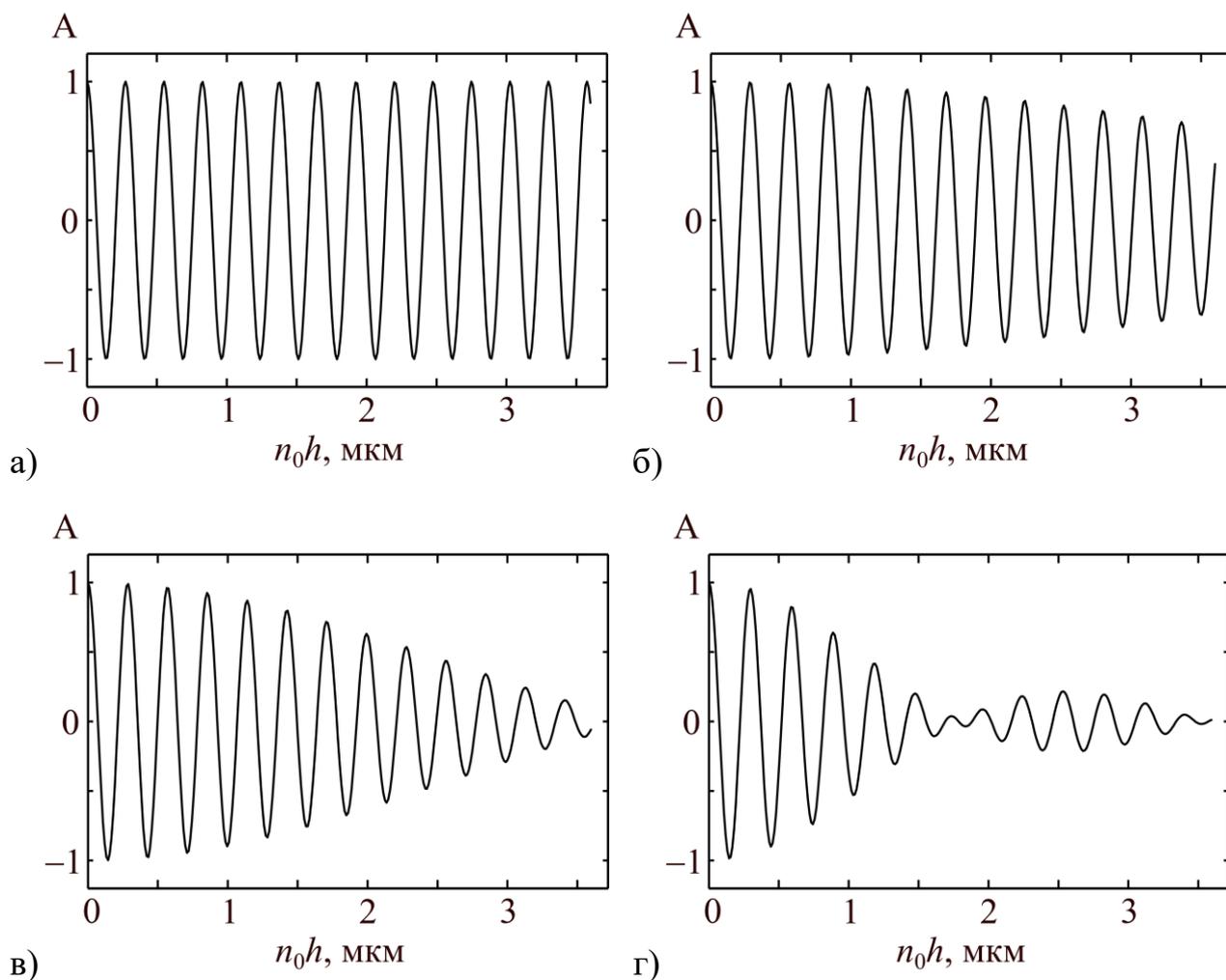


Рисунок 2.1 – Зависимость нормированного на единицу интерференционного слагаемого A от оптической толщины $n_0 h$ плоскопараллельного слоя при $\lambda = 0,55$ мкм, $NA = 0,8$: а) $NA_i = 0$; б) $NA_i = 0,4$; в) $NA_i = 0,55$; г) $NA_i = 0,8$

В предположении того, что амплитудные коэффициенты отражения и пропускания границ слоя являются константами, поля, отраженные от границ плоскопараллельного слоя, в плоскости регистрации отличаются лишь фазовым набегом, возникшим вследствие прохождения одного из полей через слой. В таком случае, сигнал когерентности является функцией продольной когерентности освещающего поля, а его полуширина – длиной продольной когерентности L_c . Таким образом, при увеличении числовой апертуры

освещения NA_i наблюдается уменьшение длины продольной когерентности L_c освещающего поля.

На рисунке 2.2 представлены графики зависимости нормированного на единицу интерференционного слагаемого $A(\omega; y)$ в ИМ тонких слоев с квазимонохроматическим освещением в случае объекта, представляющего собой оптический клин с показателем преломления $n_0 = 1,5$, от y -координаты в плоскости регистрации при различных величинах числовой апертуры освещения NA_i .

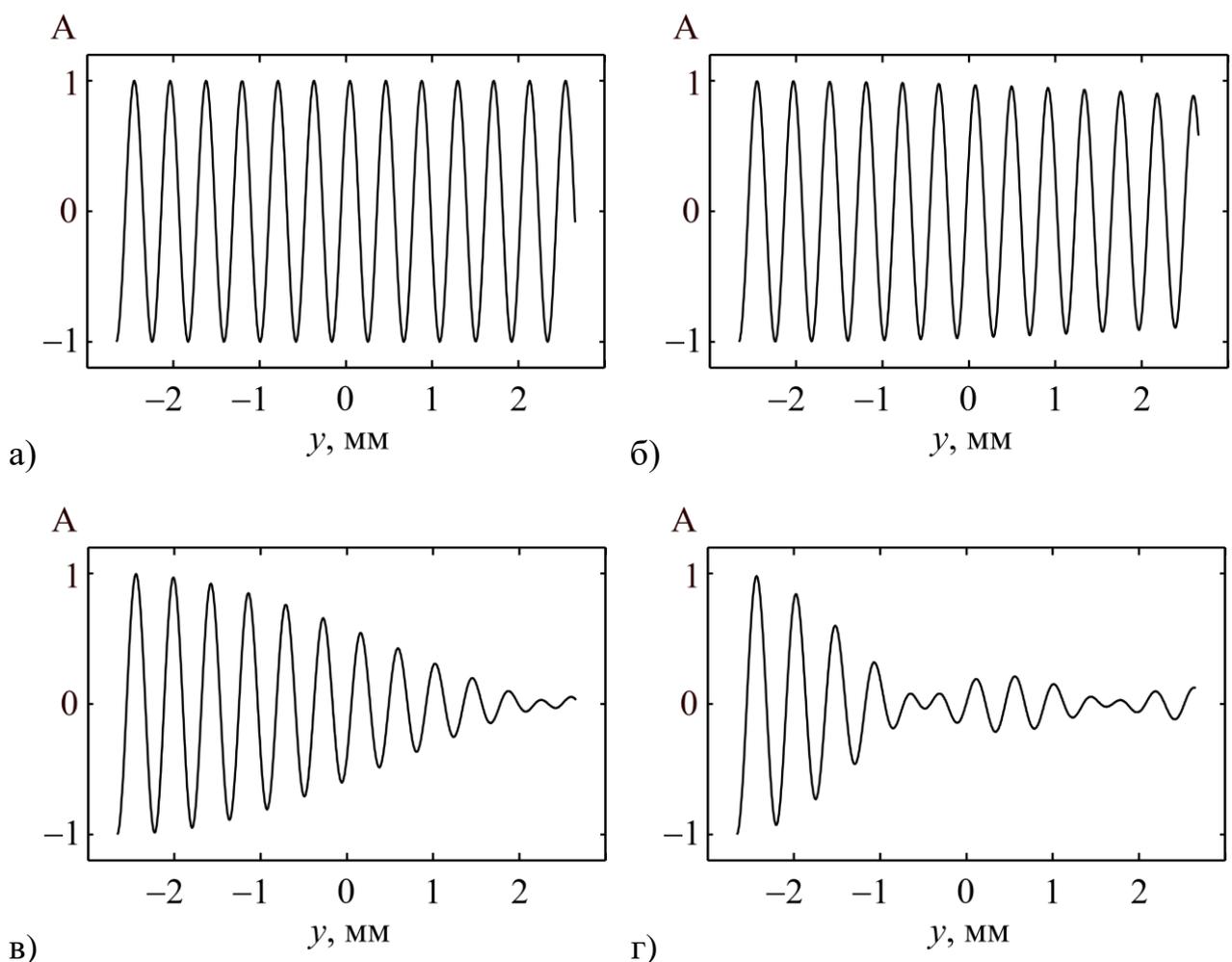


Рисунок 2.2 – Зависимость нормированного на единицу интерференционного слагаемого A от y -координаты в плоскости регистрации при $\lambda = 0,55$ мкм, $\alpha = -0,02$, $NA = 0,9$: а) $NA_i = 0$; б) $NA_i = 0,3$; в) $NA_i = 0,6$; г) $NA_i = 0,9$

Из рисунка 2.2 видно, что с ростом числовой апертуры освещения от $NA_i = 0$ до $NA_i = NA$, наблюдается уменьшение полуширины

интерференционного слагаемого $A(\omega; y)$, а, следовательно, и уменьшение полуширины модуля сигнала когерентности. Таким образом, в ИМ тонких слоев с квазимонохроматическим освещением с ростом числовой апертуры освещения NA_i наблюдается снижение степени взаимной когерентности полей, отраженных от границ слоя, в плоскости регистрации, что приводит к уменьшению максимальной измеримой оптической толщины слоя.

Заключение

В п. 1 данной работы экспериментально показано, что при оптической дефокусировке изображения объекта в ЦГМ на пропускание с квазимонохроматическим частично пространственно когерентным освещением наблюдается эффект уменьшения модуля пространственного спектра сигнала когерентности. Сравнение нормированных зависимостей модуля пространственного спектра сигнала когерентности, полученных экспериментально при различных величинах числовой апертуры освещения NA_i и оптической дефокусировки Δz , с теоретическими зависимостями, полученными при помощи численного моделирования, показало высокую степень соответствия.

Рассмотренный в п. 1 эффект, показывает, что в ЦГМ на пропускание использование частично пространственно когерентного освещения кроме положительного влияния – снижения уровня когерентных шумов в сигнале микроскопа, при определенных условиях может оказывать и отрицательное влияние, заключающееся в снижении поперечного пространственного разрешения восстанавливаемых численно сфокусированных изображений.

В п. 2 данной работы, с использованием методов скалярной теории дифракции в параксиальном приближении, представления линз тонкими фазовыми транспарантами и предположения о δ -коррелированности поля освещения, получено выражение для взаимной спектральной плотности полей, отраженных от границ слоя, в плоскости регистрации в ИМ тонких слоев, которое в предположении соответствующей коррекции аберраций оптических

элементов может применяться для анализа оптических систем с большими угловыми апертурами.

Полученное выражение может быть использовано для исследования влияния величины числовой апертуры освещения NA_i , дефокусировки изображения объекта Δz на сигнал когерентности в ИМ тонких слоев, как с квазимонохроматическим, так и с полихроматическим освещением.

В п. 2 с помощью данного выражения рассмотрено влияние величины числовой апертуры освещения NA_i на сигнал когерентности в ИМ тонких слоев с квазимонохроматическим освещением в случае объекта, представляющего собой плоскопараллельный слой и оптический клин. Показано, что в ИМ тонких слоев с квазимонохроматическим освещением с ростом числовой апертуры освещения NA_i наблюдается уменьшение длины продольной когерентности L_c освещающего поля, а также снижение степени взаимной когерентности полей, отраженных от границ слоя, в плоскости регистрации, что приводит к уменьшению максимальной измеримой оптической толщины слоя.

Список использованных источников

1. Holography, Research and Technologies / ed. by J. Rosen. –Rijeka: InTech, 2011. – 466 p. – DOI: 10.5772/591.
2. Dubois, F. Partial spatial coherence effects in digital holographic microscopy with a laser source / F. Dubois, M.-L. N. Requena, C. Minetti, O. Monnom, E. Istasse // Applied Optics. – 2004. – V. 43. – P. 1131-1139. – DOI: 10.1364/AO.43.001131.
3. Grebenyuk, A.A. Numerical focusing in digital holographic microscopy with partially spatially coherent illumination in transmission / A.A. Grebenyuk, V.P. Ryabukho // Proceedings of SPIE. – 2014. – V. 9031. – P. 903119 1-8. – DOI: 10.1117/12.2052837.
4. Гребенюк, А.А. Формирование сигнала и свойства визуализации в интерференционной микроскопии : дис. ... канд. ф.-м. наук : 01.04.21 : защищена 26.12.14 : утв. 00.00.00/ Антон Александрович Гребенюк ; науч. рук. В.П. Рябухо ; Сарат. гос. ун-т. – Саратов, 2014. – 165 с.