# 1 Введение

Современный уровень развития науки и техники требует применения бесконтактных методов и средств измерений параметров фазовых объектов, обладающих высокой разрешающей способностью и точностью [1]. В соответствии с определением, приведенным в работе [2], фазовыми называются такие объекты, которые изменяет фазовую составляющую комплексной амплитуды волнового фронта оптического излучения. Электромагнитное поле может или отражаться от таких объектов или проходить через них, поэтому фазовые объекты могут быть как отражающие, так и прозрачные. Фазовые объекты, исследуемые с помощью микроскопа, широко распространены. К отражающим фазовым объектам можно отнести изделия микроэлектроники, микроэлектромеханические системы, оптические зеркальные поверхности, подложки лазерных зеркал, структурированные покрытия и пр. Примером прозрачных фазовых объектов могут служить оптические стекловолокна, микрорезонаторы, оптические микродетали, а также широкий класс биологических микрообъектов, включая клетки, бактерии и т.п. Возникающая при взаимодействии с такими объектами модуляция фазовой составляющей поля, связана с их локальными пространственными параметрами [1] – оптической разностью хода (для прозрачных объектов) и распределением высот профиля поверхности (для отражающих объектов). На основании оценок данных локальных параметров могут быть вычисленные другие физические параметры объектов, такие как: плотность, температура, концентрация, шероховатость поверхности, морфологические характеристики клеток (размер, форма, строение) и т.п. Задача количественного измерения интегральных и локальных параметров как статических, так и динамических фазовых объектов с высокой точностью является актуальной научно-технической задачей. Количественным методом получения информации о фазовой модуляции электромагнитного поля исследуемым объектом является метод интерферометрии.

# 2 Литературный обзор

Основным параметром трехмерного фазового объекта, оцениваемым в ходе решения задачи интерферометрии, является двумерное распределение сдвига фазы электромагнитного излучения, вносимого этим объектом [3]. Данное распределение тем или иным образом характеризует («изображает») фазовый объект и потому называется фазовым изображением. Поскольку основные приемные устройства излучения оптического диапазона не позволяют непосредственно регистрировать фазовое изображение (комплексную амплитуду поля), а реагируют лишь на интенсивность принимаемого излучения [4], то существующие методы регистрации комплексной амплитуды, основанные на принципах интерферометрии, являются косвенными. В данном разделе приведен обзор методов реконструкции фазы волнового фронта по интерферограммам.

Методы вычисления фазы волнового фронта, основанные на анализе интерферограмм, принято разделять на две группы [3,4]. К первой группе относятся методы, в которых восстановление осуществляется по одной интерферограмме: методы, основанные на выделении координатных полос [5,6] и разделении частотных составляющих в спектральной плоскости [7,8], соответственно. Для реализации этих методов не требуется изменение технических возможностей известных интерферометров [9], точность реконструкции зависит от пространственного разрешения спектров полезных и шумовых составляющих регистрируемого сигнала. Также необходимость наличия достаточного числа полос на интерферограмме ограничивает использование методов, основанных на разделении частотных составляющих, при реконструкции фазы в схемах интерферометров, работающих на т.н. «нулевой» полосе, например, в тех схемах, где используется низкокогерентное излучение [3]. Вторую группу составляют методы, в которых восстановление производится по серии интерферограмм, полученных при некотором известном изменении параметров интерферометра. В зависимости от способа внесения фазового сдвига методы разделяют на подгруппы: фазо-фиксируюшие [10,11], гетеродинные [12,13], фазово-сдвигающие [14,15] методы интерферометрии, соответственно.

Интерференция волн – явление усиления или ослабления амплитуды результирующей волны в зависимости от соотношения между фазами складывающихся в пространстве двух (или нескольких) волн. Интерференция может наблюдаться только при выполнении условия когерентности (пространственной и временной

# 3 Теоретические основы метода восстановления фазового изображения с использованием преобразования Фурье

# Список литературных источников

1. М.М. Барышева, Ю.А. Вайнер и др. Особенности изучения шероховатости подложек для многослойной рентгеновской оптики методами малоугловой рентгеновской рефлектометрии, атомно-силовой и интерференционной микроскопии: Известия РАН. Серия физическая, 2011, том 75, № 1, с. 71–76
2. Вест Ч. Голографическая интерферометрия. - М.: Мир, 1982.-504 с
3. Минаев
4. Гужов В.И., Ильиных С.П., Компьютерная интерферометрия. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – с.
5. Крайнюков Н. Л., Храмов А. Г. Выделение центров полос на интерферограмме // КО. 1992. №10-11.
6. Robinson D.W. Automatic fringe analysis with computer image-processing system // Applied Optics. – 1983. – V.22. – P.2169-2176.
7. Roddier C., Roddier F. Interferogramm analysis using Fourier transform techniques // Appl. Opt. – 1987. – V.26. – No. 9. – P.1668.-1673.
8. Trusiak, Maciej & Patorski, Krzysztof & Wielgus, Maciek. Hilbert-Huang processing and analysis of complex fringe patterns // Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 9203. 10.1117/12.2054038. (2014).
9. Акционерное общество ЛОМО [Электронный ресурс] / Микроинтерферометр Линника МИИ-4М. Санкт-Петербург. URL: <https://www.lomo.ru/production/grazhdanskogo-naznacheniya/mikroskopy/mikroskopy-tekhnicheskie/mii-4m>
10. Makosch G., Prein F. Phase-locked interferometry for automatic mask alignment in projection printers // Appl.Opt.- 1987. -No.26.- P.2828.
11. Moran S.E., Law R.L., Craid P.N., Golberg W.M. Optically phase-locked elktronic speckle pattern interferometer // Appl.Opt.- 1987.- V.26.- No.3.- P.475-491.
12. К.С. Лукьянов, К.Л. Губский. А.А. Ястребцев, И.Ю. Тищенко, Т.В. Казиева. Волоконный многоканальный гетеродинный интерферометр для исследования свойств импульсной плазмы // Письма в журнал технической физики. 49. (2023)
13. В.И. Телешевский, А.А. Скрынник, С.Г. Гришин. Гетеродинная лазерная интерферометрия для измерений наноперемещений // Измерительная техника 6, 13-18 (2006)
14. М.А. Парпин, Д.А. Серегин. Алгоритм калибровки и расчета фазы при работе на интерферометре фазового сдвига // Вопросы радиоэлектроники. Сер.: Техника телевидения. Вып. 1. 2012.
15. В.И. Гужов, С.П. Ильиных, Р.А. Кузнецов, Д.С. Хайдуков. Уменьшение погрешности определения фазовых разностей при анализе интерферограмм методом пошагового фазового сдвига // Автоматика и программная инженерия. 2012, №2(2)