# 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.

# 3 Цель работы

Целью настоящей работы является разработка программного обеспечения для восстановления фазового распределения исследуемого объекта по одной интерферограмме с использованием преобразования Фурье. Для получения интерференционного изображения используется микроскоп Линника МИИ-4 [9].

# 4 Основное уравнение двухлучевой интерферометрии

Наиболее часто используются двухлучевые интерферометры, т.е. оптические системы, в которых происходит интерференция двух волновых фронтов. В [16] рассматривается математическое описание процесса интерференции. Напряженность электрического поля представляет собой комплексную величину с комплексной пространственной амплитудой и гармонической зависимостью от времени:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | (1) |
|  |  | |

Комплексная пространственная амплитуда определяется как:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | (2) |
| где | – модуль напряженности поля, | |
|  | – фазовый член. | |

Если среда, в которой распространяются две волны, линейна (т.е. отсутствует зависимость свойств среды от происходящих в ней процессов), результирующее колебание представляет собой геометрическую сумму колебаний, соответствующих каждой из складываемых волн. Падающая электромагнитная волна с напряженностью поля делится на два когерентных пучка [4]: на объектную (тестирующую) волну с напряженностью поля и опорную (эталонную) волну с напряженностью поля . В качестве делителя луча обычно используется полупрозрачное зеркало. После прохождения соответствующих путей и накопления фазовых задержек происходит суперпозиция волн и на втором светоделителе. Напряженность результирующего поля равна векторной сумме волн:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | (3) |
|  |  | |

Большинство оптических детекторов не позволяют непосредственно регистрировать комплексную амплитуду поля из-за высокой частоты световых волн (- Гц), а реагируют лишь на усредненную энергию или интенсивность принимаемого излучения. Поэтому в эксперименте наблюдаемые величины интенсивности оптического изображения пропорциональны среднему значению квадрата напряженности электрического поля за время, определяемое инерционностью приемника излучения. Интенсивность выражается в ваттах на квадратный метр (Вт/) и определяется выражением:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | (4) |
|  |  | |

В случае, когда когерентны, интенсивность в выходном зрачке координатной системы интерферометра описывается соотношением:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| + + 2 | | (5) |
|  |  | |

Выражение для результирующей интенсивности интерферирующих волн помимо суммы интенсивностей для каждой из волн содержит слагаемое 2, называемое интерференционным членом. Скалярное произведение векторов всегда равно нулю (интерференция отсутствует), если складываемые волны линейно–поляризованы в ортогональных направлениях. Если интерферирующие волны одинаково поляризованы, то можно отвлечься от векторного характера этих величин. В этом случае выражение для интенсивности имеет вид:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | (6) |
|  | | (7) |
|  |  | |

В результате:

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | | (8) |
|  |  | |

Из выражения (8) видно, что благодаря введению опорного пучка возникает интерференционная картина, в которой содержится информация как об амплитуде, так и о фазе рассеянной волны. Метод выделения сигнала, содержащего информации о фазе, с использованием преобразовании Фурье будет рассмотрен в следующем разделе.

# 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)
16. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973, – 719с.