

ЛАЗЕРНАЯ МОДУЛЯЦИОННАЯ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННАЯ МИКРОСКОПИЯ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

© 2012 г. А. В. Лопарев*, А. Б. Зензинов*, канд. техн. наук;
П. С. Игнатъев*, канд. физ.-мат. наук; К. В. Индукаев*; П. А. Осипов*; Е. В. Ромаш**

* ООО “Лаборатории Амфора”, Москва

** ФГБОУ ВПО МГТУ “СТАНКИН”, Москва

E-mail: lav@amphoralabs.ru

Разработана новая версия модуляционного интерференционного микроскопа с длинноходовым координатным столом на аэромагнитных направляющих, обеспечивающих перемещение микроскопа с непрямолинейностью не более 0,1 мкм на длине хода до 300 мм. Данная модификация микроскопа может быть использована для исследования поверхности крупногабаритных оптических деталей размером до 300 × 300 × 100 мм с разрешением 0,1 нм по вертикали и 10–100 нм в плоскости образца. Рассмотрены конструкция и принцип работы основных узлов микроскопа. На примерах показаны возможности и преимущества разработанного микроскопа при исследовании оптических поверхностей.

Ключевые слова: модуляционная интерференционная микроскопия, оптическая анизотропия, исследования оптических поверхностей, топология интегральных схем, наноструктурные исследования.

Коды OCIS: 180.3170, 170.1650.

Поступила в редакцию 23.12.2011.

Введение

Современный оптический прибор является высокотехнологичным продуктом, объединяющим в себе достижения микроэлектроники, механики, оптики, информатики и других фундаментальных и прикладных наук. Несмотря на существенные изменения, которые мы видим в современных оптических приборах, связанные прежде всего с автоматизацией измерительного процесса, главными их элементами остаются оптические детали. От технических параметров и качества изготовления этих деталей зависят точность измерений, надежность конструкции, габариты, масса, стоимость прибора и т. п. Жесткая конкуренция на международном рынке обуславливает непрерывное совершенствование оптической элементной базы приборов и их конструкции.

Актуальной задачей в современном оптическом производстве является оценка качества оптических поверхностей с шероховатостью Ra в диапазоне 0,1–5 нм. Такие задачи возникают, например, при производстве проекционных оптических систем, работающих в коротковол-

новом диапазоне оптического излучения. Эти системы широко используются в фотолитографических процессах при производстве интегральных микросхем.

Измерения наногеометрии поверхности необходимы при создании различных дифракционных структур. Оптимизация эффективности дифракционных оптических элементов напрямую связана с формой штриха решетки. Например, в задачах коррекции волнового фронта мощного лазерного излучения в реальном времени используют дифракционные элементы с минимальным значением дифракционной эффективности в заданном порядке дифракции. Одной из главных задач современной дифракционной оптики является создание киноформных элементов, качество которых полностью определяется формой штриха. Создание таких элементов невозможно без эффективных средств контроля геометрических параметров микрорельефа оптических поверхностей.

Традиционные средства контроля формы оптических поверхностей имеют невысокое пространственное разрешение в плоскости из-

меряемой поверхности (латеральное разрешение). Это обстоятельство не позволяет с необходимой точностью воссоздать микроструктуру поверхности, определяемую как функцию нормальных уклонов поверхности от заданной формы в зависимости от пространственных координат. Кроме того, в традиционных интерференционных средствах контроля формы оптических поверхностей чувствительность измерений нормальных уклонов ограничивается величиной порядка 20 нм и определяется точностью считывания координат максимальных значений интенсивности интерференционных полос. В настоящей работе предлагается оригинальный метод контроля оптических поверхностей на основе метода модуляционной интерференционной микроскопии в сочетании с прецизионным длинноходовым координатным столом с нанометровой точностью позиционирования. Такой подход позволяет исследовать различные оптические поверхности с рекордным разрешением в совокупности с однозначной привязкой к единой координатной сетке размером $300 \times 300 \times 100$ мм и скоростью получения изображений 3–200 кадр/с (в зависимости от пространственного разрешения).

Оптическая система и конструктивные особенности измерительного модуляционного интерференционного микроскопа (МИМ)

В основу метода модуляционной интерференционной микроскопии положен принцип измерения фазы промодулированной объектом световой волны. Тот факт, что измеряя фазу сигнала можно преодолеть известный предел разрешения Рэлея, существующий для амплитудных измерений, известен с начала 50-х годов [1]. В результате теоретических и экспериментальных исследований нами был разработан оригинальный метод измерения геометрических и оптических параметров микрообъектов. Суть метода заключается в том, что модуляция световой волны проводится по нескольким параметрам (амплитуде, фазе, поляризации и углу откоса лазерного луча (апертурному углу)), но не менее чем по двум. Так, например, изменение плоскости поляризации лазерного излучения при последовательной записи фазовых портретов позволило зарегистрировать области оптической анизотропии фотонных кристаллов [2].

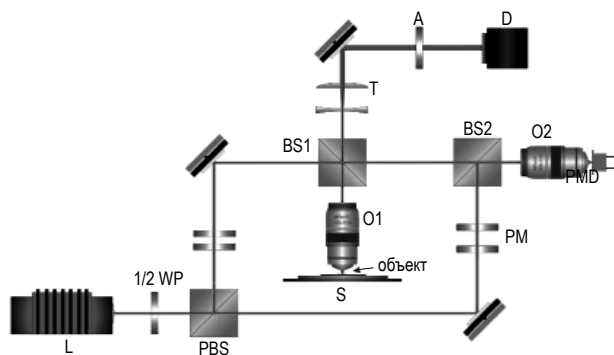


Рис. 1. Оптическая схема интерферометрической системы МИМ (пояснения в тексте).

Оптическая схема лазерного канала представляет собой модификацию интерферометра Маха–Цандера с фазовым модулятором в опорном плече (рис. 1). Основное преимущество схемы Маха–Цандера состоит в возможности независимого управления поляризацией в объектном и опорном плечах интерферометра, а также в последующем учете поворота плоскости поляризации, вносимого измеряемым объектом. Оригинальная конструкция данного интерферометра позволила существенно снизить влияние вибраций и, как следствие, снизить уровень собственных шумов прибора.

Управление поляризацией осуществляется с помощью автоматизированных поляризационных модуляторов РМ, позволяющих вращать плоскости линейной поляризации объектного и опорного лучей интерферометра, изменять тип поляризации на эллиптическую или круговую. Для анализа объектов, обладающих оптической анизотропией, перед CMOS-камерой D устанавливается анализатор А.

В качестве источника когерентного излучения используется твердотельный лазер с длиной волны $\lambda = 532$ нм. Измеряемый объект размещается на столе S под микрообъективом O1. Коллимированный пучок лазера L проходит через полуволновую пластинку 1/2WP и разделяется на поляризационном светоделителе PBS. Один из пучков (объектный) фокусируется объективом O1 на объект и после отражения от него, пройдя светоделитель BS1 и проекционную систему T, попадает на фотоприемник D. В качестве фотоприемника используется 12-битная CMOS-камера Silicon Imaging модель SI-1280f.

Опорный пучок фокусируется объективом O2 на зеркало, закрепленное на пьезоприводе

РМД, осуществляющее линейно-периодическую модуляцию оптической разности хода, и после отражения от этого зеркала также попадает на фотоприемник. Фазовое изображение строится по трем интерферограммам, полученным при различных положениях опорного зеркала. В отличие от традиционного метода фазовых шагов, алгоритм расчета фазы, используемый в микроскопе серии МИМ, состоит в том, что точки стояния опорного зеркала и закон его перемещения выбираются из соображений минимизации погрешностей измерения фазы.

Введение в оптическую схему полуволновой пластинки и поляризационного светоделителя позволило реализовать переменный коэффициент деления интенсивности объектного и опорного пучков в микроскопе. Это способствует достижению максимального контраста интерференционной картины в зависимости от коэффициента отражения изучаемого объекта и, следовательно, рациональному использованию динамического диапазона CMOS-камеры, и тем самым уменьшению уровня шума в фазовых изображениях.

Показано, что при измерениях с помощью МИМ оптически однородных, хорошо отражающих свет объектов достигается разрешение порядка 0,1 нм (по вертикали) и 15–100 нм – в плоскости объекта, что значительно превышает классический предел разрешения для световых микроскопов [3]. Однако при низкой отражающей способности объектов разрешающая способность прибора снижается. Тем не менее, можно утверждать, что разрешающая способность МИМ при измерениях подобных объектов выше, чем у традиционных оптических микроскопов.

Предел разрешения, определяемый критерием Рэля, можно рассчитать по известной формуле

$$D = \frac{0,77\lambda}{NA}, \quad (1)$$

где λ – длина волны лазера, NA – числовая апертура объектива, D – разрешающая способность объектива. Из выражения (1) следует, что при использовании лазера с длиной волны $\lambda = 532$ нм разрешающая способность МИМ с объективом, имеющим увеличение $50\times$ и числовую апертуру $NA = 0,8$, должна составлять 400 нм. Однако эксперименты показали, что на фазовых портретах имеются четко различимые структуры размерами порядка

100–150 нм, а при увеличении фазового контраста существенно меньше – до 15–20 нм.

Разрешение при фазовых измерениях определяется целым рядом характеристик как самого сигнала, так и измерительного прибора. Вертикальное (Z) разрешение зависит от точности определения фазы промодулированной объектом волны. Информация о фазе объектной волны может быть получена только из интерференционной картины, формируемой объектной и опорной волнами. Таким образом, задача сводится к определению фазы опорной волны, которая известна с точностью определения положения опорного зеркала и оптических характеристик микроскопа. В рассматриваемой модификации МИМ разрешение по вертикали с использованием системы активной виброзащиты достигает 0,1 нм.

Предметный стол (рис. 2) является одним из основных узлов измерительного микроскопа. С ростом увеличения уменьшается поле зрения микроскопа. Возможность проведения сверхточных измерений геометрических и оптических параметров протяженных объектов, размер которых превышает поле зрения микроскопа, непосредственно связана с техническими характеристиками предметного стола. Очевидно, обеспечение высокой точности и плоскостности перемещений на большой длине хода стола является сложной инженерной задачей. Для обеспечения высокой плоскостности, жесткости и улучшения кинематических характеристик в конструкции предметного стола использованы аэромагнитные направляющие

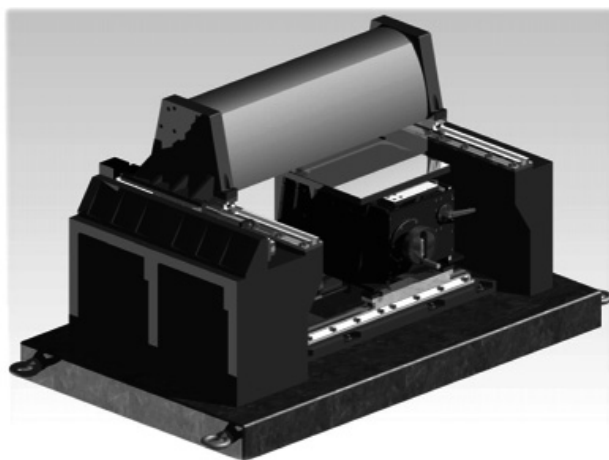


Рис. 2. 3D модель МИМ с длинноходовым координатным столом.

щие. Подвижные части этих направляющих имеют гарантированный воздушный зазор за счет уравнивания сил, создаваемых постоянными магнитами и давлением подаваемого воздуха в кинематическую пару. Магнитная система повышает жесткость направляющих, а аэростатическая – обеспечивает зазор и, следовательно, отсутствие трения и износа. Минимальные потери на трение приводят к незначительным тепловыделениям вследствие малой вязкости газов. Ввиду отсутствия флуктуации сил трения при относительном перемещении подвижных частей, разделенных воздушным слоем, становится возможным перемещение с минимальной скоростью скольжения и высокой точностью позиционирования. Кроме этого, система работает практически без износа, что определяет долговременную стабильность ее технических характеристик.

Для обеспечения высокой точности позиционирования был использован привод на основе шариковинтовой передачи (ШВП) [4]. ШВП обладает всеми основными техническими преимуществами передачи винт–гайка скольжения, однако при этом лишена ее главных недостатков, таких как низкий КПД, повышенные потери на трение и быстрый износ.

Примеры исследования оптических поверхностей

В качестве иллюстрации возможностей МИМ с длинноходовым координатным столом на основе ШВП и аэромагнитных направляющих, обеспечивающих нанометровую точность позиционирования, в данном разделе приведены примеры измерения некоторых образцов оптических деталей. Следует сразу отметить, что приведение полных (панорамных) изображений, получаемых на МИМ с длинноходовым предметным столом, в данном разделе нецелесообразно вследствие неразличимости локальных структур на больших полях зрения.

На рис. 3 приведено изображение участка поверхности линзы диаметром 200 мм (производство фирмы Carl Zeiss). На поверхности линзы четко видны следы полировки (треки шириной 200 нм и глубиной 80 нм). Шероховатость Ra поверхности линзы составляет 7,5 нм. Важно отметить, что традиционно используемые для контроля качества оптических поверхностей оптические профилометры вследствие низкого разрешения не позволяют ви-

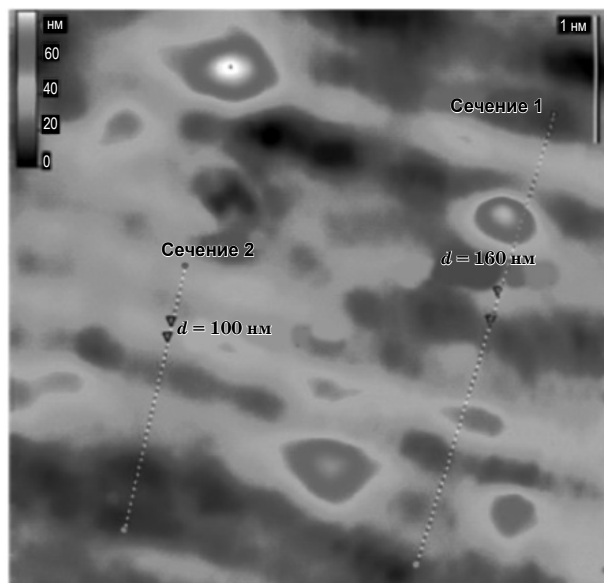


Рис. 3. Изображение участка поверхности линзы.

зуализировать подобные дефекты, а погрешность измерения шероховатости в диапазоне 1–100 нм достигает 80% [5, 6].

Еще одним важным направлением оптической промышленности является технология производства сверхгладких ($Ra = 0,2–1,0$) поверхностей, например лазерных зеркал или поверхностей, предназначенных для создания оптического контакта. На рис. 4а и 4б приведены изображения и профиль сечения поверхности лазерного зеркала, а на рис. 4в и 4г – изображение и профиль сечения участка поверхности зеркала лазерного гироскопа. Шероховатость поверхности лазерного зеркала $Ra = 0,6$ нм, при этом на профиле четко видны дискретные ступеньки высотой 0,1 нм (рис. 4б).

Исследования наноструктуры поверхности зеркал лазерных гироскопов на МИМ могут быть использованы для выбора оптимального режима технологии обработки изделий.

В некоторых оптических изделиях существует необходимость оптического контакта между поверхностями. Как известно, преимуществом оптического контакта является снижение коэффициента отражения в области контакта. Вследствие того, что оптический контакт обусловлен действием молекулярных сил, к качеству соединяемых поверхностей предъявляются повышенные требования. В настоящее время для прецизионной доводки оптической поверхности используется метод магнитореологической суспензии [7]. На рис. 5

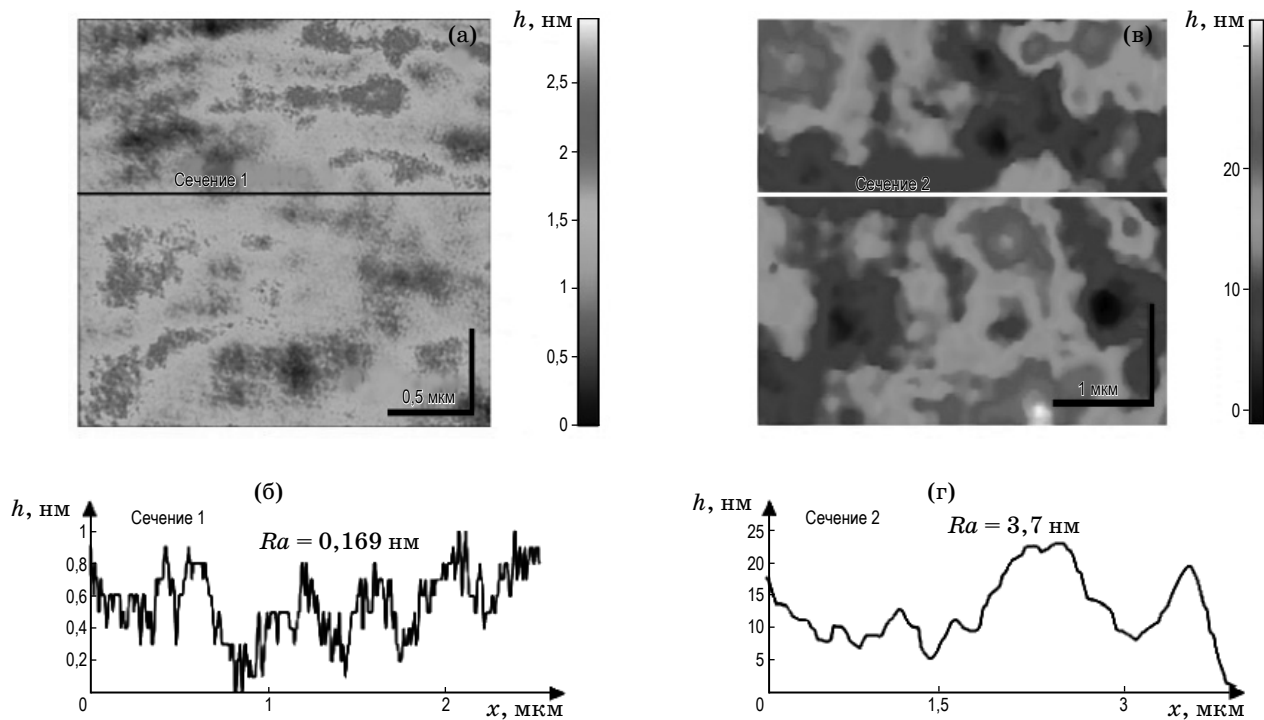


Рис. 4. Изображения оптической поверхности и профили сечения.

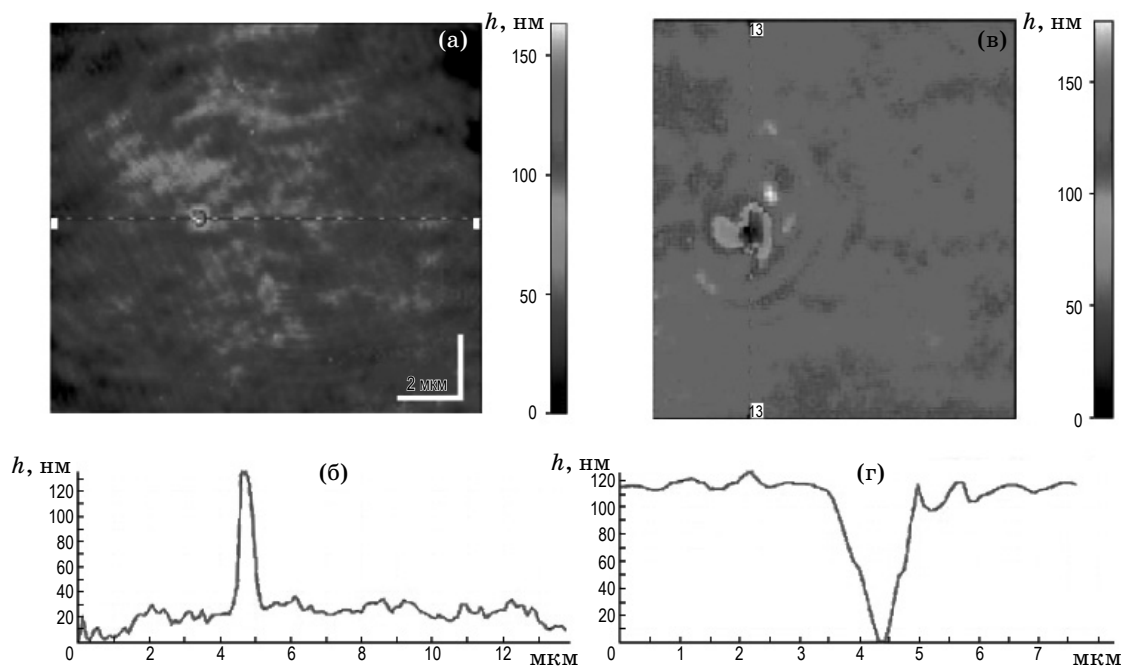


Рис. 5. Изображение поверхностей, предназначенных для соединения методом оптического контакта. а – с дефектом в виде выступа и его профиль – б; в – с дефектом в виде провала и его профиль – г.

приведены изображения различных участков поверхностей, предназначенных для соединения методом оптического контакта.

Критичными являются отклонения формы поверхностей в виде локальных выступов

(рис. 5а и 5б), поскольку в данном случае нарушается плотность прилегания сопрягаемых поверхностей. Дефекты в виде локальных провалов (рис. 5в и 5г) не являются критичными, поскольку на плотность прилегания они не

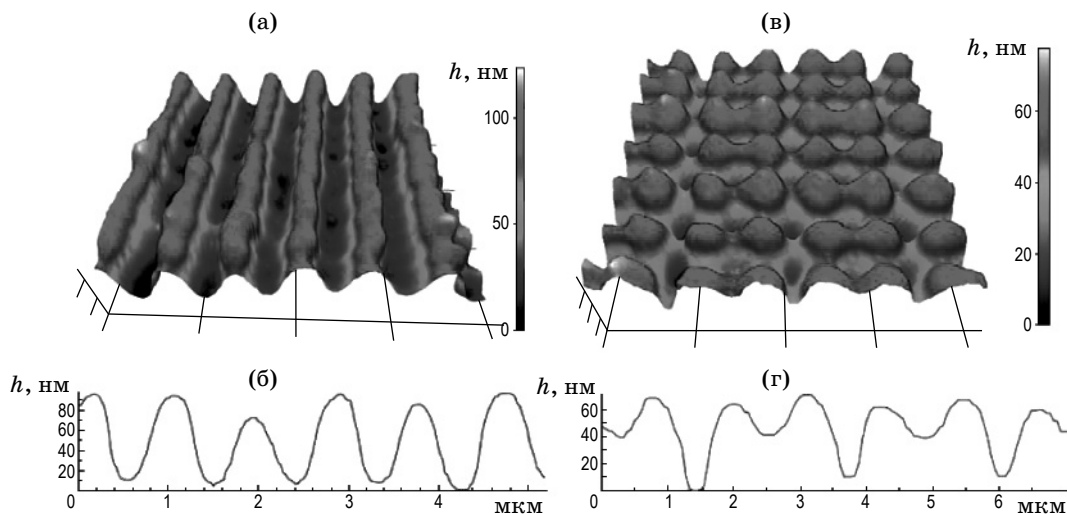


Рис. 6. Изображения голографических решеток. а – одномерная голографическая решетка и ее горизонтальное сечение – б; в – двумерная голографическая решетка и ее горизонтальное сечение – г.

вливают. Исследование этих поверхностей с помощью МИМ позволяют не только выявить, но и установить вид дефекта [6]. Анализ наноструктурных дефектов, выявленных с помощью МИМ, позволил значительно сократить процентную долю бракованных изделий.

Важным примером эффективного использования МИМ является исследование формы штрихов дифракционных элементов. Нами были проведены измерения микроструктуры поверхности одномерных и двумерных голографических решеток [8].

Из полученных результатов, приведенных на рис. 6, были выявлены локальные неоднородности периодической структуры голографической решетки. Флуктуация фазовой высоты штрихов одномерной голографической решетки составила 30 нм (рис. 6б).

Обсуждение и выводы

Уникальные технические характеристики МИМ позволяют исследовать объекты с разрешением, на порядок превосходящим известные методы оптической микроскопии. Интеграция измерительной головки МИМ в разработанный нами длинноходовой координатный стол нанометровой точности позволит существенно расширить диапазон геометрических размеров измеряемых объектов и перейти от лабораторного прибора к технологической установке, предназначенной для контроля ка-

чества крупногабаритных изделий различных отраслей промышленности. Рассматриваемый МИМ позволяет визуализировать дефекты, недоступные для обнаружения традиционными методами микроскопии. Метод модуляционной интерференционной микроскопии открывает перспективы исследования оптических материальных параметров [3] различных материалов с разрешением 0,1 нм по вертикали и 10–100 в плоскости объекта.

Для лучшего понимания методических аспектов применения этого метода и решения конкретных исследовательских и технологических задач необходимо отразить его преимущества в сравнении с традиционными методами микроскопии, используемыми для исследования крупногабаритных изделий. В оптической промышленности наиболее распространены технологические установки на основе методов конфокальной микроскопии [9] и оптической профилометрии [10]. Данные методы существенно уступают методу модуляционной интерференционной микроскопии по ключевому для микроскопов параметру – разрешению. Разрешение лучших конфокальных микроскопов и оптических профилометров не превышает 200 нм, что ограничивает их применение в современных технологических процессах.

Вторым важным преимуществом является высокое быстродействие МИМ. Достигнуто разрешение 3–200 кадр/с в зависимости от разме-

ра кадра, что также значительно превосходит быстродействие конфокальных микроскопов и оптических профилометров и увеличивает эффективность применения МИМ в технологических линиях.

К другим преимуществам МИМ относятся отсутствие недостатков, вызванных наличием сканирующих устройств, таких как зависимость результата измерения от качества калибровки сканирующей системы, отсутствие артефактов и т. д.

Следует отметить, что МИМ, как и любой микроскоп, имеет ряд ограничений, рассмотрению которых будут посвящены дальнейшие исследования и работы по совершенствованию метода. Одним из таких ограничений является предел измерения по высоте в $\lambda/2$. Известно, что при фазовых измерениях в случае превышения измеряемой величины $\lambda/2$ имеет место скачок фазы на π , что сказывается на изображении в виде разрывов и смещений профиля по вертикали. Программное восстановление таких перескоков эффективно только в случае измерения простых одномерных структур, таких как ступенька или канавка, но в случае сложного рельефа требуется примене-

ние специальных алгоритмов восстановления, основанных на сшивке участков изображения, полученных при постоянном сдвиге начальной фазы интерференционного сигнала.

Быстродействие МИМ ограничено быстродействием фотоприемной системы, линейностью отклика пьезокерамики в опорном плече интерферометра и пропускной способностью USB 2.0 интерфейса. Используемые в МИМ пьезокерамики сохраняют требуемый уровень линейности на частотах до 1 КГц, следовательно, при переходе на USB 3.0 быстродействие МИМ может быть увеличено до 300 кадр/с.

В заключение следует отметить, что МИМ имеют перспективы применения и в других отраслях оптической промышленности. В настоящее время нами исследуются вопросы применения МИМ для поляризационных исследований покрытий, жидкокристаллических дисплеев, визуализации фотонных кристаллов и анизотропных включений.

В работе использованы результаты исследований, выполненных при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Постановления Правительства РФ № 218 от 9 апреля 2010 г.

* * * * *

ЛИТЕРАТУРА

1. Bennet A.H. Phase microscopy // N.Y.: John Wiley & Sons, Inc., 1951. 166 p.
2. Романов С.Г., Бардосова М. Поляризационная анизотропия оптического пропускания в опалах и Лэнгмюр-Блоджет кристаллах // Физика твердого тела. 2010. Т. 52. № 3. С. 495–504.
3. Andreev V.A., Indukaev K.V. The problem of sub-Rayleigh resolution in microscopy // Journal of Russian Laser Research. 2003. V. 24. № 3. С. 1–22.
4. Фефелова Т.С. Новые конструкции преобразователей движения для мехатронных модулей // Фундаментальные исследования. 2010. № 3. С. 50–51.
5. ГОСТ 11141-84. Детали оптические. Классы чистоты поверхностей. Методы контроля. Введ. 1985-01-01. М.: Издательство стандартов, 1984.
6. ГОСТ 2789-73. Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики. Введ. 1975-01-01. М.: Издательство стандартов, 1973.
7. Азарова В.В., Голяев Ю.Д., Колодный Г.Я. Прецизионные оптические поверхности и лазерные зеркала. Их метрология и применение // Тр. 50-й научно-технич. конф. МФТИ. 2007. Ч. 5. Физическая и квантовая электроника. С. 45–46.
8. Карасев А.Л., Смирнов А.В., Смирнов Л.И., Юренков М.В. Способ защиты ценного предмета // Евразийский патент № 011567. 2008.
9. Wyant J.C. White light interferometry exhibits error // Proc. SPIE. 2002. V. 4737. P. 98–107.
10. Профилометр с одинарным датчиком для бесконтактной 2D и 3D метрологии поверхности <http://www.frt-gmbh.com/en/products/microprof/microprof/>