

Лазерная модуляционная интерференционная микроскопия как средство контроля формы и шероховатости оптических поверхностей

П. С. ИГНАТЬЕВ¹, Л. С. КОЛЬНЕР¹, К. В. ИНДУКАЕВ¹, В. И. ТЕЛЕШЕВСКИЙ²

¹ ООО «Лаборатории АМФОРА», Москва, Россия

² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», Москва, Россия, e-mail: ips@amphoralabs.ru

Рассмотрено применение технологии модуляционной интерференционной микроскопии в качестве эффективного инструмента для контроля качества прецизионных оптических поверхностей с шероховатостью порядка 1 нм и плоскостностью до 10 нм на апертуре до 100 мм.

Ключевые слова: модуляционная интерференционная микроскопия, сверхразрешение, анизотропия, оптическая поверхность.

The different aspects of modulation interference microscopy technology application as an effective tool for quality control of the precision optical surfaces with the roughness of about 1 nm and flatness up to 10 nm at the 100 mm aperture, were considered.

Key words: modulation interference microscopy, super-high resolution, anisotropy, optical surfaces.

В настоящее время в оптической промышленности обозначились технологические проблемы, решение которых на существующем оборудовании не представляется возможным. К их числу относится обработка стеклянных линз, форма которых отличается от геометрической сферы (асферически), в нанометровом диапазоне погрешностей. Чаше всего такие линзы применяют для компенсации сферической аберрации при производстве объективов с большой апертурой, широкоугольных объективов для компенсации искажений и высококачественных компактных зум-объективов.

Перспективный способ получения высококачественной поверхности твердых хрупких кристаллических материалов нанометрового рельефа — удаление поверхностного слоя в режиме квазипластичности. При квазипластичной обработке твердых материалов подача шлифовального круга на обрабатываемую поверхность составляет доли миллиметра за один проход. При этом поверхностный слой хрупких твердых материалов проявляет пластичные свойства и преобладающим механизмом становится не хрупкое разрушение, а квазипластичное удаление поверхностного слоя [1].

Проблемой является достоверный контроль точности формы и шероховатости поверхности асферических линз и других криволинейных поверхностей, так как погрешность измерений должна быть в пределах 0,5—2,0 нм. Такие проблемы возникают, например, при производстве проекционных оптических систем, работающих в коротковолновом диапазоне оптического излучения. Традиционные средства контроля формы оптических поверхностей имеют недостаточно высокое пространственное (латеральное) разрешение, что не позволяет с необходимой точностью воссоздавать микроструктуру поверхности, определяемую функцией нормальных отклонений от заданной формы в зависимости от пространственных координат. Кроме того, разрешающая способность традиционных средств контроля формы оптических поверхностей ограничена 20 нм и определяется точностью считывания координат, соответствующих максимальным значениям интенсивности интерференционных полос.

Измерение шероховатости меньше 1 нм сверхгладких поверхностей также является актуальной задачей нанотехнологий, применяемых в полупроводниковой и оптической промышленности. Так, оптические элементы современных лазеров и лазерных гироскопов оказались очень чувствительны к качеству изготовления подложек зеркал резонаторов. Увеличение шероховатости зеркала резонатора даже на 0,1 нм приводит к росту дифракционных потерь и, как следствие, к ухудшению характеристик гироскопа. Наиболее распространенные средства измерений шероховатости сверхгладких поверхностей — оптические профилометры и атомно-силовые микроскопы. Следует отметить, что применение оптических профилометров для этих целей ограничено вследствие низкого разрешения и высокой (до 80 %) погрешности, определяемой шириной спектральной полосы (5 нм) некогерентных источников излучения. В случае использования атомно-силовых микроскопов необходимо учитывать погрешности, вызванные статическим зарядом на исследуемой поверхности. Особую важность приобретают метрологические аспекты измерений шероховатости в диапазоне 0,1—1,0 нм.

В настоящей работе предложен оригинальный метод контроля оптических поверхностей на основе модуляционной интерференционной микроскопии с использованием прецизионного координатного стола на аэромагнитных направляющих с нанометровой точностью позиционирования. Такой подход позволяет исследовать различные оптические поверхности с рекордным разрешением в совокупности с однозначной привязкой к единой координатной сетке размерами 300×300×100 мм и скоростью получения изображений 3—200 кадров/с в зависимости от пространственного разрешения.

Оптическая система и конструктивные особенности модуляционного интерференционного микроскопа (МИМ). В основу МИМ положены принципы лазерной микроинтерферометрии, позволяющие измерять разность фаз, возникающую при прохождении лазерного излучения через ис-

следуемый микрообъект [2, 3]. Оптическая схема интерференционного канала построена по схеме Линника с фазовым модулятором в опорном плече. Основное преимущество схемы состоит в высокой согласованности объектного и опорного плеч интерферометра, что позволяет получать качественные интерферограммы при работе с некогерентными или слабокогерентными источниками излучения. Именно это преимущество было использовано для создания модернизированной версии микроскопа, работающего с некогерентным источником излучения. Модернизация позволила существенно снизить уровень когерентных шумов микроскопа, увеличить точность автоматической фокусировки и обеспечить точную (порядка 100 нм) регистрацию координаты z полученного изображения (рис. 1).

В качестве источника излучения использован светодиод с длиной волны $\lambda = 450$ нм. Исследуемый объект 12 размещается на столе под микрообъективом 11. Коллимированный луч лазера 1 разделяется на светоделительном кубике 3 на два пучка. Один — объектный — фокусируется на объекте и после отражения от него, пройдя светоделитель и проекционную линзу 4, отразившись от зеркала 5, попадает на фотоприемник 6, в качестве которого применена 12-битная CMOS камера Lumenera модели LM085M. Другой пучок — опорный — фокусируется объективом 9 на зеркале фазового модулятора 10, осуществляющем линейно-периодическую модуляцию оптической разности хода, и после отражения от зеркала также попадает на фотоприемник. Навигационный канал белого света — оптический микроскоп светлого поля, работающий в отраженном свете, — используется для поиска области съемки и документирования обзорного кадра. Источником излучения служит белый светодиод 2, который освещает объект через светоделительный кубик 3. Изображение объекта проецируется тубусной линзой 7 на видеокамеру 8 и затем передается в персональный компьютер.

Для обеспечения точной юстировки равенства плеч интерферометра разработано оригинальное приспособление, позволяющее перемещать опорное плечо вдоль оптической оси с подачей до 8 мкм на один оборот юстировочного винта. Для работы с некогерентным источником оптическая схема осветителя, обеспечивающая оптимальную равномерность и контраст интерференционных полос в поле зрения микроскопа, была доработана (рис. 2).

Высокое быстродействие МИМ достигается благодаря использованию высокоскоростных видеокамер, современной электроники и оригинального алгоритма обработки интерферограмм.

При вычислении набега фазы $\Delta\Phi(x, y)$ используется модифицированный метод фазовых шагов [3]. Предметный стол является одним из основных узлов измерительного микроскопа. С ростом увеличения объекта поле зрения микроскопа уменьшается. Возможность проведения сверхточных измерений геометрических и оптических параметров протяженных объектов, размер которых превышает поле зрения микроскопа, непосредственно связана с техническими характеристиками предметного стола [4]. Для обеспечения жесткости, плавности хода и улучшения кинематических характеристик в конструкции стола использованы аэромагнитные направляющие. Подвижные части этих направляющих имеют гарантированный воздушный зазор за счет уравновешивания сил, создаваемых постоянными магнитами и давлением подаваемого воздуха в кинематическую пару.

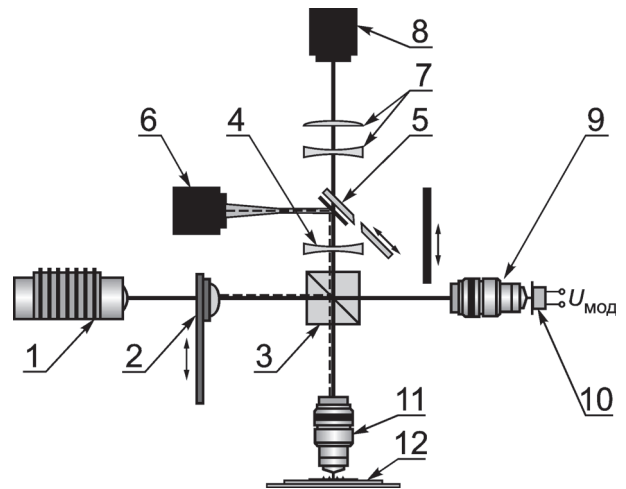


Рис. 1. Оптическая схема интерферометрической системы МИМ:
1 — лазер; 2 — светодиод белого света; 3 — светоделительный кубик; 4, 7 — проекционная и тубусная линзы; 5 — поворотное зеркало; 6 — камера лазерно-интерференционного канала; 8 — видеокамера канала белого света; 9 — объектив опорного плеча; 10 — фазовый модулятор; 11 — объектив предметного плеча; 12 — исследуемый объект; пунктиром обозначен отраженный сигнал

Магнитная система повышает жесткость направляющих, а азростатическая — 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.

Разрешающая способность МИМ. В настоящее время нет четкого понимания или определения разрешающей способности интерференционных методов микроскопии. Это связано с тем, что классические способы определения разрешающей способности оптических приборов не учитывают ее зависимости от фазового контраста объекта. Разрешение при фазовых измерениях определяется характеристиками как самого сигнала, так и измерительного прибора. Разрешение по вертикальной оси Z определяется точностью измерения фазы волны, промодулированной объектом. В МИМ разрешение по вертикали с использованием системы активной виброзащиты достигает 0,1 нм. Латеральное разре-

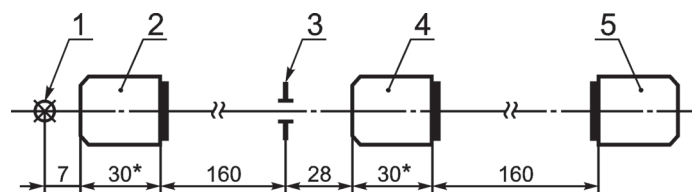


Рис. 2. Оптическая схема осветителя со светодиодом:
1 — светодиод; 2, 4 — микрообъективы Ломо 10[×] и 2[×], соответственно; 3 — апертурная диафрагма; 5 — микрообъективы в опорной и объектной ветвях интерферометра

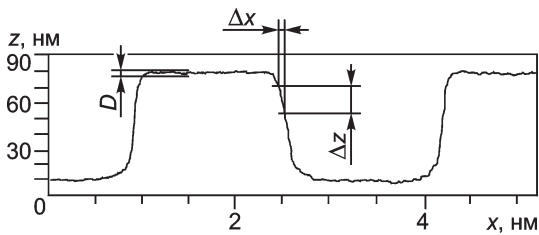


Рис. 3. Профиль тестовой структуры LINES

шение в плоскости XY меняется в пределах 15—100 нм в зависимости от фазового контраста исследуемого объекта. Проводились эксперименты по определению разрешающей способности МИМ классическим методом. Суть эксперимента состояла в измерении тестовой структуры, представляющей набор микроцилиндров диаметром 200 нм и высотой 100 нм, при этом расстояние между каждой соседней парой цилиндров варьировалось от 200 до 60 нм с шагом 20 нм. Таким образом, минимальное расстояние между двумя цилиндрами, при котором оптическая система микроскопа регистрирует их раздельно, определяло разрешающую способность микроскопа. Эксперимент показал, что при одинаковой высоте цилиндров в 100 нм разрешающая способность МИМ составляет 180 нм, а когда высота цилиндров различна, например 100 и 40 нм, разрешающая способность увеличивается до 80 нм.

Для нахождения максимальной разрешающей способности МИМ использовали предельный случай, при котором ее определяют на структуре с максимальным градиентом фазы; такой структурой служит прямоугольная ступенька. При этом максимальную разрешающую способность определяли как минимальное расстояние Δx между точками, вертикальное положение которых различается на $\Delta z \geq D$, где D — уровень шума, который характеризуется погрешностью измерения высоты в каждой точке изображения (рис. 3). Очевидно, разрешающая способность будет выражаться дискретностью изображения, т. е. его размером, приходящимся на один пиксел фотоприемника. Корректность выбранного подхода подтверждается воспроизводимым измерением ширины штрихов, отличающихся на 12 нм, что соответствует размеру изображения, приходящегося на единичный пиксел фотоприемника. На микроскоп МИМ-320 получен сертификат № РОСС RU.И750.НЖ02.000050, подтверждающий со-

ответствие технических характеристик лазерного микроскопа МИМ с длинноходовым координатным столом нанометровой точности требованиям, изложенным в технических условиях.

Разрешающую способность в аксиальном направлении находили классическим методом с помощью естественного эталона — поверхности высокоориентированного пироли- тического графита — по измерению высоты атомарных слоев кремния.

В качестве иллюстрации возможностей МИМ с аэромагнитными направляющими координатного стола на рис. 4 приведено изображение участка поверхности ситалла, обработанной методом квазипластического полирования. На изображении четко видны дефекты и следы от полировки, шероховатость поверхности равна 5,5 нм. Важно отметить, что оптические профилометры, традиционно используемые для контроля качества оптических поверхностей, вследствие низкого разрешения не позволяют визуализировать подобные дефекты: погрешность измерений шероховатости в диапазоне 1—100 нм достигает 80 % [6].

Выводы. Полученные технические характеристики МИМ дают возможность исследовать объекты с разрешением на порядок выше классического рэлеевского в оптической микроскопии. Применение в МИМ координатного стола на аэромагнитных направляющих существенно расширяет номенклатуру и линейные размеры измеряемых объектов, повышает эффективность наноструктурных исследований оптических поверхностей, электронных и других изделий [7].

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014—2020 годы» на оборудовании Центра коллективного пользования МГТУ «СТАНКИН». Уникальный идентификатор соглашения RFMEFI57914X0043. Соглашение № 14.593.21.0004 от 04.12.2014 г., уникальный идентификатор проекта RFMEFI59314X0004.

Л и т е р а т у р а

1. Теплова Т. Б. Особенности микрошлифования кристаллов лейкосапфира на станочном модуле с ЧПУ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 3. С. 52—56.
2. Andreev V. A., Indukaev K. V. The problem of subrayleigh resolution in interference microscopy // J. Rus. Laser Res. 2003. V. 24. N. 3. P. 220—224.
3. Лопарев А. В., Игнатьев П. С., Индукаев К. В., Осипов П. А., Мазалов И. Н., Козырев А. В. Высокоскоростной модуляционный интерференционный микроскоп для медико-биологических исследований // Измерительная техника. 2009. № 11. С. 60—64.
4. Телешевский В. И., Шулепов А. В., Есин А. П. Методы повышения точности линейных измерений на измерительных микроскопах с помощью цифровой обработки оптических изображений // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2009. № 1. С. 102—107.
5. Телешевский В. И., Шулепов А. В., Роздина Е. М. Повышение точности измерений линейно-угловых размеров изделий в интеллектуальной компьютерной микроскопии // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 4. С. 35—38.

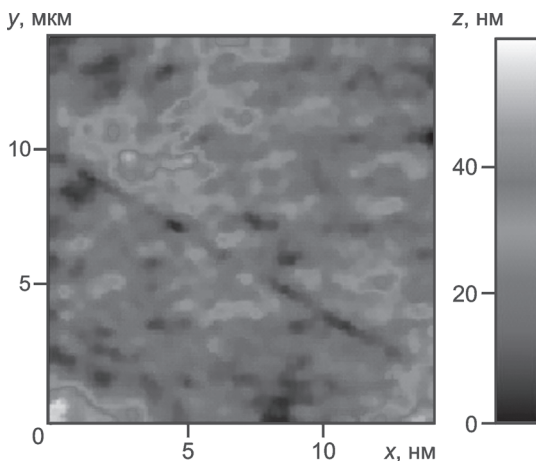


Рис. 4. Участок поверхности подложки зеркала

6. Телешевский В. И., Соколов В. А. Анализ объемных геометрических погрешностей в многокоординатных измерительных и технологических системах на основе лазерных измерений // Измерительная техника. 2013. № 12. С. 19—23.

7. Гришин С. Г., Телешевский В. И. Анализ фазовых шумов в гетеродинной интерферометрии с акустооптическим преобразованием частоты света // Измерительная техника. 2014. № 1. С. 17—21.

8. Латонов И. В., Шулепов А. В. Способ бесконтактной оценки шероховатости поверхности по ее цифровому изображению, формируемому оптической системой измерительного микроскопа // Вестник МГТУ «СТАНКИН», 2013. № 1. С. 141—145.

Дата принятия 15.04.2015 г.

536.46; 536.521.1

Визуализация свободных концентрированных огненных вихрей с помощью термографа

А. Ю. ВАРАКСИН¹, А. В. ГЛУБОКОВ², М. В. ПРОТАСОВ¹, М. Э. РОМАШ¹,
В. Н. КОПЕЙЦЕВ¹, Е. В. РОМАШ²

¹ Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия,

² Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»,
Москва, Россия, e-mail: al-glubokov@yandex.ru

Разработана экспериментальная установка для визуализации огненных вихрей. Проведен анализ нестационарного пламени, получаемого в результате сжигания твердого горючего. С помощью инфракрасного термографа идентифицированы нестационарные огненные вихревые структуры. Предложен алгоритм фиксации огненного вихря по термограмме и определения его геометрических и температурных характеристик.

Ключевые слова: огненные вихри, концентрированные вихри, инфракрасная термография.

The experimental installation for visualization of wall-free fire vortices has been developed. The analysis of the non-stationary fire generated by burning of solid fuel has been carried out. An identification of the non-stationary fire vortex structures occurrence by means of infrared thermograph was done. An algorithm of the fire vortex fixation by thermogram and its geometry/temperature parameters determination has been suggested.

Key words: fire vortices, concentrated vortices, infrared thermography.

Вихревое движение является одной из основных форм движения сплошных сред. В многообразии вихревых потоков отчетливо выделяются концентрированные вихри, широко распространенные в природе (воздушные, водяные и огненные смерчи, пыльные «дьяволы») и применяемые в различных технических устройствах (вихревых горелках, топочных камерах, центробежных форсунках, циклонных сепараторах, вихревых трубах, различных турбулизаторах) [1, 2].

Для формирования ограниченных стенками вихревых течений обычно используют тангенциальный сопловой подвод среды, различные механические закручивающие устройства [3, 4], интенсивное вращение корпусных элементов каналов. Генерацию свободных (не ограниченных стенками) концентрированных вихрей, в том числе и огненных, осуществляют с использованием вентиляторов и (или) путем вращения основания экспериментальной установки [5]. Получаемые указанными способами стационарные вихревые потоки удобны для детального экспериментального изучения, однако их характеристики могут значительно отличаться от параметров реальных нестационарных вихревых структур, например, наблюдаемых в земной атмосфере.

Изучение свободных нестационарных концентрированных вихрей осложнено рядом причин: спонтанностью образования, пространственно-временной нестабильностью, невозможностью управления характеристиками и т. д. Из-за отмеченных трудностей в настоящее время практически отсутствуют экспериментальные работы, где получены результаты по устойчивости и динамике свободных нестационар-

ных концентрированных вихрей, приемлемые для верификации математических моделей. Исключением являются работы по изучению возможностей генерации и управления поведением свободных нестационарных воздушных вихрей [6—9].

Одна из основных задач при исследовании причин возникновения и поведения свободных нестационарных воздушных вихрей — анализ распределения температурных полей. Применение контактных методов невозможно из-за внесения возмущений в структуру течения потоков, что приводит к разрушению вихрей [10]. Использование бесконтактных методов, в частности инфракрасной (ИК) термографии, которые нашли широкое применение в различных областях [11, 12], затруднено из-за малого размера частиц, используемых для визуализации вихрей.

В то же время процессы, аналогичные воздушным вихрям, возникают и в пламени. С одной стороны, исследование пламени имеет специфику, сильно влияющую на результаты, с другой — при достаточной степени визуализации, в том числе и для средств измерений, позволяет определить параметры концентрированных огненных вихрей. Результаты исследований характера изменений температурных полей в зоне появления огненных вихрей и разработанные алгоритмы их идентификации можно применять для решения задач, связанных с воздушными вихревыми потоками. Цель настоящей работы — исследование поведения свободного нестационарного пламени, визуализация возникающих огненных вихрей и оценка их геометрических и температурных параметров с помощью ИК-термографа.