Модернизация микроинтерферометров МИИ-4 и МИИ-4М

Сегодня деятельность многих лабораторий и компаний тем или иным образом связана с нанесением тонких плёнок и микрообработкой поверхности. И все они имеют необходимость контролировать геометрические параметры плёнок и поверхностных структур. Для этого используются, в частности, профилометры различных типов.
В настоящее время за рубежом, в основном для нужд микроэлектроники, разработан и выпускается ряд профилометров, основанных на различных принципах: автофокусировки, интерферометрии, конфокальной микроскопии, атомно-силовой микроскопии и контактного сканирования пьезодатчиком с иглой (стайлусным). Почти для каждого приложения можно подобрать профилометр, оптимально соответствующий предъявляемым требованиям. Но приборы с нанометровым разрешением стóят дорого – в диапазоне 1,5…7 млн руб., что могут позволить себе не многие научные институты или научно-производственные компании. Для обеспечения учебного процесса в вузах дорогие приборы не слишком подходят в силу того, что работать с ними могут только операторы высокой квалификации. В то же время в учебные программы всех основных отраслевых технических вузов и университетов включены курсы, связанные с нано/микротехнологиями, производством микроэлектронных приборов, нанометрологией. Таким образом, для решения широкого круга научно-технических и учебных задач существует потребность в недорогом профилометре, дающим возможность контролировать глубину поверхностных структур в диапазоне от десятков нанометров до десятков микрометров.

В.П. Корольков, *кандидат технических наук*
А.Е. Качкин
Р.В. Шиманский

ИАиЭ СО РАН, ЗАО “Дифракция”, г. Новосибирск

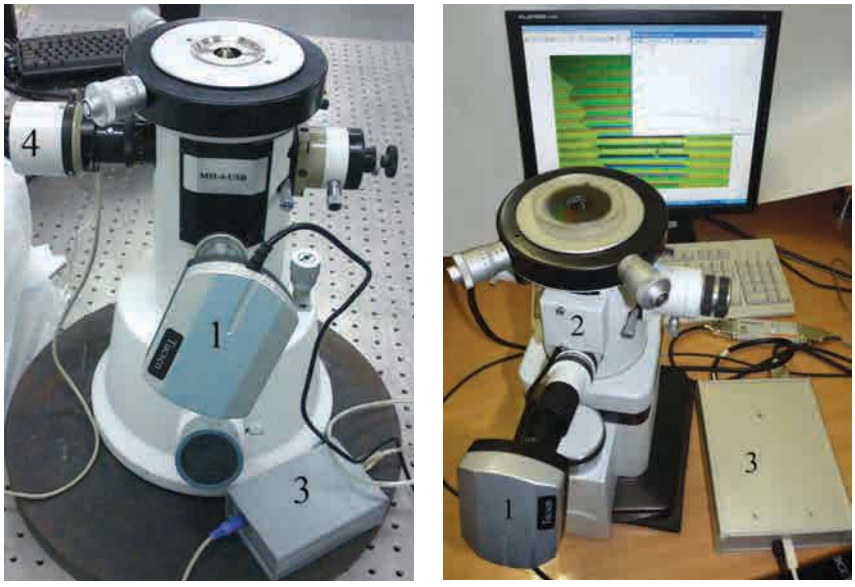
В России в качестве бесконтактного прибора для измерения глубины рельефа наиболее широко используются микроинтерферометр Линника МИИ-4 производства ЛОМО и его более поздняя версия МИИ-4М [1], предназначенные для измерений параметров шероховатости полированных и доведённых поверхностей, а также для измерений толщин плёнок (высоты уступов, образованных краем плёнки и подложки), в диапазоне 0,1...0,8 мкм. К сожалению, эти приборы не соответствуют современным потребностям производства и науки, т.к. не позволяют проводить автоматизированную компьютерную обработку интерферограмм. Известны работы по их модернизации путём введения пьезопривода для зеркала в опорном плече микроинтерферометра и лазерного источника освещения [2, 3] для реализации метода дискретного фазового сдвига. Однако этот способ весьма сложен и дорог из-за высокой цены пьезопривода и электронных

Ключевые слова: профилометр; микроинтерферометр; измерения глубины микрорельефа; нанометрология

драйверов к ним, а также необходимости использования дорогих скоростных камер, позволяющих синхронизировать перемещение пьезопривода и процесс фиксации интерферограмм. Кроме того, не решена принципиальная проблема, связанная с тем, что интерференционная картина в монохроматическом свете от поверхности прозрачной или полупрозрачной плёнки на подложке искажается деструктивной интерференцией в плёнке, не позволяя достичь высокой точности измерений в автоматизированном режиме обработки интерференционной картины. Это значительно ограничивает область применения профилометра. Интерферометры, работающие в белом свете, позволяют значительно снизить влияние деструктивной интерференции.

Лаборатория дифракционной оптики в ИАиЭ СО РАН и ЗАО "Дифракция" применили иной подход к модернизации микроинтерферометров МИИ-4 и МИИ-4М. Он основан на невмешательстве в их интерферометрическую часть, которая за долгую историю производства этих приборов вполне оптимизирована. В базовой версии (рис. 1,*а*) с диапазоном измерений до ±2 мкм предлагается ламповый источник света заменить на светодиодный, управляемый от компьютера, и вместо оптического окуляра установить цифровую USB-видеокамеру для ввода интерферограмм в компьютер, где будет осуществляться автоматизированная обработка. Такая модернизация повысит цену микроинтерферометра МИИ-4 всего на 30% и при этом позволит достичь параметров, сравнимых с параметрами систем, цена которых превосходит стоимость МИИ-4 на порядок. "Платой за экономию" будут отказ от возможности прямого получения 3D-профилограммы, отсутствие моторизованного стола перемещения образца и необходимость выполнения некоторых операций в полуавтоматическом режиме в случае сложного рельефа с крутыми перепадами. Лимитирование измеряемой глубины диапазоном ±2 мкм вызвано ограничением возможности юстировки опорного канала для получения большого количества полос. В расширенной комплектации для приложений, требующих более широкого диапазона измерений, в микроинтерферометр встраивается датчик линейного перемещения измерительного объектива микроскопа (рис. 1,*б*) для определения расстояний между плоскостями фокусировки, соответствующих различной локализации интерференционных полос. Управление всеми электронными узлами системы (в том числе переключение источника освещения между режимом белого и квазимонохроматического освещения) организовано через USB-порт компьютера. Цифровая USB-видеокамера может быть выбрана в диапазоне разрешающей способности 1,3...3 Мпикс. Для кадров с разрешением 1280 × 1024 пикс при учёте оптимального сочетания пространственного разрешения снимков и быстродействия камеры предпочтительно использование более высокочувствительной камеры с разрешающей способностью 1,3 Мпикс. В этом случае поле зрения в пространстве предмета составляет 300 × 240 мкм.

Профилометр имеет 2 режима измерений: однофокусный и многофокусный. В однофокусном режиме реализуется диапазон измерений до ±2 мкм с разрешением 1...5 нм (в зависимости от количества интерференционных полос в кадре). В многофокусном режиме для определения глубины микрорельефа в дополнение к интерферограммам используются показания датчика перемещения объектива. В многофокусном режиме диапазон измерений



а *б*

Рис. 1
Варианты модернизации МИИ-4 (*а*) и МИИ-4М (*б*): 1 – USB-видеокамера; 2 – блок датчика перемещений; 3 – USB-контроллер; 4 – светодиодный осветитель без волоконного подвода светового пучка

составляет не менее 100 мкм с вертикальным разрешением 1 нм. Применение датчика перемещения измерительного объектива позволяет производить измерения глубины рельефа с сильной шероховатостью, когда интерференционную картину невозможно корректно обработать. В таком случае положение фокальной плоскости регистрируется по максимальной яркости и модуляции интерференционной картины или по распознаванию высокочастотного поверхностного рельефа, когда прибор работает в режиме микроскопа на отражение с перекрытым опорным плечом.

Для получения интерферограмм и их последующей обработки применяется специально разработанное программное обеспечение (ПО). Перед запуском процесса измерений, как и любой оптический прибор, профилометр необходимо настроить на фокус измерительного объектива в белом свете (что существенно облегчается инвертированной схемой МИИ-4), установив ахроматическую полосу примерно в центре кадра. Поскольку профилограмма строится ПО относительно горизонтальной оси X кадра, то желательно ориентировать интерференционную картину от плоской поверхности горизонтально. Направление градиента высоты измеряемого рельефа также желательно установить горизонтально. Эта настройка выполняется путём поворота камеры и с помощью штатного юстировочного узла опорного плеча микроинтерферометра. Количество полос в интерференционной картине (не менее 3) определяется ожидаемой глубиной измеряемого рельефа. Необходимо также после включения приборов подстроить яркость обоих светодиодов и параметры видеокамеры так, чтобы получить на текущем образце яркую

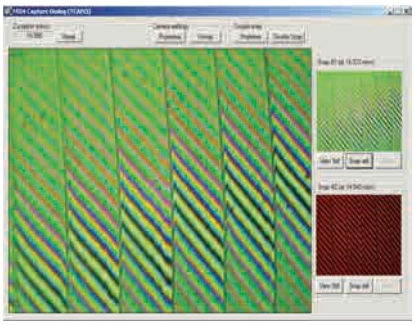


Рис. 2
Скриншот окна для автоматической фиксации двух интерферограмм

интерферограмму без насыщения. Далее запускается автоматический процесс получения 2 интерференционных картин при квазимонохроматическом и белом освещении (рис. 2).

Путём нахождения синусоиды с наиболее подходящими периодом, амплитудой и фазой по интерферограмме, полученной в квазимонохроматическом свете, автоматически вычисляется период P интерференционных полос в пикселах (рис. 3). Затем по интерферограмме, полученной в белом свете (рис. 4), производится трекинг (отслеживание положения) ахроматической полосы, в результате чего определяется смещение каждой её точки $Y(X)$ в пикселах от горизонтальной базовой линии. Результаты измерений представляются в виде 2D-профилограммы (см.рис. 4). При этом зависимость глубины рельефа $H(X)$ от координаты вычисляется программой по формуле:

$$H(X) = (Y(X)/P)\cdot\lambda/2,$$

где λ – длина волны максимума в спектре излучения квазимонохроматического светодиода (в случае выбранного светодиодного осветителя – около 596 нм).

ПО предоставляет следующие возможности математической обработки профилограмм: линейную и параболическую аппроксимацию формы микрорельефа, вычисление высоты ступеньки, вычисление статистических параметров неровности микрорельефа. Для определения глубины пилообразного рельефа, характерного, например, для дифракционной оптики, ПО использует метод определения аппроксимированной глубины [4].

При работе в многофокусном режиме в каждом фокусе производится индивидуальный трекинг ахроматической полосы, результаты которого затем комбинируются автоматически в одну профилограмму с учётом

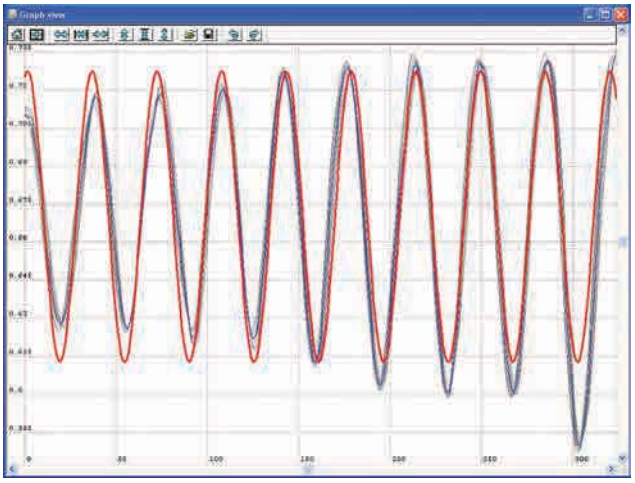


Рис. 3
Определение периода интерференционных полос по сечению интерферограммы при квазимонохроматическом освещении

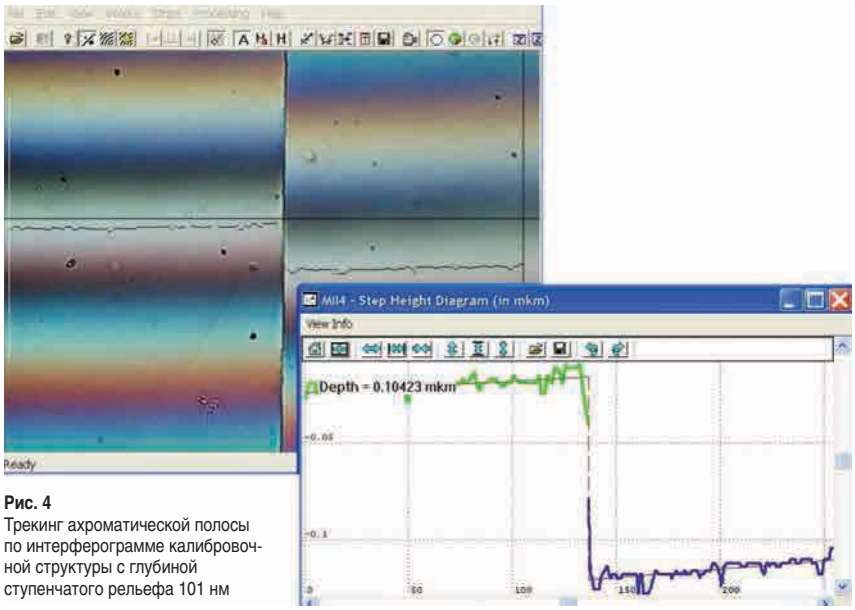
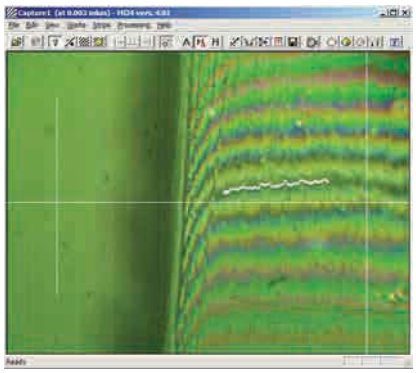


Рис. 4
Трекинг ахроматической полосы по интерферограмме калибровочной структуры с глубиной ступенчатого рельефа 101 нм

показаний датчика перемещения измерительного объектива. На рис. 5 и рис. 6 показан пример измерений высоты упаковочной ленты, наклеенной на стеклянную подложку. Высота ступеньки определяется экстраполяцией данных с каждой стороны ступеньки к середине горизонтального участка между профилограммами для разных фокусов.

При разработке профилометра была поставлена задача измерять глубину микрорельефа с погрешностью 3σ (где σ – среднеквадратичное отклонение измеряемой величины) не хуже (20 нм + 0,01 *H*). Для подтверждения метрологических характеристик прибора проводились измерения различных калибровочных структур. Результаты одного измерения сертифицированного образца с глубиной ступенчатого рельефа 101 нм (см. рис. 4) были любезно предоставлены авторам специалистами СНИИМ. Анализ многократных измерений образца дал величину σ, равную 1,46 нм, величина 3σ соответственно составила 4,38 нм, что существенно меньше целевых ±20 нм. Измерения калибровочной решётки TGZ-11 [5] с периодом 10 мкм и глубиной 1550 нм ±30 нм (данные производителя) показали средний результат 1547 нм.

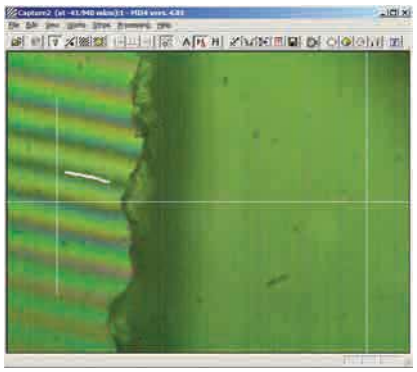
Работа прибора с датчиком перемещения в диапазоне до ±100 мкм контролировалась с помощью лазерного интерферометра, измерявшего положение зеркала, закреплённого на микрообъективе в измерительном плече. Результаты показали, что максимальное расхождение не превышает 0,3 мкм при перемещении на 100 мкм. Представляется, что определяющий вклад в эту ошибку даёт качание интерференционного блока МИИ-4 при его механическом перемещении по вертикали с помощью микровинта и соответствующее отклонение зеркала лазерного интерферометра. Такое качание не влияет на используемые в предлагаемом техническом решении высокоразрешающие оптические датчики линейного перемещения. Циклическая погрешность шкал современных вы-



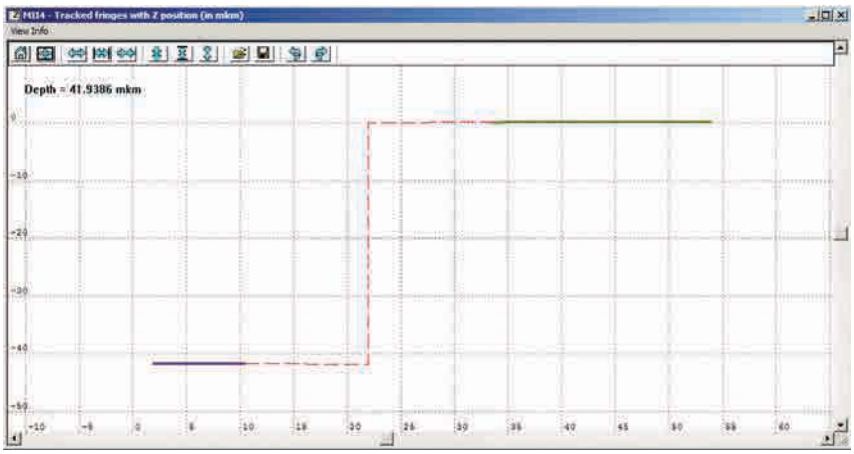
а

б

Рис. 5
Измерение толщины плёнки на подложке в многофокальном режиме (1-й этап):
а – трекинг 1-й интерферограммы; *б* – промежуточная профилограмма



а



б

Рис. 6
Измерение толщины плёнки на подложке в многофокальном режиме (2-й этап):
а – трекинг 2-й интерферограммы; *б* – окончательная профилограмма

Результаты серии контрольных измерений эталонного объекта на модернизированном МИИ-4

№ измерения	Высота, мкм
1	50,0602
2	49,9075
3	50,1165
4	50,0048
5	50,1681
6	50,3005
7	50,2353
8	50,3316
9	50,4157
10	50,4335
11	50,2817

сокоразрешающих датчиков линейного перемещения лежит в пределах ±30...±60 нм и таким образом не является определяющей.

Дополнительная проверка профилометра при реальном измерении рельефа с большой глубиной производилась с использованием эталона SHS 50.0 QC (глубина рельефа 50 мкм) (см. таблицу). Максимальная погрешность не превысила 1%.

***

Таким образом, разработан экономически эффективный подход к модернизации большого парка выпускавшихся многие десятилетия микроинтерферометров МИИ-4 и более современных МИИ-4М с целью преобразования их в автоматизированные высокоразрешающие микропрофилометры с диапазоном измерений вплоть до 100 мкм. Область применения данных приборов включает контроль микрорельефа элементов дифракционной оптики и микрооптики, микроэлектроники, микромеханики и микрофлюидных устройств, а также контроль качества обработки поверхностей при прецизионной лазерной и механической обработке.

Литература

1. Микроинтерферометр МИИ-4 М [Электрон. данные]//Официальный сайт ОАО “ЛОМО”. – Режим доступа: http://www.lomo-microsystems.ru/side.php?c=2&r=36, свободный.
2. Минаев В. Л., Вишняков Г. Н. , Левин Г. Г. Автоматизированный интерференционный микроскоп//Материалы Научно-практической конференции “Голография в России и за рубежом. Наука и практика”. – М., 2005.
3. Автоматизированный интерференционный микропрофилометр АИМ [Электрон. данные]//Официальный сайт ОАО “ЛОМО”. – http://www.lomo-microsystems.ru/side.php?c=2&r=112.
4. Корольков В. П., Остапенко С. В. Характеризация профилограмм кусочно-непрерывного дифракционного микрорельефа//Оптический журнал. – 2009. – Т. 76, № 7. – С. 34–41.
5. TGZ series. Grating for vertical calibration [Электрон. данные]//Официальный сайт компании MIKROMASCH. – Режим доступа: http://www.spmtips.com/tgz/, свободный.