

формы импульса тока. Это обеспечивает возможность подбора оптимального режима работы лазера и защиту дорогостоящих линеек и матриц лазерных диодов от выхода из строя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Курунов Р. Ф. Электрофизические процессы накачки и оптические свойства активных сред мощных лазеров и усилительных систем. СПб, 2009.
2. Вакуленко В. М., Иванов Л. П. Источники питания лазеров. М.: Сов. радио, 1980. 104 с.
3. Грамаков А. А., Фефелов А. П., Чернышев А. В. Высокоэффективные источники накачки для непрерывных твердотельных лазеров // Лазерные системы и их применение: Сб. тр. М., 2004. С. 45—46.
4. Грамаков А. А., Фефелов А. П., Чернышев А. В. Высокоэффективные источники накачки для импульсных полупроводниковых лазерных линеек // Наука и образование. 2012. № 4.
5. Иванов А. Б., Сосновкин Л. Импульсные передатчики СВЧ. М.: Советское радио, 1956.

Сведения об авторах

Анатолий Олегович Темников

— бакалавр; ООО „ФЕДАЛ“, Санкт-Петербург; начальник производства; E-mail: Temnikov90@mail.ru

Алексей Рафаэлевич Гайосо де лос Сантос

— магистр; ООО „ФЕДАЛ“, Санкт-Петербург

Рекомендована
Программным комитетом
симпозиума

Поступила в редакцию
14.12.13 г.

УДК 620.179.118.4

В. В. АЗАРОВА, Т. В. ЦВЕТКОВА

АНАЛИЗ ШЕРОХОВАТОСТИ ПРЕЦИЗИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ИНТЕРФЕРЕНЦИОННОЙ МИКРОСКОПИИ

Рассмотрены особенности применения метода некогерентной интерферометрии для оценки параметров шероховатости прецизионных оптических поверхностей. Приведены результаты измерений, полученные с помощью зондового профилометра и интерферометра белого света.

Ключевые слова: прецизионные оптические поверхности, шероховатость, интерферометрия.

Введение. Метод некогерентной интерферометрии широко используется в измерениях прецизионных оптических поверхностей. Этот метод применяется в сканирующем интерферометре белого света, позволяющем проводить бесконтактные измерения и обеспечивающем структурный анализ исследуемой поверхности. В процессе измерения нановеличин возможно возникновение артефактов, приводящих к большим ошибкам измерения. Исключение артефактов из измерений, полученных на белом интерферометре, производится путем цифровой обработки полученной измерительной информации.

В настоящей статье опровергается утверждение (см., например, [1]), что интерференционную оптическую микроскопию нельзя применять для определения параметров сверх гладких поверхностей. Приводятся результаты измерений параметров прецизионной оптической поверхности, полученные на интерферометрах белого света CCI-2000 (фирмы Taylor-Hobson) и NV-6200 (фирмы Zygo).

В статье приводятся результаты многократных измерений для поверхностей с различной обработкой. Полученные усредненные по фазе результаты сопоставлены с результатами рассеяния зеркальных покрытий, нанесенных на контролируемые поверхности [2].

В методе некогерентной интерферометрии, или интерференции белого света, используется двулучевой интерферометр. В таком интерферометре из излучения с широким спектром выделяются измерительная волна, отраженная от исследуемой поверхности, и опорная, оптическая длина пути которой может изменяться при управляемом перемещении опорной поверхности. Интерференционные полосы наблюдаются при равенстве оптических длин l_0 пути измерительной и опорной волн в пределах длины когерентности излучения (рис. 1). Разрешающая способность по координате z зависит от длины когерентности источника излучения [3]. Условие наблюдения интерференционной картины приведено на рис. 1, *a*.

Современные интерферометры белого света базируются на оптических схемах трех основных видов интерференционных микроскопов: Линника, Майкельсона и Захарьевского (Миро). Интерференция наблюдается на тех участках поверхности, где волновой фронт отраженной измерительной волны согласуется по кривизне с фронтом опорной волны. Поэтому метод иногда называют методом микроскопии с „корреляцией по фазе“. При использовании излучения малой когерентности осуществляется дополнительная селекция слоя по высоте в пределах длины когерентности l_k [4]:

$$l_k = \lambda_{\text{ср}}^2 / \Delta\lambda,$$

где $\lambda_{\text{ср}}$ — средняя длина волны спектра освещаемого излучения, $\Delta\lambda$ — ширина спектра на уровне 0,5.

Для излучения суперлюминесцентных диодов, которые используются в качестве источников излучения в интерферометрах белого света, $\Delta\lambda/\lambda_{\text{ср}} \approx 0,25$.

Размер локализованной области по глубине фокусировки зависит также от числовой апертуры объектива [5]:

$$\frac{d_z}{l_k} = \frac{0,4 \Delta\lambda}{A^2 \lambda_{\text{ср}}},$$

где d_z — размер области, локализованной по глубине фокусировки; A — числовая апертура объектива.

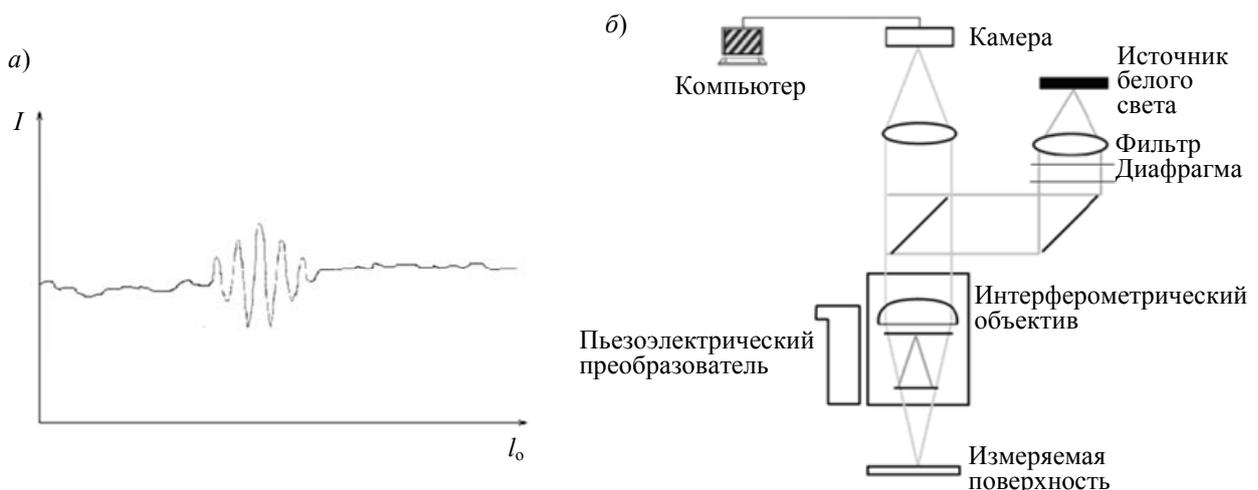


Рис. 1

Принцип действия интерференционного микроскопа New View 6200 (NV). Основной частью устройства (рис. 1, *б*) являются двулучевые интерференционные объективы Майкельсона и Миро, освещаемые источником излучения с широким спектром. В объективе излучение разделяется на измерительную волну, освещающую объект, и опорную, значение l_0

которой может изменяться при управляемом перемещении опорного отражателя. Точное определение положения максимума огибающей интерференционных полос позволяет повысить разрешающую способность по оси z до $< 0,1$ нм.

Структурная схема оптической системы NV приведена на рис. 1, б. Источник белого света — светодиод высокой интенсивности со средней длиной волны 550 нм, спектральной шириной 125 нм и длиной когерентности 2,9 мкм. Интерференция в объективах создается делением света полупрозрачным зеркалом на два луча: один отражается от внутренней высококачественной опорной поверхности, а другой — от измеряемой поверхности. Интерференция наблюдается, только когда оптическая длина пути волновых фронтов от опорной и измеряемой поверхностей одинакова. Так как прибор представляет собой интерферометр, совмещенный с микроскопом, для наблюдения интерференционной картины на экране монитора фокусное расстояние должно совпадать с оптической длиной пути от опорной плоскости. В результате интерференции между двумя волновыми фронтами формируются светлые и темные полосы. Профиль исследуемой поверхности сканируется путем вертикального перемещения объектива с помощью пьезоэлектрического преобразователя с высоколинейными емкостными датчиками. Видеосистема фиксирует значения интенсивности на каждом пикселе камеры, которые затем преобразовываются в карты высот. Длина сканирования в программе MetroPro определяет фактическую величину перемещения объектива: чем она больше, тем больше времени потребуется для сбора данных (при длине 5 мкм время сканирования 1 с [6]).

Результаты измерений среднеквадратической величины шероховатости. При проведении измерений среднеквадратической величины шероховатости (rms) прецизионных поверхностей методом интерферометрии белого света на результаты влияют многие факторы: нестабильность источника излучения, воздействие воздушных и акустических потоков, механических вибраций и т.д.

Рассмотрим результаты, полученные на интерферометрах белого света NV-6200 и CCI-2000. Результаты измерений среднеквадратической величины шероховатости ситалловой супергладкой подложки (280×210 мкм), проведенных без усреднения по фазе на оборудовании фирмы Zygo, представлены на рис. 2, а. Результаты измерений для этого же образца, выполненных на оборудовании фирмы Taylor-Hobson, приведены на рис. 2, б.

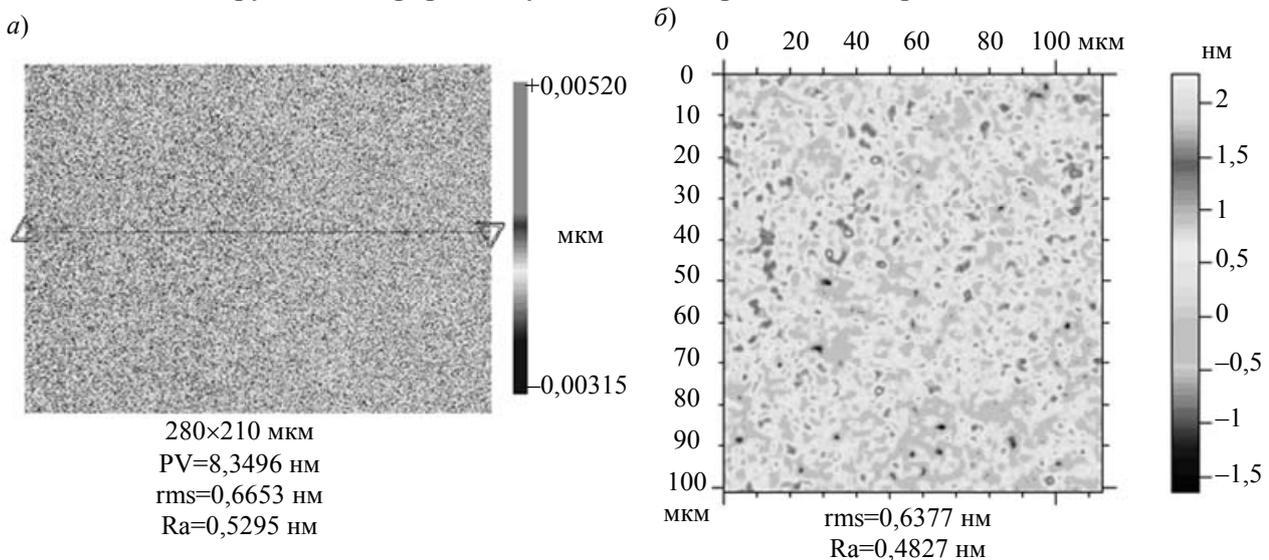


Рис. 2

Обсуждение полученных результатов. Результаты исследований показали хорошее соответствие однократных измерений (без усреднения по фазе), проведенных на оборудовании разных производителей.

Из работы [7] видно, что первостепенными задачами при измерении супергладких поверхностей являются контроль окружающей среды, проведение необходимых калибровок и создание файла, вычитающего систематическую погрешность системы.

На рис. 3 приведен профиль поверхности. Результаты измерений на NV-6200 (рис. 3, а; 30 фазовых усреднений) хорошо согласуются с результатами измерений, полученными на модернизированном контактном Stylus-профилометре TalyStep фирмы Taylor-Hobson [7].

Почему возникает разница между значениями среднеквадратической величины шероховатости, измеренными на разном оборудовании?

При измерении шероховатости супергладких поверхностей необходимо учитывать как собственные шумы системы (электронные шумы, шум датчика, небольшие нарушения в опорной поверхности), так и колебания, вызванные изменениями в окружающей среде: акустические удары, воздушные потоки, механические вибрации, изменение температуры и т.д.

В работах [4, 5] показано, что путем проведения усреднений по фазе при измерении среднеквадратической величины шероховатости можно значительно снизить случайную погрешность измерений.

Программное обеспечение MetroPro позволяет задавать число усреднений по фазе для повышения точности инструментальных измерений за счет более точного определения огибающей интерференционного сигнала. С увеличением количества усреднений возрастает время, необходимое для анализа данных. В ходе усреднений по фазе происходит многократное усреднение огибающей интерференционных полос, в результате чего уточняется шероховатость измеряемой поверхности.

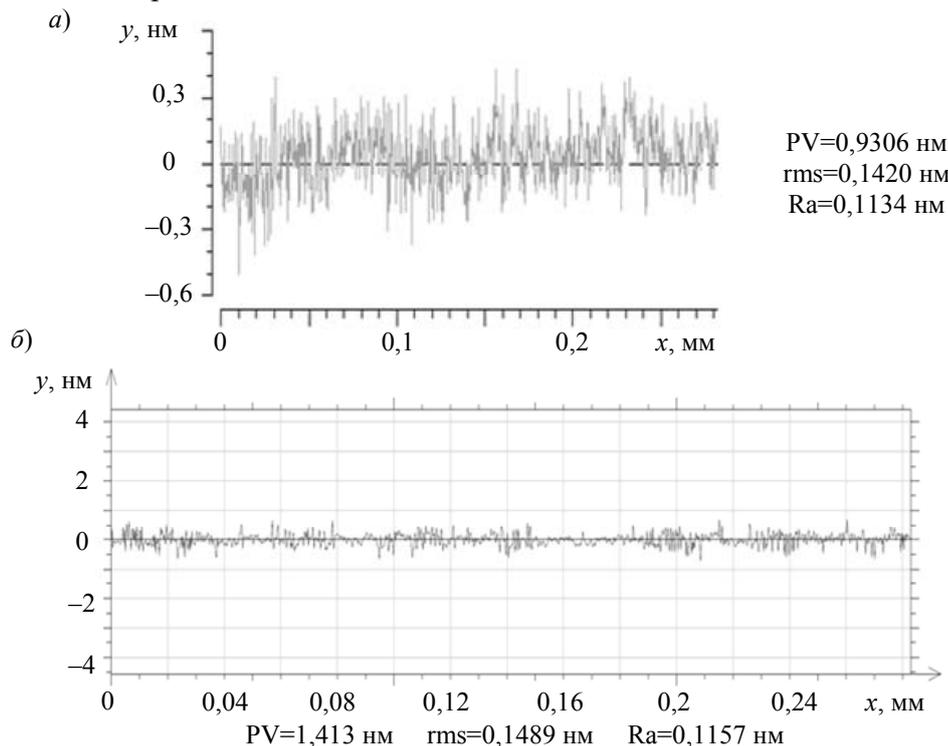


Рис. 3

На рис. 4 приведены результаты измерений шероховатости структурной и полированной поверхностей: видно, что путем многократных измерений с усреднением по фазе можно устранить влияние внешних факторов (механическую и электрическую нестабильность, акустические вибрации и воздушные потоки) и точнее прописать микротопографию поверхности. Так, при однократном измерении (для полированного образца) величина отклонений по высоте $PV \approx 4,4 \text{ нм}$, а при многократных измерениях той же поверхности с усреднением результатов измерений $PV=0,8 \text{ нм}$, при этом картина по латеральному параметру становится

более четкой. Это можно объяснить тем, что точность интерференционных измерений напрямую зависит от точности определения огибающей полос интерференции. При увеличении числа усреднений по фазе происходит многократное сканирование исследуемого участка поверхности, что позволяет значительно снизить величину случайной ошибки измерений, вызванной различными факторами. Для структурного образца с более грубой поверхностью разницы по величине rms не наблюдается, хотя происходит уменьшение PV с 61,1 до 58,6 нм.

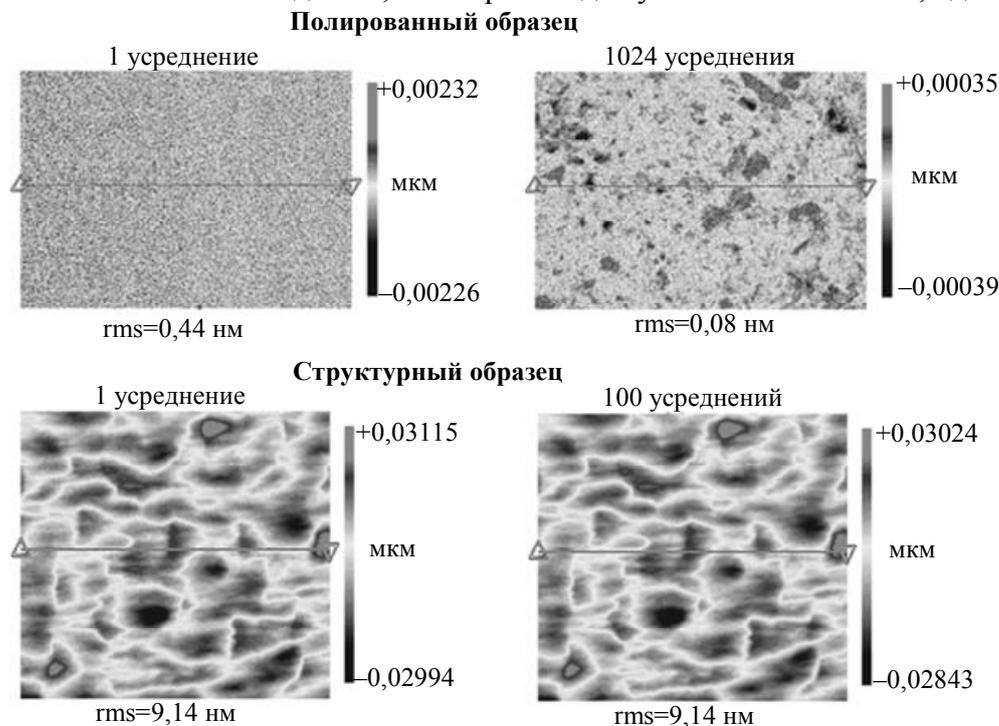


Рис. 4

Для поверхностей, среднеквадратическая величина шероховатости которых составляет десятки нанометров, уменьшения шероховатости при увеличении числа усреднений по фазе, не наблюдается, т.е. чем больше шероховатость измеряемого образца, тем меньше нужно провести измерений и усреднений по фазе для получения достоверного результата.

Заключение. При измерении величины шероховатости прецизионных оптических поверхностей с использованием метода интерференционной микроскопии можно парировать влияние собственных шумов системы, акустических воздействий и механических вибраций, непостоянство условий окружающей среды, а также систематическую погрешность измерительного устройства путем алгоритмической коррекции с использованием метода усреднения полученных данных по фазе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барышева М. М., Вайнер Ю. А., Грибков Б. А., Зорина М. В., Пестов А. Е., Рогачев Д. Н., Салащенко Н. Н., Чхало Н. И. Особенности изучения шероховатости подложек для многослойной рентгеновской оптики методами малоугловой рентгеновской рефлектометрии, атомно-силовой и интерференционной микроскопии // Изв. РАН, сер. физическая. 2011. Т. 75, № 1. С. 71—76.
2. Азарова В. В. Метрология и применение прецизионных лазерных зеркал // Матер. IX Междунар. форума „Оптические системы и технологии“ OPTICS-EXPO. 2013. С. 40—41.
3. Bowe V., Toal V. White light interferometric surface profiler // Opt. Eng. 1998. Vol. 37, N 6.
4. Азарова В. В., Цветкова Т. В. Метод некогерентной интерферометрии для контроля качества зеркал прецизионных измерительных система // Тр. 9-й Межвуз. школы. М.: МГУ, 2008. С. 95.
5. Азарова В. В., Чертович И. В., Цветкова Т. В. Интерферометрический метод контроля прецизионных поверхностей и лазерных зеркал // Тр. 1-й Всерос. школы-семинара. М.: МИЭМ, 2010. С. 209.

6. Азарова В. В., Макарова Т. С., Цветкова Т. В. Контроль топографии прецизионных оптических поверхностей методами интерферометрии // Тр. 2-й Всерос. школы-семинара. М.: МИЭМ, 2011.
7. Measuring Sub-Angstrom Surface Texture [Электронный ресурс]: <www.zygo.com>.
8. Мамцев Е. Э., Соловьева Н. М. Механическая профилометрия — экспрессный метод контроля прецизионных оптических поверхностей и лазерных зеркал // Тр. XI Межвуз. науч. школы молодых специалистов „Концентрированные потоки энергии в космической технике, электронике, экологии и медицине“. М., 2010. С. 150.

Сведения об авторах

- Валентина Васильевна Азарова** — канд. физ-мат. наук, доцент; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций; ОАО НИИ „Полус“ им. М. Ф. Стельмаха, Москва; начальник лаборатории; E-mail: azarovav@hotmail.ru
- Татьяна Владимировна Цветкова** — аспирант; Национальный исследовательский университет „Высшая школа экономики“, кафедра радиоэлектроники и телекоммуникаций; ОАО НИИ „Полус“ им. М. Ф. Стельмаха, Москва; инженер по метрологии

Рекомендована
Программным комитетом
симпозиума

Поступила в редакцию
14.12.13 г.