

УДК 681.723.26; 681.786.5

ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНТЕРФЕРЕНЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ НЕСКОЛЬКИХ ДЛИН ВОЛН

И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, Е. В. Сысоев

*Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН,
630058, г. Новосибирск, ул. Русская, 41
E-mail: uic@ngs.ru*

Предложены методы повышения достоверности интерференционных измерений нанорельефа поверхностей, содержащих резкие перепады высоты, которые приводят к неоднозначности определения фазы интерференционного сигнала. Рассмотрено влияние общей погрешности измерения на диапазон многоволновых измерений. Приведены результаты натурных экспериментов, демонстрирующие увеличение диапазона измерений нанорельефа предложенными методами в сравнении с одноволновыми измерениями.

Ключевые слова: рельеф поверхности, интерференционные измерения, частично когерентная интерферометрия, многоволновые измерения.

DOI: 10.15372/AUT20180508

Введение. Фазосдвигающая интерферометрия (PSI — Phase Shifting Interferometry) является широко распространённым инструментом для бесконтактного измерения рельефа поверхности [1–3]. Измерения с помощью PSI основаны на регистрации интерферограмм, формируемых в интерферометре пучками света, отражёнными эталонной и измеряемой поверхностями. Для определения высоты рельефа поверхности используются несколько интерферограмм с известным фазовым сдвигом и значение длины волны источника излучения. В случае когда профиль измеряемой поверхности не имеет резких перепадов по высоте, диапазон достоверных измерений высоты рельефа поверхности, контролируемых интерференционными фазосдвигающими методами, ограничен длиной когерентности источника света.

Резкое локальное изменение высоты рельефа поверхности приводит к неоднозначности определения сдвига фазы (с точностью до периода) и соответственно значения измеряемой высоты [4].

Применение методов вертикально сканирующей интерферометрии (VSI — Vertical Scanning Interferometry) [5, 6] позволяет избежать этого недостатка. Поскольку при таких измерениях происходит механическое сканирование в большом диапазоне, погрешность и разрешающая способность измерений, основанных на VSI, существенно ниже, чем при использовании фазосдвигающей интерферометрии [7].

Другой вариант преодоления неоднозначности определения высоты и увеличения диапазона PSI-измерений — применение в интерферометре дополнительных источников света с отличными от первого длинами волн. В работах [8–10] описаны системы, которые используют несколько источников света. В этом случае интерферограммы регистрируются отдельно для каждой длины волны. В [11, 12] предлагаются источник белого света и цветная камера для регистрации интерферограмм. В цветной камере перед матрицей светочувствительных элементов находится матрица RGB-светофильтров, с помощью которой извлекаются интерферограммы для соответствующих длин волн. Для восстановления высоты рельефа поверхности берутся абсолютные значения фаз, рассчитанные с использованием полученных интерферограмм, и эквивалентная длина волны, синтезируемая из

двух длин волн соответствующих источников излучения. При этом подходе для получения большего диапазона измерения длины волн должны слабо отличаться друг от друга, что повышает требования к погрешности и повторяемости измерений. Эквивалентная длина волны в расчёте значения высоты также масштабирует ошибку измерения [13]. Алгоритмы постобработки [14] позволяют снизить величину этой погрешности.

Целью данной работы является расширение диапазона достоверных измерений при использовании нескольких источников света без снижения разрешающей способности и масштабирования ошибки. Предложен метод дифференциального рельефа, основанный на разности результатов измерения, полученных с помощью двух источников света. Экспериментально показано, что его применение позволяет расширить диапазон достоверных измерений более чем в 5 раз, а добавление третьего источника света — дополнительно увеличить этот диапазон, снижая зависимость достоверности измерения от погрешности. Предложенные методы не масштабируют ошибку и позволяют сохранять разрешающую способность на уровне одноволновых измерений. Приведены результаты численных экспериментов, показывающие, что использование трёх источников света даёт возможность увеличить диапазон однозначного определения высоты на порядок по сравнению с одноволновыми фазосдвигающими измерениями. Представлены результаты измерения поверхности, содержащей ступенчатые структуры с резкими краями высотой порядка 1,2 мкм, с параметром шероховатости верхней и нижней поверхностей Sa менее 0,4 нм. Приведено сравнение результатов измерений.

Интерференционное измерение рельефа поверхности методами PSI основано на анализе интерферограмм — изображений, распределение интенсивности в которых зависит от разности длины оптического пути, проходимого светом в опорном и измерительном плечах интерферометра. Заметное влияние на интенсивность разность оказывает только тогда, когда находится в пределах длины когерентности.

Фазовое сканирование производится, например, перемещением зеркала в опорном плече интерферометра с шагом, составляющим доли длины волны света. При этом для каждой точки изображения можно построить коррелограмму — зависимость интенсивности от фазового сдвига.

При проведении экспериментов для расчёта рельефа поверхности применяется метод частичного сканирования коррелограмм [15]. Суть его состоит в сканировании небольшого (порядка 1 мкм) участка области когерентности с высокой дискретизацией (величина шага сканирования порядка единиц нанометров) и определении фазового сдвига между полученными коррелограммами. Коррелограмма в этом случае представляет собой подобие гармонической функции с 3–4 периодами и слабо меняющейся амплитудой (рис. 1). Фазовый сдвиг между двумя коррелограммами определяется по минимизации среднеквадратичного отклонения. Обе коррелограммы предварительно нормируются и при необходимости фильтруются.

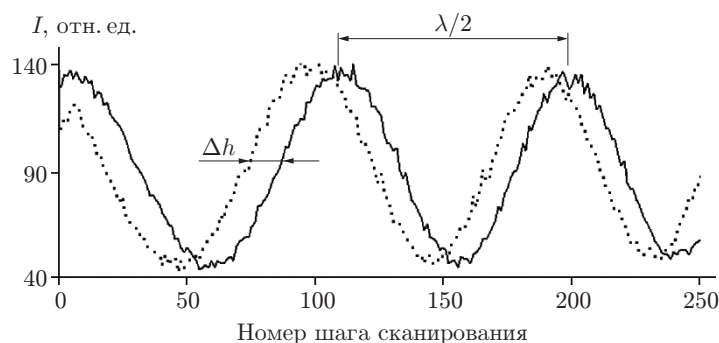


Рис. 1. Коррелограммы, соответствующие двум различным точкам поверхности

Перепад высоты рельефа для любых двух точек вычисляется, исходя из фазового сдвига между парой коррелограмм, соответствующих этим точкам, и из того, что фазовый сдвиг от одного максимума коррелограммы к другому связан с изменением разности хода между интерферирующими волнами света на половину длины волны: $\Delta h = \lambda \Delta \Phi / 4\pi$, где Δh — перепад высоты между точками, $\Delta \Phi$ — разность фаз коррелограмм, λ — эффективная длина волны используемого излучения.

Рельеф всей поверхности может быть получен путём выбора начальной точки, вычисления перепада (дифференциала) рельефа между ней и всеми остальными и последующего интегрирования с заданной высотой в начальной точке. Если высоту в начальной точке положить равной 0, то высота рельефа $h = \Delta h$.

Очевидно, что вследствие периодичности коррелограммы однозначное определение высоты рельефа будет выполняться только в диапазоне $\pm \lambda/4$, так как разность фаз коррелограмм лежит в пределах $\pm \pi$.

Преимущество метода частичного сканирования коррелограмм перед другими методами PSI состоит в низких требованиях к сканирующему устройству. В [16] показано, что при использовании пьезокерамического привода с высокой степенью нелинейности и слабой повторяемостью фазовый сдвиг между коррелограммами определяется со случайной погрешностью $\sim 10^{-4}$ периода.

Метод дифференциального рельефа. Для увеличения диапазона измерения предлагается метод дифференциального рельефа, основанный на разности двух результатов измерения (h_1 и h_2) одного и того же рельефа, полученных с помощью источников с длинами волн λ_1 и λ_2 соответственно. Для упрощения дальнейших рассуждений будем считать, что $\lambda_1 > \lambda_2$.

При измерении высоты H , большей по модулю, чем $\lambda_2/4$, возникнет разница между h_1 и h_2 . Результаты измерения будут отличаться от измеряемого значения на целое количество соответствующих полудлин волн:

$$H_1 = n_1 \lambda_1 / 2 + h_1; \quad H_2 = n_2 \lambda_2 / 2 + h_2, \quad (1)$$

где n_1 и n_2 — целые числа полудлин волн; H_1 и H_2 — значения величины H после устранения фазовой неоднозначности, отличающиеся от H только погрешностью измерений. Заметим, что $n_1 \in [-\Lambda/\lambda_1; +\Lambda/\lambda_1]$, а $n_2 \in [-\Lambda/\lambda_2; +\Lambda/\lambda_2]$, где Λ — эквивалентная длина волны:

$$\Lambda = (\lambda_1 \lambda_2) / |\lambda_1 - \lambda_2|. \quad (2)$$

Для поиска n_1 и n_2 не используется перебор по всему диапазону допустимых значений. Внутри этого диапазона на разных длинах волн может произойти одинаковое число скачков фазы: либо $n_1 = n_2$, либо $|n_2| = |n_1| + 1$, а знаки n_1 и n_2 совпадают, т. е. на меньшей длине волны скачков на один больше или столько же, сколько на большей. Если разница между модулями n_1 и n_2 превысит 1, это будет означать, что высота рельефа H по модулю превысила $\Lambda/4$, т. е. мы столкнулись с первоначальной проблемой неоднозначности определения фазы, но уже в большем масштабе.

Для нахождения n_1 и n_2 нам потребуется вычислить две вспомогательные величины: $\delta h = h_1 - h_2$, $\delta \lambda = \lambda_2 - \lambda_1$. Далее с использованием (1), считая $H_1 \approx H_2$, необходимо рассмотреть два случая:

$$1) n_1 = n_2 \Rightarrow n_1 = n_2 = 2\delta h / \delta \lambda;$$

$$2) |n_2| = |n_1| + 1:$$

$$\text{при } \delta h < -\varepsilon: n_1 = n_2 + 1 \Rightarrow n_1 = 2(\delta h - \lambda_2/2) / \delta \lambda, \quad n_2 = 2(\delta h - \lambda_1/2) / \delta \lambda \quad (n_1 \leq 0, \quad n_2 < 0);$$

$$\text{при } \delta h > +\varepsilon: n_1 = n_2 - 1 \Rightarrow n_1 = 2(\delta h + \lambda_2/2) / \delta \lambda, \quad n_2 = 2(\delta h + \lambda_1/2) / \delta \lambda \quad (n_1 \geq 0, \quad n_2 > 0);$$

при $|\delta h| \leq \varepsilon$ этот вариант невозможен.

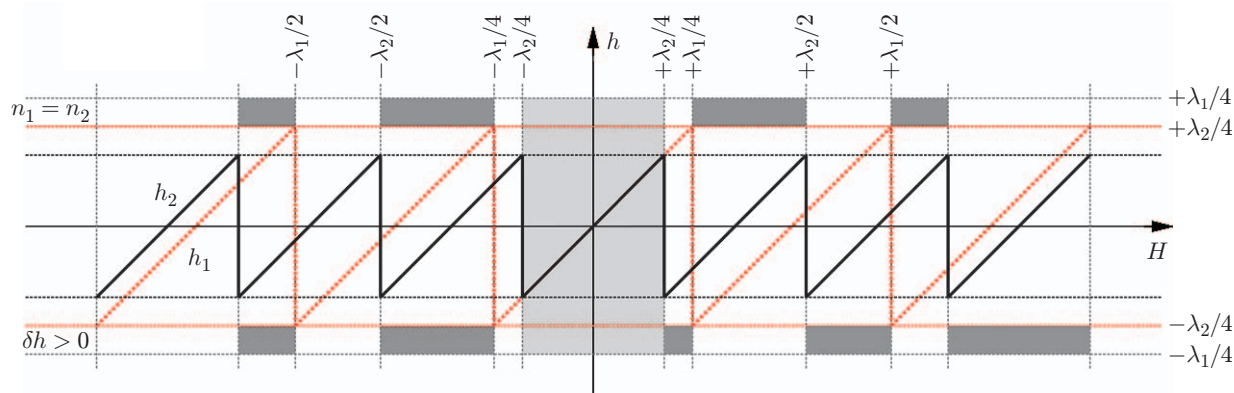


Рис. 2. Зависимость измеренной высоты от истинной при нулевой погрешности (в верхней части выделены зоны, соответствующие разным вариантам вычисления n_1 и n_2 , в нижней — положительному дифференциальному рельефу)

Здесь ε — пороговое значение, определяемое погрешностью измерения высот рельефа h_1 и h_2 , а n_1 и n_2 округляются до ближайшего целого, причём чем ближе n_1 и n_2 к истинным значениям, тем ближе их значения к целым числам.

Идеальный случай при $\varepsilon = 0$ (рис. 2): если количество фазовых скачков для разных длин волн одинаково (первый вариант), то высота H в этой точке имеет обратный с δh знак, а если на малой длине волны скачков на один больше (второй вариант), то высота H того же знака, что и δh . Когда δh близко к 0, $n_1 = n_2 = 0$.

Выбор из двух вариантов осуществляется с помощью (1) по принципу минимизации модуля разности H_1 и H_2 . Результирующая высота рельефа H_d вычисляется как среднее арифметическое H_1 и H_2 :

$$H_d = (H_1 + H_2)/2. \quad (3)$$

При использовании метода дифференциального рельефа диапазон однозначного определения высоты рельефа расширяется до $\pm\Lambda/4$, а разрешающая способность остаётся на уровне одноволновых измерений.

Трёхволновые измерения. Из выражения (2) видно, что диапазон измерений тем больше, чем ближе друг к другу значения λ_1 и λ_2 . Однако погрешность измерения, очевидно, накладывает ограничение на величину разности длин волн. Рассмотрим вариант дальнейшего увеличения диапазона не за счёт сближения длин волн двух источников света, а посредством добавления третьего источника.

В результате измерения рельефа поверхности с использованием трёх источников света получаем набор высот h_1 , h_2 и h_3 . Аналогично (1) требуется найти набор высот

$$H_i = n_i\lambda_i/2 + h_i, \quad i \in \{1, 2, 3\}, \quad (4)$$

где H_i — измеренное с помощью i -го источника света значение H после устранения фазовой неоднозначности, отличающееся от H только погрешностью измерения; n_i — целое число соответствующих полудлин волн, добавляемых для устранения неоднозначности. Также будем считать, что $\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$.

Определение правильных значений n_i проводится путём перебора значений n_3 в диапазоне $\pm N_3$ (диапазоны перебора и измерений зависят от значений длин волн и максимальной возможной ошибки измерения; алгоритм приведён далее). Используя (4), для каждого

значения n_3 находим H_3 , а значения n_1 и n_2 вычисляются из предположения равенства всех H_i :

$$n_i = 2(H_3 - h_i)/\lambda_i, \quad i \in \{1, 2\}, \quad (5)$$

при этом значения n_1 и n_2 округляются до ближайшего целого.

Условием определения правильных значений n_i , $i \in \{1, 2, 3\}$, считаем минимизацию суммы модулей парных разностей H_i :

$$|H_1 - H_2| + |H_1 - H_3| + |H_2 - H_3| \rightarrow \min, \quad (6)$$

а результирующий рельеф вычисляется через среднее арифметическое H_i .

Как и в случае метода дифференциального рельефа, разрешающая способность трёхволновых измерений остаётся на уровне одноволновых, поскольку исходные результаты h_i измерений не масштабируются.

Определение диапазона трёхволновых измерений. Диапазон измерений при трёхволновом методе предлагается вычислять, исходя из значений длин волн λ_i , $i \in \{1, 2, 3\}$, и максимальной погрешности измерения ε . Рассмотрим поведение значения h_i в зависимости от высоты H . При отсутствии погрешности измерений ($\varepsilon = 0$) значения h_i представляют собой «пилу» (см. рис. 2) с периодом $\lambda_i/2$ и амплитудой $\lambda_i/4$. Разность высот h_1 и h_2 (равно как и любых двух других) будет постоянна на интервалах, лежащих между скачками фазы этих функций. Аналогично сумма модулей из (6), которую мы минимизируем, будет постоянна на интервалах, лежащих между скачками всех трёх функций h_i .

Требуется найти диапазон, внутри которого возникнет неоднозначность определения n_i , т. е. когда значения n_i , полученные из (4), дадут сумму (6), не отличимую с точностью до погрешности от начального интервала ($n_i = 0$). Это возможно, когда максимальная разность в сумме (6) станет меньше 4ε , т. е. если мы не сможем отличить лучшую разность рельефов от допустимой при $n_i = 0$.

Формально алгоритм расчёта диапазона измерений имеет следующий вид:

Шаг 1. Инициализация: начальные значения n_i , $i \in \{1, 2, 3\}$, равны 0.

Шаг 2. Поиск начала следующего интервала: находим значение m , для которого $n_m\lambda_m/2 + \lambda_m/4 = \min\{n_i\lambda_i/2 + \lambda_i/4 \mid i \in \{1, 2, 3\}\}$; находим начальную высоту интервала $H_m = n_m\lambda_m/2 + \lambda_m/4$; значение n_m инкрементируем на 1.

Шаг 3. Определение максимального модуля разности: вычисляем $h_i = H_m - n_i\lambda_i/2$, $i \in \{1, 2, 3\}$; находим $\Delta = \max\{|h_i - h_j| \mid i, j \in \{1, 2, 3\}, i < j\}$; если $\Delta \leq 4\varepsilon$ или H_m больше минимальной длины когерентности, то переходим к шагу 4, иначе переходим к шагу 2.

Шаг 4. Диапазон определён: диапазон измерений H_m ; диапазон перебора $N_3 = n_3 - 1$, если $m = 3$, иначе $N_3 = n_3$.

Проведённые по описанному алгоритму вычисления показали, что величина диапазона измерений рельефа поверхности в трёхволновом режиме ($\lambda_1 = 629,39$ нм, $\lambda_2 = 534,47$ нм и $\lambda_3 = 467,18$ нм) при ошибке измерения до $\pm 4,8$ нм значительно превышает диапазон в двухволновом режиме. Диапазон измерений ограничивается длиной когерентности, минимальной из используемых источников излучения. В нашем случае для применяемых в натуральных экспериментах светодиодов эта величина имеет значение ~ 7 мкм. При ошибке от $\pm 4,8$ нм до $\pm 15,4$ нм величина диапазона измерений в трёхволновом режиме соответствует диапазону двухволнового режима ($\lambda_1 = 534,47$ нм, $\lambda_2 = 467,18$ нм), вычисляемого по формуле эквивалентной длины волны Λ (2). Когда ошибка измерений составляет величину больше $\pm 15,4$ нм, диапазон трёхволнового режима становится меньше $\pm \Lambda/4$.

Натурные эксперименты. Апробирование предложенных методов измерения с использованием двух и трёх источников излучения проводилось на натурных экспериментах с помощью интерференционного микроскопа МНП-1 [17] с тремя источниками света. Для ввода излучения в интерферометр применялось смешанное световолокно. Схематическое изображение микроскопа показано на рис. 3.

В качестве источников излучения взяты три светодиода с длинами волн $\lambda_1 = 629,39$ нм, $\lambda_2 = 534,47$ нм и $\lambda_3 = 467,18$ нм, измеренными на коммерческом спектрометре. Определение значений эффективных длин волн светодиодов при использовании их в оптической системе интерферометра осуществлялось с помощью процедуры привязки длины волны каждого светодиода к близкой длине волны лазерного излучения [18]. Для этого МНП-1 применялся в режиме фурье-спектрометра. В данном случае участвовали три лазера: для первого светодиода привязка выполнялась к спектру He—Ne-лазера с $\lambda = 633$ нм, для второго — к спектру лазерной указки с $\lambda = 532$ нм, для третьего — к спектру лазера ДНОМ с $\lambda = 473$ нм. В результате привязки были получены следующие значения длин волн светодиодов: $\lambda_1 = 630,23$ нм, $\lambda_2 = 530,11$ нм и $\lambda_3 = 467,7$ нм.

В диапазоне сканирования порядка 1 мкм для каждого из источников света регистрировалось 256 интерферограмм. На каждом шаге процесса сканирования сохранялись три интерферограммы (каждая для соответствующего источника света). В отличие от однократных измерений, проведённых отдельно друг от друга для каждой длины волны, измерение, выполненное таким образом, позволило избежать возможных ошибок, связанных с отсутствием повторяемости (гистерезис) пьезокерамического актюатора и изменениями внешних условий.

Представленные далее результаты измерений на МНП-1 с применением предложенных методов в двухволновом и трёхволновом режимах сопровождаются результатами измерений, выполненных на коммерческом интерференционном микроскопе.

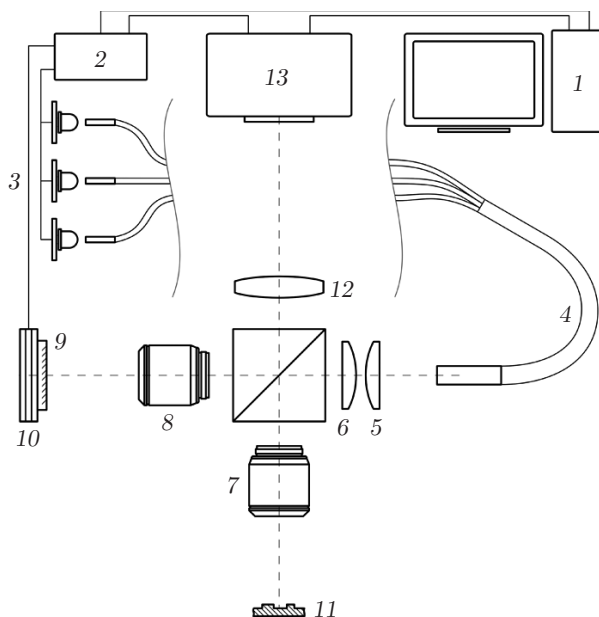


Рис. 3. Схема интерференционного микроскопа МНП-1 с тремя источниками света: 1 — компьютер, 2 — электронный блок, 3 — три источника излучения, 4 — смешанное световолокно, 5 — объектив осветителя, 6 — светоделительный кубик, 7, 8 — микрообъективы с идентичным увеличением, 9 — оптическое плоское опорное зеркало, 10 — пьезокерамический актюатор, 11 — объект измерения, 12 — тубусная линза, 13 — ПЗС-камера

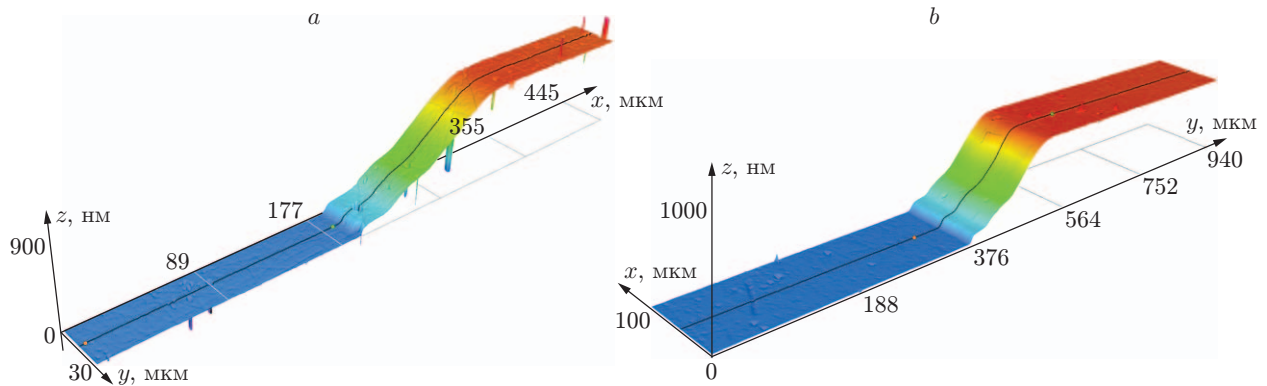


Рис. 4. Результаты измерений образца с плавным изменением высоты профиля (высота структуры $\sim 0,9$ мкм): *a* — выполнены на МНП-1 в двухволновом режиме, *b* — на коммерческом микроскопе

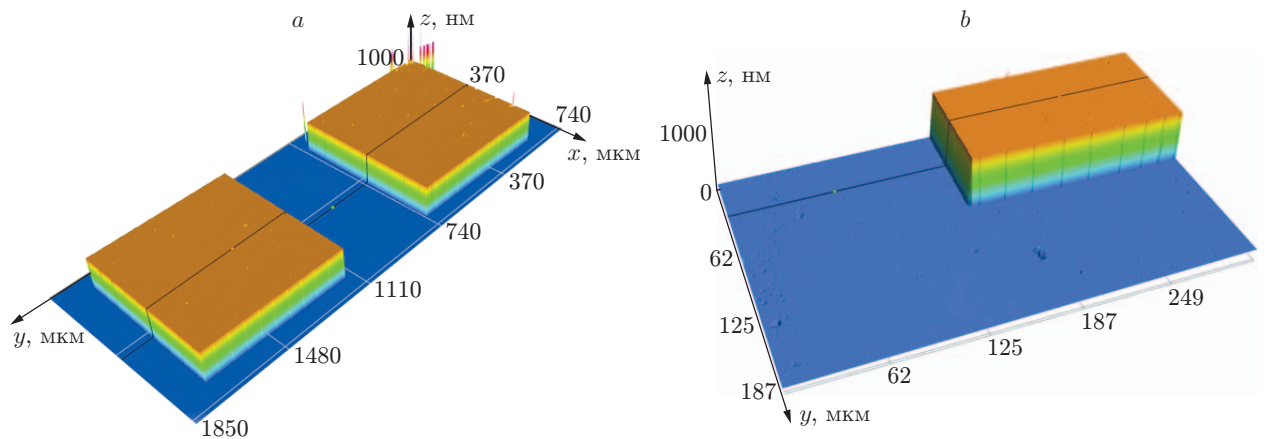


Рис. 5. Результаты измерений образца с высотой профиля структуры $\sim 1,2$ мкм: *a* — выполнены на МНП-1, *b* — на коммерческом микроскопе

На рис. 4 приведены результаты измерений образца, на поверхности которого находится ступенька с плавным изменением высоты профиля. Высота профиля на рис. 4, *a* приблизительно равна 851 нм, а на рис. 4, *b* — порядка 854 нм.

На рис. 5, *a* представлены результаты измерений образца, содержащего ступенчатую структуру с резким краем. Высота профиля ступенчатой структуры, определённая по распределению высот, равна 1265,9 нм. На рис. 5, *b* показан результат измерения на коммерческом интерференционном микроскопе. Высота профиля в данном случае равна 1275,6 нм.

Представленные результаты показывают, что использование предложенных методов повышения достоверности измерений позволило увеличить их диапазон в несколько раз. Для метода дифференциального рельефа диапазон достоверного измерения высоты рельефа увеличился от ± 157 до ± 993 нм, т. е. более чем в 5 раз.

Использование трёхволнового метода дало возможность измерить рельеф поверхности с перепадом высот $\sim 1,2$ мкм. Результаты сравнительных измерений подтверждают правильность разрешения неоднозначности фазового сдвига представленными методами.

Заключение. В данной работе предложен метод измерения рельефа поверхности, основанный на разности результатов измерения на различных длинах волн — метод дифференциального рельефа. Экспериментально показано, что этот метод позволяет расширить

диапазон измерения высоты рельефа более чем в 5 раз без снижения разрешающей способности измерений. Также предложен трёхволновой метод измерения рельефа поверхности, расширяющий диапазон достоверных измерений рельефа поверхности. Представлен алгоритм расчёта диапазона измерения по заданным длинам волн используемых источников света и величине максимальной погрешности измерения. На численных экспериментах показано, что при низкой погрешности измерений (менее $\pm 4,8$ нм) применение трёхволнового метода расширяет диапазон измерения высоты рельефа от ± 157 нм до ± 7 мкм.

Результаты натуральных экспериментов подтверждены сравнительными измерениями на коммерческом оборудовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. O'Mahony C., Hill M., Brunet M. et al. Characterization of micromechanical structures using white-light interferometry // *Meas. Sci. Technol.* 2003. **14**, N 10. P. 1807–1814.
2. Guo T., Ma L., Chen J. P. et al. MEMS surface characterization based on white light phase shifting interferometry // *Opt. Eng.* 2011. **50**, N 5. 053606.
3. Вишняков Г. Н., Левин Г. Г., Минаев В. Л. Автоматизированные интерференционные приборы ВНИИОФИ // *Автометрия.* 2017. **53**, № 5. С. 131–138.
4. Leach R. *Optical Measurement of Surface Topography.* Berlin — Heidelberg: Springer, 2011. 318 p.
5. Lehmann P., Tereschenko S., Xie W. Fundamental aspects of resolution and precision in vertical scanning white-light interferometry // *Surf. Topogr.: Metrol. Prop.* 2016. **4**, N 4. 024004.
6. Сысоев Е. В., Голубев И. В., Чугуй Ю. В., Шахматов В. А. Измерение локальных отклонений профиля поверхности на основе интерференции частично когерентного света // *Автометрия.* 2004. **40**, № 5. С. 4–13.
7. Harasaki A., Schmit J., Wyant J. C. Improved vertical-scanning interferometry // *Appl. Opt.* 2000. **39**, N 13. P. 2107–2115.
8. Kumar P. U., Bhaduri B., Kothiyal M. P., Mohan N. K. Two-wavelength micro-interferometry for 3-D surface profiling // *Opt. and Lasers Eng.* 2009. **47**, N 2. P. 223–229.
9. Meiners-Hagen K., Schödel R., Pollinger F., Abou-Zeid A. Multi-wavelength interferometry for length measurements using diode lasers // *Meas. Sci. Rev.* 2009. **9**, N 1. P. 16–26.
10. Abdelsalam D. G., Daesuk K. Two-wavelength in-line phase-shifting interferometry based on polarizing separation for accurate surface profiling // *Appl. Opt.* 2011. **50**, N 33. P. 6153–6161.
11. Kumar P. U., Haifeng W., Mohan N. K., Kothiyal M. P. White light interferometry for surface profiling with a colour CCD // *Opt. and Lasers Eng.* 2012. **50**, N 8. P. 1084–1088.
12. Guo T., Li F., Chen J. et al. Multi-wavelength phase-shifting interferometry for micro-structures measurement based on color image processing in white light interference // *Opt. and Lasers Eng.* 2016. **82**. P. 41–47.
13. Song L., Dong X., Xi J. et al. A new phase unwrapping algorithm based on three wavelength phase shift profilometry method // *Opt. and Laser Technol.* 2013. **45**. P. 319–329.
14. Xiong J., Zhong L., Liu S. et al. Improved phase retrieval method of dual-wavelength interferometry based on a shorter synthetic-wavelength // *Opt. Exp.* 2017. **25**, N 7. P. 7181–7191.
15. Сысоев Е. В. Метод частичного сканирования коррелограмм для измерения микрорельефа поверхностей // *Автометрия.* 2007. **43**, № 1. С. 107–115.

16. Sysoev E. V., Kosolobov S. S., Kulikov R. V. et al. Interferometric surface relief measurements with subnano/picometer height resolution // Meas. Sci. Rev. 2017. **17**, N 5. P. 213–218.
17. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В. и др. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. 2010. **46**, № 2. С. 119–128.
18. Сысоев Е. В., Выхристюк И. А., Куликов Р. В., Широков В. В. Определение эффективной длины волны источника света в интерференционном профилометре // Сб. матер. XI Междунар. науч. конгр. «Интерэкспо Гео-Сибирь-2015». Новосибирск, 2015. Т. 2. С. 39–43.

Поступила в редакцию 14 июня 2018 г.
