

УВЕЛИЧЕНИЕ РАЗРЕШАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ПОПЕРЕЧНЫХ РАЗМЕРОВ СТУПЕНЧАТЫХ НАНОРЕЛЬЕФНЫХ СТРУКТУР

Игнат Александрович Выхристюк

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, зав. лабораторией, тел. (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Родион Владимирович Куликов

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Евгений Владимирович Сысоев

Конструкторско-технологический институт научного приборостроения СО РАН, 630058, Россия, г. Новосибирск, ул. Русская, 41, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник, тел. (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

Известно, что методы фазосдвигающей интерферометрии позволяют достичь продольного разрешения до $\sim 0,1$ нм, но значение поперечного разрешения остается на уровне ~ 1 мкм. Для обеспечения высокого поперечного разрешения линейных измерений в интерференционном профилометре было предложено использовать датчик определения положения резкого края. Принцип работы датчика основан на регистрации интенсивности лазерного пятна, рассеянного поверхностью измеряемого образца при смещении образца в поперечном направлении. Описан процесс измерения и представлены экспериментальные результаты. Объединение результатов измерений, выполненных профилометром и датчиком определения положения резкого края, позволяет повысить разрешающую способность измерений расстояния между резкими краями на реконструированном нанорельефе поверхности.

Ключевые слова: измерение нанорельефа, интерференционная профилометрия, обнаружение резкого края, поперечное разрешение.

IMPROVEMENT OF LATERAL RESOLUTION UNDER DIMENSIONAL MEASUREMENTS OF NANORELIEF STEP STRUCTURES

Ignat A. Vykhristyuk

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Head of Laboratory, phone: (383)306-62-12, e-mail: uic@ngs.ru

Rodion V. Kulikov

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Researcher, phone: (383)306-62-12, e-mail: rstalcker@ngs.ru

Evgeny V. Sysoev

Technological Design Institute of Scientific Instrument Engineering SB RAS, 41, Russkaya St., Novosibirsk, 630058, Russia, Leading Researcher, phone: (383)306-62-12, e-mail: evsml@mail.ru

The phase shifting interferometry methods allow to reach longitudinal resolution up to ~ 0.1 nm, but value of lateral resolution remains on level of ~ 1 μ m. For providing of high lateral

resolution of linear measurements in the interference microscope profilometer it was proposed to use the sensor of sharp-edge position detection. Principle of sensor's measurement is based on registration of laser spot intensity scattered by the measurement sample surface under displacement of sample in the lateral direction. Measurement process and experimental results are presented. The combining of measurement results performed by the profilometer and the sensor of sharp-edge position detection can allow to increase the resolution of measurement of distance between sharp edges on the reconstructed surface nanorelief.

Key words: nanoscale measurement, interferometer, edge detection, lateral resolution.

Введение

Современные оптические интерференционные профилометры имеют высокое продольное разрешение [1–3]. Предельное разрешение по высоте, подтвержденное экспериментально, составляет менее 30 пм [4, 5]. Однако поперечное разрешение ограничено дифракционным пределом [6]. В последнее время измерительные технологии требуют гораздо более высокого поперечного разрешения [7–10]. Эта проблема возникает, например, при измерении шага периодических структур [11, 12]. Одним из способов улучшения поперечного разрешения является высокоточное определение положения резкого края рельефа трехмерной поверхности [13]. Для решения этой проблемы в работе [14] был предложен датчик, позволяющий определять положение резкого края с разрешением 1 нм.

В предыдущей работе авторов [15] было показано, что объединение в общей схеме интерферометра Линника и датчика обнаружения резкого края позволяет надежно совмещать результаты их измерения. Тем не менее разрешающая способность проведенных измерений не позволила говорить о существенном улучшении поперечного разрешения.

В данной работе авторы автоматизировали процесс определения положения резкого края, существенно повысив разрешающую способность измерений. 3D рельеф поверхности измерялся на микроскопе-нанопрофилометре МНП-1 [16], выполненном по схеме интерферометра Линника, с применением метода частичного сканирования корелограмм [17]. Экспериментальные результаты и показали, что применение метода определения положения резкого края позволяет измерять поперечные линейные размеры в 3D рельефе, измеренном оптическим интерференционным профилометром, лучше, чем позволяет дифракционный предел.

Метод определения поперечных размеров в 3D рельефе

Предлагаемый метод заключается в последовательном проведении двух измерений. Вначале измеряется рельеф поверхности, содержащей наноструктуры с резкими перепадами высоты. Затем расстояние между двумя перепадами измеряется с применением метода обнаружения резкого края, описанного в работе [14].

Суть метода обнаружения резкого края заключается в следующем. На поверхности объекта фокусируется лазерное пятно. При помощи фотоприемника регистрируется суммарное значение отраженной интенсивности лазерного пятна в текущем положении объекта измерения. Если при перемещении объекта в поперечном направлении резкий край структуры поверхности окажется в пятне лазера, часть излучения не попадет на фотоприемник и суммарная интенсивность уменьшится. При прохождении края через центр пятна на фотоприемнике будет регистрироваться локальный минимум интенсивности. Утверждается, что применение данного метода позволяет определять положение резкого края с разрешением до 1 нм.

Экспериментальная установка

На рис. 1 показана экспериментальная установка, на которой проводились измерения. Основной частью этой установки является оптический интерференционный микроскоп-нанопрофилометр МНП-1. В интерферометр МНП-1 добавлен дополнительный оптический канал регистрации с фотодиодом FD256, а также дополнительный источник света – лазер Linos HeNe.

В качестве источника излучения в интерферометре используется светодиод с эффективной длиной волны $\lambda = 629,39$ нм. Определение значения эффективной длины волны светодиода при использовании его в оптической системе интерферометра выполнялось при помощи процедуры привязки [18] к длине волны монохроматического источника света.

В качестве микрообъективов с одинаковым увеличением в интерферометре были использованы объективы Olympus MPLFLN 20^x NA 0,45. Для регистрации интерферограмм использовалась ПЗС-камера Imperx CCD B2020M.

При измерении 3D рельефа поверхности методом частичного сканирования корелограмм [17] сканирование фазы производится перемещением опорного зеркала в опорном плече интерферометра на расстояние ~ 1 мкм с шагом ~ 4 мкм.

Объект измерения – калибр высоты 880Å QC 88 VLSI (рис. 2) содержит положительную ступеньку по высоте шириной 100 мкм и высотой 88 нм. Края ступеньки являются резкими для оптического разрешения.

Объект измерения располагается на моторизованном столике Linos MS30 с пьезоэлектрическим инерционным приводом. Смещение объекта измерения при определении положения резкого края производится в поперечном направлении с шагом $\sim 28,5$ нм.

На рис. 2 приведена интерферограмма объекта измерения, полученная на МНП-1. Красным прямоугольником отмечена область, в которой проводились измерения.

3D-модель восстановленного рельефа поверхности, графики сечения и распределения высот показаны на рис. 3.

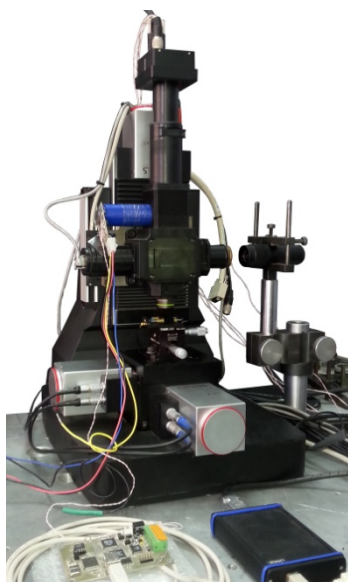


Рис. 1. Экспериментальная установка: МНП-1 с дополнительным оптическим каналом регистрации и источником света

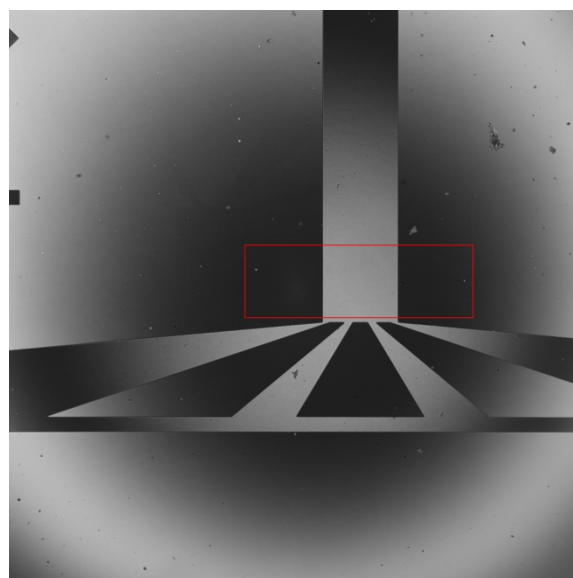


Рис. 2. Интерферограмма фрагмента поверхности калибра 880\AA QC 88 VLSI в зоне измерения МНП-1

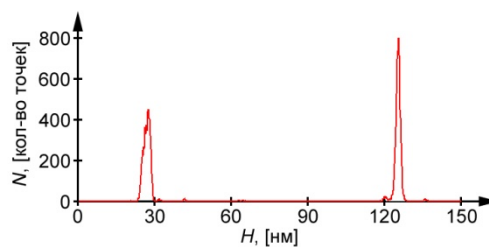
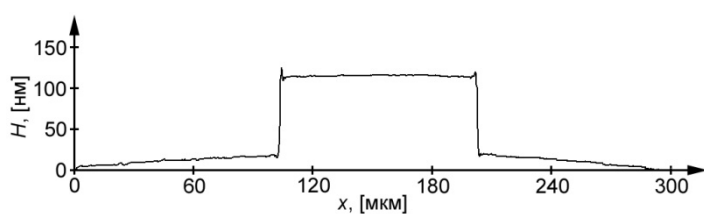
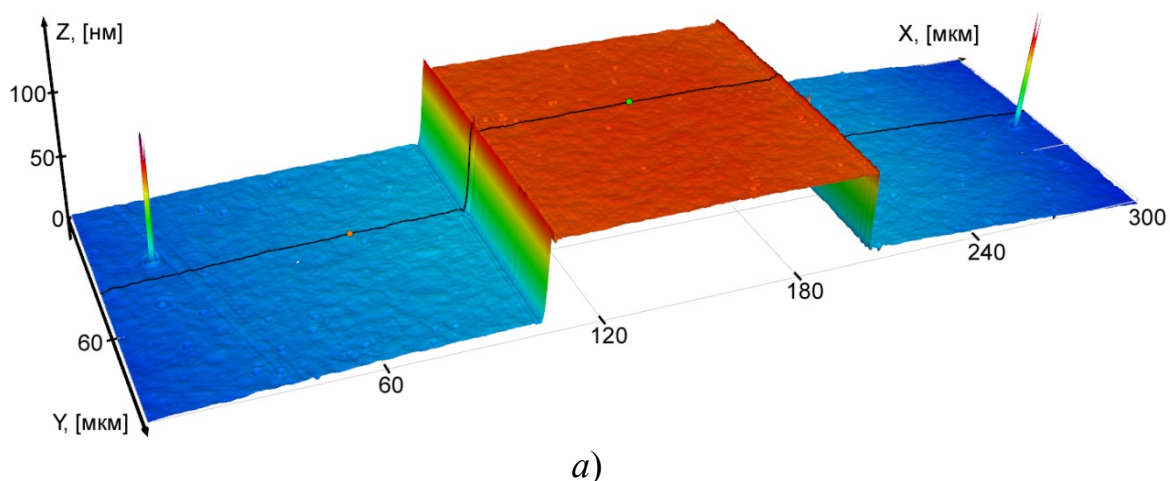


Рис. 3. Результат измерения 3D рельефа поверхности, полученный с помощью МНП-1:

а) 3D модель поверхности восстановленного рельефа; б) график сечения модели поверхности; в) график распределения высот

Высота ступеньки, измеренная по графику распределения высот, составляет 98 нм. Ширина ступеньки, измеренная на половине высоты рельефа поверхности, составляет 98,94 мкм. Поперечные координаты измеренного рельефа поверхности рассчитываются на основе размера пикселя в области измерения. В системе размер проекции пикселя составляет 369 нм.

При оптических измерениях поперечное разрешение ограничено дифракционным пределом. Для микрообъективов, используемых в экспериментальной установке, и применяемого источника света дифракционный предел составляет 0,854 мкм. В работе [19] в качестве критерия оценки поперечного разрешения при измерении 3D рельефа предложено использовать ширину максимума производной функции высоты рельефа. В полученном результате измерения ширина максимума производной функции сечения в области края ступеньки составляет 0,7 мкм.

Для измерения ширины ступеньки при помощи датчика определения положения резкого края производилось сканирование объекта измерения в поперечном направлении с шагом $\sim 28,5$ нм. Полученные распределения интенсивности в зависимости от шага сканирования показаны на рис. 4.

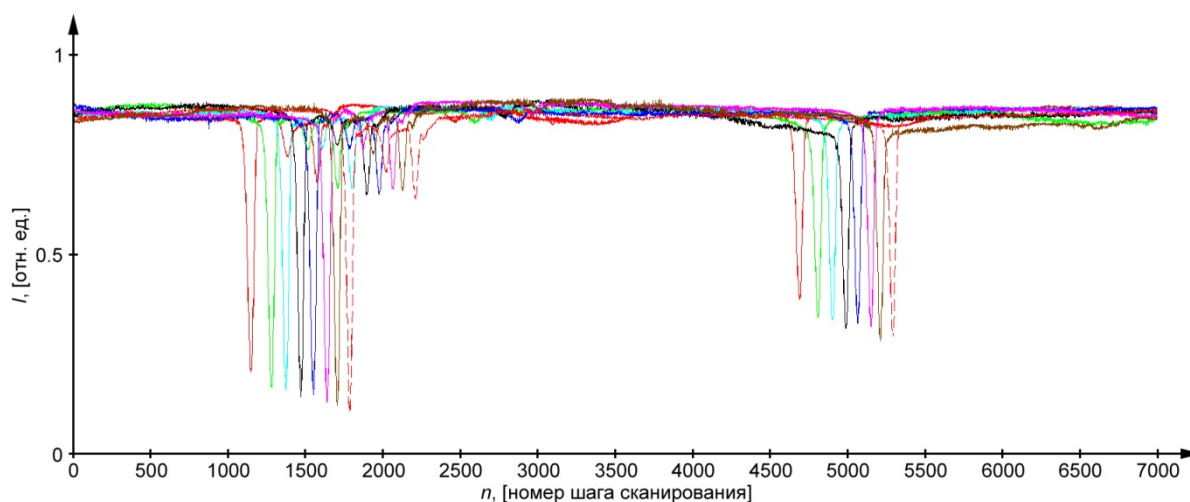


Рис. 4. Распределение интенсивности: положение двух резких краев

Процесс сканирования выполнялся несколько раз. На рис. 4 показаны несколько графиков распределения интенсивности лазерного пятна в зависимости от положения объекта в зоне измерения. Они четко показывают два минимума, которые соответствуют краям ступеньки на объекте измерения. Среднее значение измеренной ширины ступеньки составило 100,18 мкм, среднеквадратичное отклонение – 0,243 нм.

На графике, приведенном на рис. 5, представлена часть распределения интенсивности, соответствующая прохождению края ступеньки через лазерное пятно. Положение края ступеньки определяется с разрешением, превосходящим дифракционный предел.

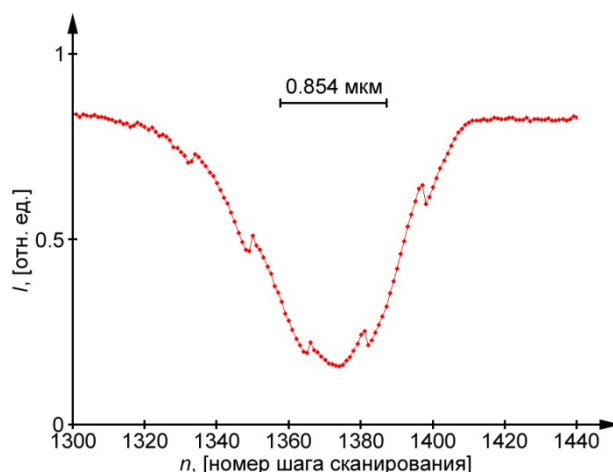


Рис. 5. Распределение интенсивности: область минимума

Обсуждение

Анализируя результаты измерения 3D рельефа можно обратить внимание на выгнутость модели поверхности. Вероятно, что это результат влияния аппаратной фазовой функции профилометра [20]. Измеренная высота ступеньки составила 98 нм, хотя калибр по номиналу имеет ступеньку высотой 88 нм. Причиной такого расхождения может быть плохое качество поверхности используемого калибра.

При многократном измерении положения резкого края наблюдалось отсутствие повторяемости абсолютного положения каждого из краев (рис. 4). На детальном графике минимума интенсивности (рис. 5) видны периодические скачки интенсивности. Оба эти явления могут быть следствием особенности поведения пьезопривода и отсутствием обратной связи.

Заключение

Предложен метод повышения разрешающей способности линейных измерений в оптическом интерференционном микроскопе.

Было показано совмещение результатов измерений, полученных в экспериментальной установке с помощью интерференционного микроскопа и датчика обнаружения резкого края.

Применение метода определения положения резкого края позволяет измерять расстояние между резкими перепадами высоты рельефа, измеренного оптическим интерференционным профилометром, лучше, чем позволяет дифракционный предел.

Реализация профилометра по предложенной схеме открывает новые возможности использования интерференционных микроскопов при измерениях структурированных поверхностей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Peter de Groot Phase Shifting Interferometry // Optical Measurement of Surface Topography. – 2011. – P. 167–186.
2. Leach R. Optical Measurement of Surface Topography. Springer, 2011. – P. 167–174.
3. Hosseini P, Zhou R, Kim YH, et al. Pushing phase and amplitude sensitivity limits in interferometric microscopy // Opt. Lett. – 2016. – 41 (7):1656–1659. doi:10.1364/OL.41.001656.
4. Sysoev E. V., Kosolobov S. S., Kulikov R. V., Latyshev A. V., Simikov S. V., Vykhristuk I. A. Precision measurements of subnanoscaled relief by interferometric method // ISMTII-2013. 11-th International Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments (Germany, Aachen, 1–5 July, 2013). – P. 170.
5. Sysoev E. V., Kosolobov S. S., Kulikov R. V., Latyshev A. V., Sitnikov S. V., Vykhristyuk I. A. Interferometric Surface Relief Measurements with Subnano/Picometer Height Resolution // Measurement Science Review. – 2017. – 17, N. 5. – P. 213–218.
6. Riedl M. Optical Design Fundamentals for Infrared Systems, Second Edition. SPIE Press. Bellingham, WA, 2001.
7. Huebner U., Morgenroth W., Boucher R., Meyer M., Mirande W., Buhr E., Ehret G., Dai G., Dziomba T., Hildt R., Fries T. A nanoscale linewidth/pitch standard for high-resolution optical microscopy and other microscopic techniques // Measurement Science Technology. – 2006. – N. 17. – P. 1–8.
8. Chen L.-C., Nguyen X.-L., Ho H.-W. High-speed 3-D machine vision employing Fourier Transform Profilometry with digital tilting-fringe projection // Proceedings of the 2008 IEEE Workshop on Advanced robotics and Its Social Impacts, Taipei, Taiwan, 23–25 August 2008. – P. 1–6.
9. Chen Liang-Chia, Duong Duc-Hieu & Chen Chin-Sheng. Optical 3-D Profilometry for Measuring Semiconductor Wafer Surfaces with Extremely Variant Reflectivities // Applied Sciences. – 2019. – 9. – 2060. 10.3390/app9102060.
10. Chen L.-C., Hai H. H. Fourier transform profilometry employing novel orthogonal elliptic band-pass filtering for accurate 3-D surface reconstruction // Precis. Eng. – 2014. – 38. – P. 512–524.
11. Xiao D., Tong-Bao L., Li-Hua L., Yan M., Rui M., Jun-Jing W., Yuan L. Fabrication and measurement of traceable pitch standard with a big area at trans-scale // Chinese Physics B. – 2014. Vol. 23, No. 9. – P. 090601-1–090601-5.
12. Su Wei-Xiang, Wu Chun-Yin & Lee Yung-Chun. Anti-reflection nano-structures fabricated on curved surface of glass lens based on metal contact printing lithography // Microelectronic Engineering. – 2019. 214. 10.1016/j.mee.2019.04.017.
13. Fang Yi-Chin, Tzeng Yih-fong, Wu Kuo-Ying, Tsay Ho-Lin & Lin Po-Ming. Measurement and analysis of modulation transfer function of digital image sensors // Microsystem Technologies. – 2019. 10.1007/s00542-019-04493-1.
14. Fan K.-C., Zhang K., Zhang Y.-L., Zhang Q. Development of a non-contact focusing probe for the measurement of micro cavities // International Journal of Automation Technology. – 2013. – Vol. 7, No. 2. – P. 156–162.
15. Высокоточные поперечные линейные измерения в оптическом интерференционном микроскопе / Е. В. Сысоев, Р. В. Куликов, Х. Х. Хай, Ю. В. Чугуй, И. А. Выхристук, Л.-Ч. Чень, К.-Ч. Фань // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015»: сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 56–61.
16. Сысоев Е. В., Выхристук И. А., Куликов Р. В., Поташников А. К., Разум В. А., Степнов Л. М. Интерференционный микроскоп-профилометр // Автометрия. – 2010. – 46, № 2. – С. 119–128.
17. Сысоев Е. В. Метод частичного сканирования коррелограмм для измерения микро-рельефа поверхностей // Автометрия. – 2007. – 43, № 1. – С. 107–115.

18. Определение эффективной длины волны источника света в интерференционном профилометре / Е. В. Сысоев, И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, В. В. Широков // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «СибОптика-2015» : сб. материалов в 3 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. Т. 2. – С. 39–43.

19. Левин Г. Г., Вишняков Г. Н., Моисеев Н. Н., Минаев В. Л. О латеральном разрешении интерференционного микроскопа // Измерительная техника. – 2013. – № 5. – С. 16–19.

20. Hariharan P. Optical Interferometry – 2-nd ed. Elsevier, 2003. – P. 157.

© И. А. Выхристюк, Р. В. Куликов, Е. В. Сысоев, 2019