

УДК 62.91

## ТРЁХМЕРНАЯ КООРДИНАТНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ МАШИНА С РАЗРЕШЕНИЕМ 0,1 нм

Г. Егер

*Ilmenau University of Technology, Institute of Process Measurement and Sensor Technology,  
PO Box 100 565, 98684 Ilmenau, Germany  
E-mail: gerd.jaeger@tu-ilmenau.de*

Описывается нанометрология на основе нанопозиционирующей машины со встроенными нанозондами. Представлен принцип работы высокоточной (в большом объёме) 3D нанопозиционирующей и наноизмерительной машины (NMM-1) с пространственным разрешением 0,1 нм и диапазоном позиционирования и измерений  $25 \times 25 \times 5$  мм. В неё интегрированы различные нанозонды, включая датчики фокуса и белого света, а также тактильные нанозонды. Измерение и управление с шестью степенями свободы обеспечиваются одно-, двух- и трёхлучевыми интерферометрами, встроенными в машину NMM-1. Представлены результаты измерений.

*Ключевые слова:* машина NMM-1, свободная от ошибки Аббе конструкция, нанозонды.

**Введение.** Разработка физических стандартов для ширин, ступенчатых высот и поверхностей структур имеет большое значение для освоения высоких технологий. Одной из важных задач в настоящее время является определение отклонений от формы, волнистости и шероховатости объектов в микро- и нанодиапазоне. Другая задача в нанометрологии — измерение оптических и механических прецизионных деталей с нанометрической точностью. В качестве известных примеров отметим измерение асферических поверхностей, поверхностей произвольной формы, а также определение характеристик микрооптики, прецизионных матриц, кольцевых мер, микрошестерёнок, небольших отверстий и т. д.

Для успешного решения вышеуказанных проблем требуется создание эффективных машин для нанопозиционирования в большом рабочем поле, а также для наноизмерений на основе встроенных нанозондов. Такая нанопозиционирующая и наноизмерительная машина NMM-1 разработана в Институте измерения процессов и сенсорных технологий при Технологическом университете г. Ильменау (Германия) [1] и произведена фирмой "SIOS Messtechnik GmbH" (г. Ильменау, Германия). В наноизмерительной машине реализован режим сканирования образца в диапазоне  $25 \times 25 \times 5$  мм с разрешением 0,1 нм. Неопределённость измерений составляет около 3 нм.

В данной работе представлен принцип функционирования наноизмерительной машины, обсуждаются достигнутые высокие технические характеристики. Измерение и управление 3D нанопозиционирующей платформой с шестью степенями свободы в наноизмерительной машине осуществляется одно-, двух- и трёхлучевыми интерферометрами с плоскими зеркалами. Сверхвысокая точность обеспечивается благодаря конструкции, свободной от ошибок Аббе по всем измерительным осям, и применению новой концепции для компенсации систематических ошибок механических направляющих систем. Для решения различных задач NMM-1 укомплектована оптическими тактильными нанозондами, которые располагаются над 3D нанопозиционирующей платформой.

**Устройство наноизмерительной машины NMM-1.** Наноизмерительная машина выполнена таким образом, чтобы обеспечить минимальную неопределённость измерений. Для её определения необходимо рассмотреть взаимодействие между позиционирующими

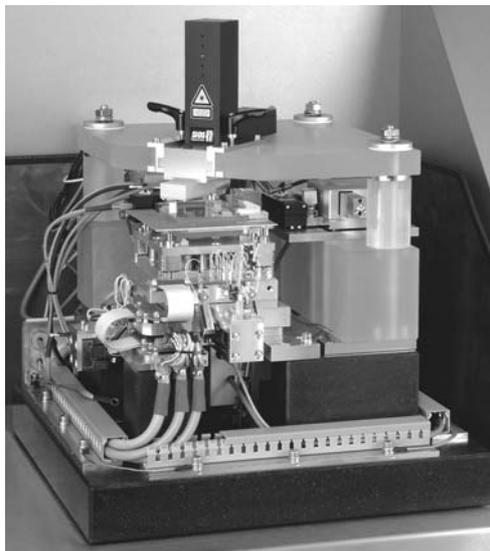


Рис. 1. Общий вид наноизмерительной машины NMM-1 (без чехла)

устройствами, зондовыми системами и измеряемым образцом. Говорить о малой погрешности измерений имеет смысл лишь тогда, когда указаны условия окружающей среды, а также тип нанометрологической системы для измерения образцов. Только в этом случае измерения будут воспроизводиться с нанометровой точностью.

Измерения можно производить в нескольких сканирующих режимах. Образец движется по трём координатам, оставаясь при этом в контакте с зафиксированной зондовой системой, которая играет роль опорной (нулевой) точки [1] (рис. 1, 2). Следует отметить, что такой режим применяется в ряде зондовых сканирующих микроскопов [2]. Альтернативный режим сканирования предусматривает измерение геометрии неподвижного образца при движении зонда в трёх направлениях и используется в основном в трёхкоординатных измерительных машинах. И, наконец, измерение в смешанном режиме предполагает перемещение образца в  $(X - Y)$ -плоскости, а измерительной машины с датчиком вдоль оси  $Z$  [3, 4]. На рис. 1 показана наноизмерительная машина NMM-1, а на рис. 2 — её структура, которая включает в себя следующие основные компоненты:

- следящие линейные и угловые измерительные устройства;
- $3D$  нанопозиционирующую платформу;
- нанозонды, встроенные в наноизмерительную машину;
- управляющее оборудование.

Метрологическая станина, на которой крепятся измерительные системы (интерферометры), и  $3D$ -платформа установлены на гранитном основании. Верхняя пластина Zerodur® (см. рис. 1, на рис. 2 не показана) метрологической станины сконструирована таким образом, чтобы можно было легко устанавливать и снимать различные нанозонды. Угловое зеркало приводится в движение трёхмерной платформой, которая является частью устройства. Отдельные платформы включают в себя шаровые направляющие и двигатели [1]. Положение углового зеркала измеряется и управляется одно-, двух- и трёхлучевым интерферометрами с плоскими зеркалами.

Уникальные характеристики наноизмерительной машины достигаются благодаря трём основополагающим техническим решениям: свободной от ошибок Аббе конструкции лазерных интерферометров, применению эффективной концепции компенсации ошибок платформы и использованию нанозондов в качестве индикаторов нулевой точки (нанозонды нулевой точки).

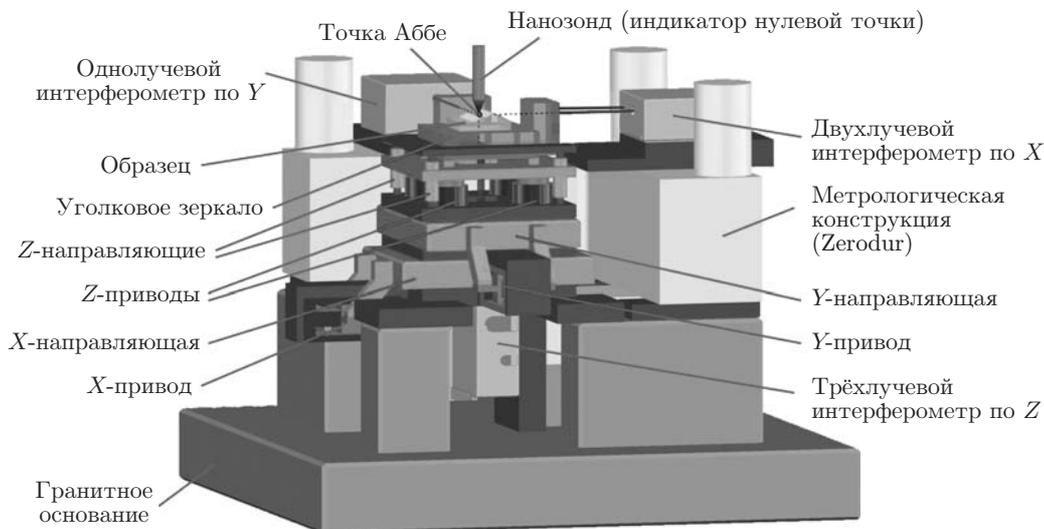


Рис. 2. Структура наноизмерительной машины NMM-1 (режим сканирования движущегося образца)

Оптическая схема лазерного интерферометра предусматривает использование трёх измерительных пучков, которые отражаются от внешней поверхности углового зеркала, причём их продолжения пересекаются в точке контакта образца и датчика (рис. 3). Поскольку в наноизмерительной системе осуществлён режим сканирования путём перемещения образца, то принцип компарирования по Аббе действует во всём измерительном диапазоне. В этом режиме зонды выполняют только функцию индикатора нулевой точки, которая может быть реализована с высокой точностью.

Угловые отклонения направляющих систем определяются по показаниям двух- и трёхлучевого интерферометров на плоских зеркалах. Зарегистрированные угловые отклонения компенсируются управляющей системой с обратной связью.

**Основы и ограничения интерферометрических измерений длины.** Как известно, если две плоские монохроматические линейно поляризованные волны с частотой  $\omega$

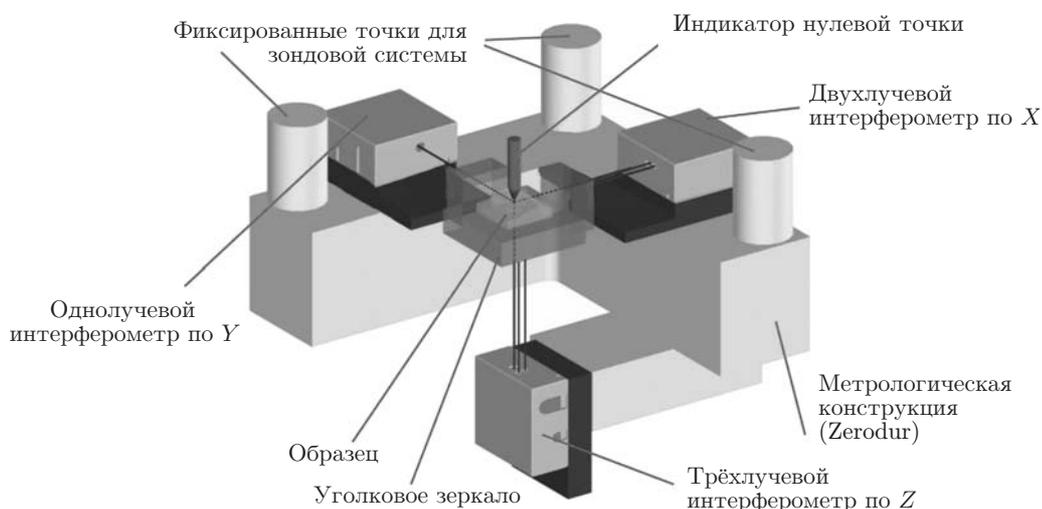


Рис. 3. Конструкция наноизмерительной системы с компенсацией смещения Аббе

интерferируют между собой, то распределение интенсивности описывается выражением

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{\lambda_0} nis\right), \quad (1)$$

где  $\gamma$  — фаза до смещения отражателя;  $\lambda_0$  — длина волны света в вакууме;  $n$  — показатель преломления воздуха;  $i$  — интерферометрический фактор;  $s$  — смещение отражателя.

Используя выражение (1), для смещения  $s$  можно получить следующую формулу:

$$s = \frac{k\lambda_0}{in} = \frac{kc_0}{in f_{\text{He—Ne}}}, \quad (2)$$

где  $k$  — порядок интерференции при смещении отражателя на величину  $s$ ;  $f_{\text{He—Ne}}$  — частота стабилизированного He—Ne-лазера;  $c_0$  — скорость света в вакууме.

Значительного повышения разрешающей способности  $s_q$  при перемещении рефлектора можно достичь, если интерференционный порядок ( $k = 1$ ) поделить электронным путём на  $e$  частей (операция интерполяции). В этом случае согласно (2)

$$s_q = \frac{\lambda_0}{ein}. \quad (3)$$

Некоторые параметры, влияющие на неопределённость измерения  $s$ , могут быть найдены из выражения (2). Необходимо иметь в виду следующее:

- при определении  $k$  учитывается нелинейность интерполирующей электроники;
- скорость света  $c_0$  является константой и имеет значение 299792458 м/с;
- показатель преломления  $n$  зависит от давления, влажности, температуры и состава воздуха;
- частота стабилизированного He—Ne-лазера должна быть известна с высокой точностью согласно уравнению (2).

Это достигается путём измерения разности между  $f_{\text{He—Ne}}$  и частотой йодно-стабилизированного He—Ne-лазера [5, 6], которая связана со стандартом частоты цезия  $f_{\text{Cs133}}$ . Длина волны такого лазера ( $\lambda_{\text{He—Ne iodine}}$ ) равна 632,99139822 нм с относительной стандартной неопределённостью  $2,5 \cdot 10^{-11}$  [6].

Следует также принимать во внимание и другие факторы, влияющие на неопределённость интерферометрических измерений. Эти факторы могут быть обусловлены отклонением от принципа компарирования Аббе или нестабильностью метрологического оборудования.

**Нанозонды нулевой точки, используемые в наноизмерительной машине NMM-1.** В качестве таких нанозондов в машине NMM-1 используются оптические и тактильные щупы, которые имеют свои достоинства и недостатки. Каждый из них предназначен для решения вполне конкретных измерительных задач.

Рассмотрим виды нанозондов нулевой точки, их функционирование и результаты измерений в составе наноизмерительной машины.

**Оптические нанозонды.** Датчик фокуса разработан совместно с проф. К. Ч. Фаном из Национального тайваньского университета [7]. Главной частью датчика является так называемый лазерный голографический элемент.

Оптическая система сконструирована так, что позволяет при измерении в диапазоне  $\pm 3$  мкм добиться разрешения менее 1 нм [8]. В усовершенствованной модели сенсора рабочий отрезок увеличен до 10 мм. В комбинации с наноизмерительной машиной датчик фокуса позволяет измерять стандарты высоты до 5 мм. Таким образом был измерен стандарт ступенчатой высоты размером 2 мм с расширенной неопределённостью  $U = 2,7$  нм для  $k = 2$ .

*Интерференционный датчик в белом свете.* Наноизмерительная машина укомплектована интерференционным датчиком, работающим в белом свете (на основе интерферометра Миро) для измерения параметров поверхности объекта. Поле зрения датчика составляет  $800 \times 600$  мкм. Датчик работает в составе микроскопа, оборудованного ПЗС-камерой. Отметим, что интерферометры Миро белого света используются во многих доступных устройствах. Чтобы достичь больших диапазонов измерений, эти устройства часто располагают на двухкоординатных столах. Для измерения высоты по координате  $Z$  объектив Миро перемещается в этом направлении с помощью пьезоэлектрической подвижки в диапазоне нескольких сотен микрон, причём его движение контролируется датчиком перемещения. В наноизмерительной машине объектив Миро и ПЗС-камера неподвижно закреплены на монтажной пластине Zerodur. Измеряемый объект позиционируется в направлении  $Z$  с шагом 1 нм в диапазоне 5 мм с помощью 3D движущейся платформы для того, чтобы локализовать 0-й порядок интерференции внутри  $(X - Y)$ -зоны размером  $600 \times 800$  мкм. Существенно, что в процессе обработки изображений множество площадок с такими размерами может быть объединено (без «сшивки»), что позволяет при измерениях охватить объекты с большой площадью. В результате в наноизмерительной машине благодаря использованию сверхпрецизионной системы  $(X - Y)$ -позиционирования достигается нанометровая точность в области  $X \times Y = 25 \times 25$  мм.

**Тактильные нанозонды.** Так как при измерении формы и контуров поверхностей объектов с крутыми склонами датчики фокуса и интерферометры белого света не могут быть использованы, то для этих целей эффективно применение тактильных щуповых зондов.

*Тактильный рычажный зонд.* В данном зонде для контроля горизонтальной ориентации его рычага применяется датчик фокуса, который работает в режиме нуль-индикатора. Такая конструкция обладает рядом преимуществ: отпадает необходимость в коррекции дуги, принцип Аббе выполняется в наилучшей степени. А это означает, что всевозможные отклонения в работе шарнирных направляющих не приводят к существенному повышению неопределённости измерений. При измерениях крутых поверхностей необходимо принять во внимание радиус конца зонда. Путём соответствующего выбора длины иглы щупа можно измерять с высокой точностью объекты с различными контурами, а также сферические, асферические и произвольные поверхности. В качестве примера приведём результаты измерения стандарта высоты Физико-технического института (РТВ, Германия) размером 69,1 нм. При измерении его тактильным зондом согласно ISO 5436 высота составила 68,6 нм с расширенной неопределённостью  $U = 0,7$  нм для  $k = 2$ .

*Тактильный пружинный зонд.* Трёхмерная подвижная платформа в сочетании с дополнительными компонентами представляет идеальную возможность для измерения свойств нанопокровов на подложках (рис. 4).

Для этой цели используется калиброванная по силе параллельная пружина из кварцевого стекла, которая с помощью 3D позиционирующей платформы может отклоняться в направлении  $Z$  с разрешением 0,1 нм. Измерение этого отклонения выполняется с помощью интерферометра с внешними плоскими зеркалами  $I_{sp}$ , также имеющего разрешение 0,1 нм. Таким образом довольно точно можно рассчитать силы вдавливания  $F_{sp}$ , воздействующие на образцы:

$$F_{sp} = C_{sp} S_{sp}. \quad (4)$$

Глубина вдавливания определяется из выражения

$$S = S_M + S_{sp}. \quad (5)$$

Здесь  $S_M$  измеряется интерферометром  $I_M$ , который находится внутри наноизмерительной машины.

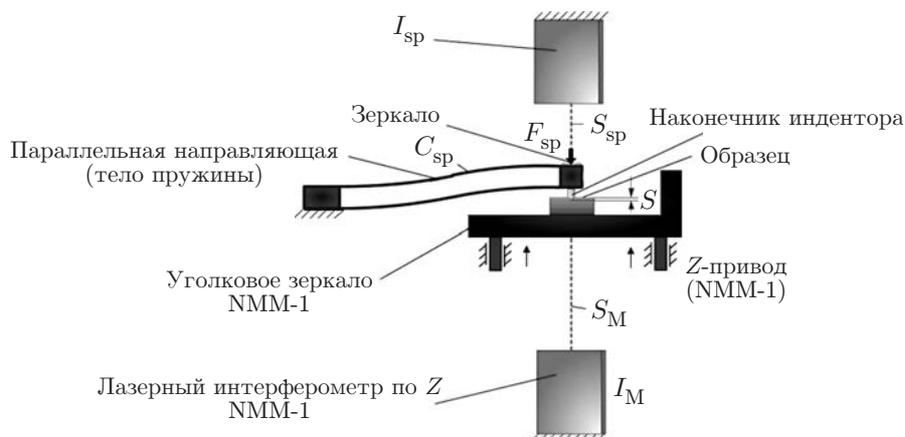


Рис. 4. Наноиндентор ( $S$  — углубление,  $S_{sp}$  — пружинное отклонение,  $S_M$  — отображение  $I_M$ ,  $C_{sp}$  — константа пружины,  $F_{sp}$  — сила вдавливания,  $I_{sp}$  — интерферометр для измерения отклонения пружины)

С помощью такого устройства с параллельной пружиной из кварцевого стекла можно эффективно производить точные измерения формы и профиля. Для этого на свободный конец параллельной пружины необходимо установить соответствующую иглу. В отличие от тактильного рычажного зонда в этом устройстве допустима контролируемая регулировка силы вдавливания  $F_{sp}$  в наноньютоновом диапазоне, а также имеется возможность добиться постоянства этой силы в течение всего процесса. Измерения с изменяемой силой контакта важны при определении взаимодействия между зондом и образцом. Вместо кварцевой параллельной пружины также могут использоваться и другие датчики силы, например кремниевая параллельная пружина.

**Заключение.** Наноизмерительная машина NMM-1, разработанная и созданная в Институте измерения процессов и сенсорных технологий при Технологическом университете г. Ильменау (Германия), базируется на двух важнейших компонентах, которые обеспечивают сверхвысокую точность измерений. Они включают:

- $3D$  позиционирующую платформу ( $25 \times 25 \times 5$  мм) с минимальной неопределённостью позиционирования (несколько нанометров), не имеющую аналогов в мире;
- бесконтактные оптические и контактные тактильные зонды, которые используются только как индикаторы нулевой точки, с повторяемостью менее 1 нм.

Перспективные исследования нацелены на разработку дополнительных зондов для наноизмерительной машины и расширение в ближайшее время диапазона позиционирования машины до  $200 \times 200 \times 25$  мм.

Автор выражает благодарность коллегам, которые внесли свой вклад в представленные здесь разработки, Министерству науки, исследований и искусств Тюрингии за содействие развитию нанотехнологии в рамках совместных проектов и Немецкому научно-исследовательскому сообществу (DFG) за финансирование совместного Научно-исследовательского центра 622 "Nanopositioning and Nanomeasuring Machines" при Технологическом университете г. Ильменау.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Jäger G., Grünwald R., Manske E. et al. A nanopositioning and nanomeasuring machine: Operation, measured results // Nanotechnol. and Precision Eng. 2004. 2, N 2. P. 81–84.

2. **Büchner H.-J., Jäger G., Manske E.** Laserinterferometrically assisted 3D-nanometrology on the atomic force microscope type VERITEKT // Proc. of the 1st EUSPEN-Conference. Bremen, Germany, 1999.
3. **Lehmann P.** Measurement of microgeometry using white-light interferometry and confocal microoptical sensors // VDI-Berichte Nr. 1950; Messtechnik für Mikro- und Nano-Engineering. 2006. P. 119–128.
4. **Fan K. C., Fei Y. T., Yu X. F. et al.** Development of a low-cost micro-CMM for 3D micro/nano measurements // Meas. Sci. Technol. 2006. **17**, N 3. P. 524–532.
5. **Documents** concerning the new definition of the meter // Metrologia. 1984. **19**, N 4. P. 163–177.
6. **Quinn T. J.** Practical realization of the definition of the meter (1997) // Metrologia. 1999. **36**, N 3. P. 211–244.
7. **Fan K. C., Lai Z. F., Wu P. et al.** A displacement spindle in a micro/nano level // Meas. Sci. Technol. 2007. **18**, N 6. P. 1710–1717.
8. **Mastylo R., Dontsov D., Manske E., Jäger G.** A focus sensor for an application in a nanopositioning and nanomeasuring machine // Proc. SPIE. 2005. **5856**. P. 238–244.

*Поступила в редакцию 27 февраля 2010 г.*

---