

РАДИОЭЛЕКТРОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ

RADIOELECTRONICS, INSTRUMENT-MAKING

УДК 531.713.8-022.532:620.3

<https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-86-93>

Поступила в редакцию 16.12.2021

Received 16.12.2021

А. А. Багдюн¹, В. Л. Соломахо²

¹*Белорусский государственный институт метрологии, Минск, Республика Беларусь*

²*Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь*

**ПОГРЕШНОСТЬ ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ ДЛИНЫ – МЕТРА
В НАНОМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ
НАНОИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ МАШИНЫ**

Аннотация. Приводится описание принципа измерения линейных размеров с помощью наноизмерительной машины (NMM), реализующей абсолютный интерферометрический метод измерения по трем координатным осям в диапазоне $25 \times 25 \times 5$ мм³. Выявлены источники неисключенной систематической погрешности измерений, которые условно разделены на факторы, связанные с методикой измерения длины с помощью интерферометра и факторы, определяемые конструктивными и технологическими особенностями наноизмерительной машины. Установлены статистические оценки результата измерений и рассчитана погрешность передачи размера единицы – длины метра в нанометровом диапазоне измерений. Полученные результаты позволяют утверждать, что наноизмерительная машина – уникальное средство измерения, позволяющее проводить измерения миллиметровых размеров с нанометровой точностью. Полученные результаты могут быть использованы для метрологической оценки мер высоты ступени и ширины шага, при калибровке средств измерений в нанометровом диапазоне, мер шероховатости в большом диапазоне при калибровке профилометров и контурографов, а также шаблонов и объект-микрометров для измерительных микроскопов высокой точности.

Ключевые слова: нанометр, принцип Аббе, наноизмерительная машина NMM, интерферометр, атомно-силовая микроскопия, погрешность, метрологическая оценка

Для цитирования: Багдюн, А. А. Погрешность передачи размера единицы длины – метра в нанометровом диапазоне измерений при использовании наноизмерительной машины / А. А. Багдюн, В. Л. Соломахо // Вес. Нац. акад. наук Беларуси. Сер. физ.-техн. наук. – 2022. – Т. 67, № 1. – С. 86–93. <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-86-93>

Alexandr A. Bagdun¹, Vladimir L. Solomakho²

¹*Belarusian State Institute of Metrology, Minsk, Republic of Belarus*

²*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

THE ERROR OF TRANSFERRING THE SIZE OF A UNIT OF LENGTH – A METER IN THE NANOMETER RANGE USING THE NANOMEASURING MACHINE

Abstract. The paper describes the principle of measuring linear dimensions using a nano-measuring machine (NMM), which implements the method of measuring three coordinate axes in the range of $25 \times 25 \times 5$ mm³. Sources of non-excluded systematic measurement errors are identified, which are conventionally divided into factors associated with the method of measuring length using an interferometer and factors determined by the design and technological features of the nano-measuring machine. Statistical estimates of the measurement result have been determined and the error in transferring the size – meter length in the nanometer range of measurements has been calculated. The results obtained assert that the nano-measuring machine is a unique tool that allows one to carry out measurements of millimeter dimensions with nanometer accuracy. The results obtained can be used for metrological assessment of the step height and step width, when calibrating measuring instruments in the nanometer range, roughness measures in a large range when calibrating profilometers and contourographs, as well as templates and micrometer objects for measuring high-precision microscopes.

Keywords: nanometer, Abbe error, NMM nano-measuring machine, interferometer, atomic force microscopy, error, metrological evaluation

For citation: Bagdun A. A., Solomakho V. L. The error of transferring the size of a unit of length – a meter in the nanometer range using the nanomeasuring machine. *Vestsi Natsyyanal'nai akademii navuk Belarusi. Seryya fizika-technichnykh navuk = Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-technical series*, 2022, vol. 67, no. 1, pp. 86–93 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8358-2022-67-1-86-93>

Введение. Любая нанотехнология или элемент nanoиндустрии требуют метрологической поддержки для получения с заданной точностью и достоверностью информации о производстве объектов нанотехнологий, их эксплуатационных показателях, результатах измерений, используемых при контроле и в ходе проведения научных исследований. Сегодня недостаточно качественной, построенной на основе органолептического контроля информации о технологических процессах и научных исследованиях в нанометровом диапазоне. Необходима их количественная оценка, позволяющая обеспечить получение с требуемой точностью измерительной информации о достигнутых эксплуатационных показателях или результатах измерений и контроля параметров нанообъектов. Точность измерений во многом определяет границы достижимого качества нанотехнологий.

Создание системы метрологического обеспечения в этой области является важной задачей, решение которой требует: создания специальных средств измерений (СИ) и измерительных комплексов, разработки и исследования образцовых мер и стандартизации процедур метрологической оценки.

Проведение метрологической оценки СИ для нано- и микроизмерений в вертикальной и горизонтальной плоскостях – необходимое условие обеспечения достоверности результатов измерений. Поэтому к настоящему времени разработаны необходимые горизонтальные, вертикальные и трехмерные меры, которые широко применяются для этой цели [1]. К ним, например, относятся 1D- и 2D-решетки, которые используются для проверки плоскости XY всех видов микроскопов. Вертикальные меры (высоты ступени или глубины) используются для калибровки оси Z сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) и профилометров. Перед использованием эти меры должны быть откалиброваны метрологическими приборами с возможностью обеспечения прослеживаемости измерений к единице длины – метру.

Для этих целей за рубежом ряд национальных метрологических институтов (НМИ) разработали и применяют специальные метрологические СЗМ [2–7], метрологические сканирующие электронные микроскопы (СЭМ) [8] и метрологические профилометры [9]. Подтверждение их метрологических характеристик осуществляется путем проведения специальных исследований [10–14] и сличений. В Республике Беларусь для обеспечения прослеживаемости измерений в нанометровом диапазоне было решено использовать модернизированную наноизмерительную машину (NMM), укомплектованную четырьмя сенсорами, в качестве которых используются атомно-силовой микроскоп, интерферометр белого света, лазерный фокусный микроскоп и 3D-щуп.

Цель данной работы – определение погрешности передачи размера единицы длины – метра в нанометровом диапазоне измерений при использовании наноизмерительной машины NMM, что позволит обеспечить прослеживаемость измерений геометрических величин в нанодиапазоне.

Физические принципы построения и конструктивные особенности наноизмерительной машины. Принцип измерения линейных размеров с помощью наноизмерительной машины, реализующей абсолютный интерферометрический метод измерения по трем координатным осям, полностью соответствует стандартному определению единицы длины – метра. Это достигается за счет применения трех стабилизированных He-Ne-лазеров (1, 4, 7), установленных по координатным осям OX, OY, OZ и совмещения их в одной точке с помощью специального приспособления (рисунок).

Лазеры зафиксированы с помощью особо устойчивой в механическом и термическом отношении метрологической платформы из ситалла (Zerodur) производства фирмы SCHOTT. Объект измерения устанавливается на специальное угловое зеркало (6), которое служит отражателем для лазерных интерферометров. Зеркало перемещается по трем осям с помощью привода и направляющей системы для проведения измерений. Электродинамические приводные системы, основанные на принципе соленоида, в сочетании с направляющими качения обеспечивают

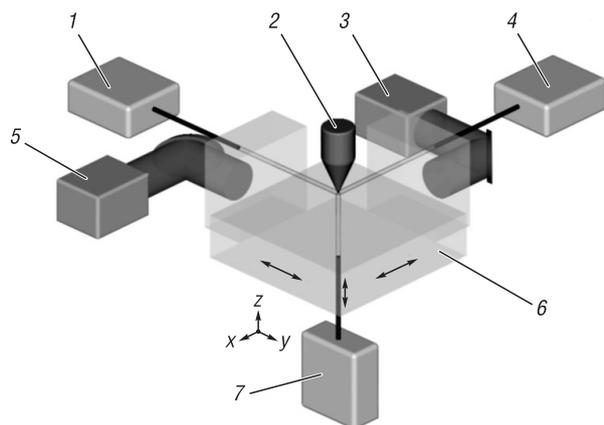


Схема измерительной системы NMM: 1 – Y-интерферометр; 2 – сенсор; 3, 5 – угловые датчики; 4 – X-интерферометр; 6 – угловое зеркало; 7 – Z-интерферометр

Scheme of the NMM measuring system: 1 – Y-interferometer; 2 – sensor; 3, 5 – angle sensors; 4 – X-interferometer; 6 – corner mirror; 7 – Z-interferometer

«независимость» погрешности измерения длины от системы привода и конструктивного и технологического исполнения направляющих.

В NMM можно встраивать широкий спектр контактных (тактильных) и бесконтактных (оптических) зондирующих систем (2). Интеграция дополнительных механических и электронных устройств позволяет использовать комплекс в качестве измерительной системы либо, как в нашем случае, индикатора нулевой точки. После контакта с объектом измерения сигналы системы применяются для регулирования вертикального положения стола, что позволяет сканировать поверхность объекта измерения.

В соответствии с «Правилами разработки, утверждения, модернизации и содержания национальных эталонов единиц величин» (Постановление Государственного комитета по стандартизации Республики Беларусь №40 от 16.10. 2020 г.) для национальных эталонов устанавливаются следующие характеристики точности:

- неисключенная систематическая погрешность эталона θ ;
- случайная погрешность эталона S ;
- погрешность передачи размера единицы величины S_{Σ} .

В соответствии с ГОСТ 8.381 неисключенная систематическая погрешность эталона характеризуется границами неисключенной систематической погрешности, случайная погрешность эталона – средним квадратическим отклонением результата измерений при воспроизведении единицы величины.

Исследование и расчет неисключенной систематической погрешности. Определение метрологических характеристик эталона проводилось расчетно-экспериментальным методом.

На основании анализа работ [16, 17] и результатов собственных исследований нами выделены основные источники неисключенной систематической погрешности наноизмерительной машины, которые можно представить в виде следующей модели:

$$\theta = f(\theta_r, \theta_{\text{freq}}, \theta_{ri}, \theta_{\text{Abbe}}, \theta_{\text{drift}}, \theta_{\text{noise}}, \theta_{\text{nonlin}}, \theta_{\text{TE}}),$$

где θ_r – погрешность, обусловленная разрешением лазерного интерферометра, нм; θ_{freq} – погрешность, обусловленная нестабильностью частоты He-Ne-лазера, нм; θ_{ri} – погрешность определения коэффициента преломления воздуха, нм; θ_{Abbe} – погрешность, обусловленная несоблюдением принципа Аббе, нм; θ_{drift} – погрешность, обусловленная дрейфом системы, нм; θ_{noise} – погрешность, обусловленная уровнем шума вдоль оси сканирования, нм; θ_{nonlin} – погрешность, обусловленная нелинейностью лазерного интерферометра, нм; θ_{TE} – погрешность, обусловленная тепловым расширением измеряемого объекта, нм.

перемещение с высокой разрешающей способностью на больших площадях с постоянной скоростью. Положение углового зеркала определяется лазерными интерферометрами, а угловое положение – угловыми датчиками (3, 5). Такое конструктивное решение позволяет говорить о том, что в отличие от обычных координатно-измерительных машин, в наноизмерительной машине принцип компаратора Аббе [15] соблюдается на всех измерительных осях и измерительных позициях, что сводит к минимуму погрешность первого порядка при измерении длины.

Замкнутый контур управления и раздельное управление приводами перемещений по осям OX , OY , OZ позволяют корректировать «индивидуальные» технологические погрешности и возникающие, вследствие этого, систематические и случайные отклонения направления перемещений, что обеспечивает

Проанализируем выделенные источники погрешности с точки зрения их возможной количественной оценки.

Погрешность, обусловленная разрешением лазерного интерферометра. В общем случае погрешность θ_r , выраженная в нм, может быть рассчитана по формуле

$$\theta_r = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{2^r},$$

где λ – длина волны He-Ne-лазера, нм; r – разрешение системы, бит.

Длина волны He-Ne-лазера, определяющая разрешение лазерного интерферометра, указана в сертификате завода-изготовителя SIOS Messtechnik GmbH (Германия) и составляет 632,9912340 нм, а разрешение системы – 14 бит. Таким образом,

$$\theta_r = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{1}{2^r} = \frac{632,9912340}{2} \cdot \frac{1}{2^{14}} = 0,019 \text{ нм.}$$

Погрешность, обусловленная нестабильностью частоты He-Ne-лазера θ_{freq} , нм, выражается формулой

$$\theta_{\text{freq}} = \frac{\Delta fr}{fr} \cdot L,$$

где Δfr – стабильность номинальной частоты He-Ne лазера, МГц; fr – номинальная частота He-Ne-лазера, МГц; L – значение измеряемой величины, нм.

Номинальная частота He-Ne-лазера и его стабильность указаны в сертификате завода-изготовителя SIOS Messtechnik GmbH (Германия) и составляют $473\,612\,337,6 \pm 2,1$ МГц. Таким образом,

$$\theta_{\text{freq}} = \frac{\Delta fr}{fr} \cdot L = \frac{2,1}{473612337,6} \cdot L = (4,434 \cdot 10^{-9})L.$$

Погрешность определения коэффициента преломления воздуха. Выражение для определения коэффициента преломления воздуха n для оптических волн приводится в [18] в следующем виде:

$$(n-1)_{p,t,p_w,c} = 2,8793 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{p}{1 + 0,003671t} \cdot (1 + 5,33(c-400) \cdot 10^{-7}) - 3,7 \cdot 10^{-10} \cdot p_w,$$

где p – атмосферное давление окружающего воздуха, Па; t – температура окружающего воздуха, °C; p_w – давление водяного пара, Па; c – концентрация углекислого газа, мг/кг.

Для расчета погрешности определения коэффициента преломления воздуха необходимо установить коэффициенты чувствительности и границы допусковой погрешности влияющих величин. Коэффициенты чувствительности (табл. 1) получены после дифференцирования формулы Эдлена. Границы допусковой погрешности измерения температуры и атмосферного давления окружающего воздуха, а также концентрации углекислого газа указаны в сертификатах калибровки датчиков измерения соответствующих величин. Погрешность формулы Эдлена установлена в [19]. Погрешность определения давления водяного пара (см. табл. 1) устанавливалась путем дифференцирования формулы Магнуса

$$E = RH \cdot E_0 \cdot 10^{\frac{a \cdot t}{b+t}},$$

где E – давление насыщения водяного пара, Па; RH – относительная влажность окружающего воздуха, %; E_0 – давление водяного пара при $t = 0$ °C, Па; b и a – коэффициенты формулы Магнуса; t – температура окружающего воздуха, °C.

Расчет погрешности определения коэффициента преломления воздуха θ_{ri} , нм, представлен в табл. 1.

Погрешность, обусловленная несоблюдением принципа Аббе, θ_{Abbe} , нм, выражается формулой

$$\theta_{\text{Abbe}} = d \cdot \text{tg}(\varphi) = 0,1 \cdot \text{tg}(0,1) = 9,7 \cdot 10^{-8} \text{ мм} = 9,7 \cdot 10^{-2} \text{ нм,}$$

где d – смещение Аббе [20], мм; φ – угловая ошибка, с.

Т а б л и ц а 1. Расчет погрешности определения коэффициента преломления воздуха

T a b l e 1. Calculation of the error in determining the refractive index of air

Наименование параметра	Коэффициент чувствительности	Границы допускаемой погрешности	Вклад в погрешность
Температура окружающего воздуха, t	$-9,3 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot L$	0,05 $^\circ\text{C}$	$-4,65 \cdot 10^{-8} \cdot L$
Атмосферное давление окружающего воздуха, p	$2,7 \cdot 10^{-9} \text{ Па}^{-1} \cdot L$	50,0 Па	$13,5 \cdot 10^{-8} \cdot L$
Давление водяного пара, p_w	$-3,7 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1} \cdot L$	67,4 Па	$-2,5 \cdot 10^{-8} \cdot L$
Концентрация углекислого газа, c	$-1,5 \cdot 10^{-10} \text{ (мг/кг)}^{-1} \cdot L$	100 мг/кг	$-1,5 \cdot 10^{-8} \cdot L$
Погрешность формулы Эдлена	L	$5,0 \cdot 10^{-8}$	$5,0 \cdot 10^{-8} \cdot L$
Погрешность определения коэффициента преломления воздуха, $\theta_{\text{г}}$			$1,54 \cdot 10^{-7} \cdot L$

П р и м е ч а н и е. Погрешность определения коэффициента преломления воздуха рассчитывается по формуле $\theta_{\text{г}} = \sqrt{\sum (K_i \cdot \delta_i)^2}$, где K_i – коэффициент чувствительности P , δ_i – границы допускаемой погрешности.

Угловая ошибка устанавливалась экспериментально и соответствует максимальному значению, полученному при работе NMM.

Погрешность, обусловленная дрейфом системы, θ_{drift} , указана в [20] и составляет 1 нм.

Погрешность, обусловленная уровнем шума вдоль оси сканирования, θ_{noise} , определяется как треть размаха координат по оси Z вдоль оси сканирования и устанавливается экспериментально для каждого измерения. Прежде всего она зависит от шероховатости поверхности измеряемого образца. Для мер высоты ступени и ширины шага, изготовленных из оксида кремния, это значение составляет 1 нм.

Погрешность, обусловленная нелинейностью лазерного интерферометра, θ_{nonlin} , указана в сертификате завода-изготовителя SIOS Messtechnik GmbH (Германия) и составляет 0,5 нм.

Погрешность, обусловленная тепловым расширением измеряемого объекта, θ_{TE} , нм, выражается формулой

$$\theta_{\text{TE}} = \alpha \cdot \Delta t \cdot L,$$

где α – температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) из документации по справочными данными на материал меры, $^\circ\text{C}^{-1}$; Δt – разность температур во время измерения меры, $^\circ\text{C}$.

Основными объектами измерений для NMM являются меры высоты ступени и ширины шага, изготовленные из оксида кремния. Температурный коэффициент линейного расширения оксида кремния составляет $5,6 \cdot 10^{-7} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. Ввиду того что температура окружающей среды при измерениях стабилизирована (а следовательно, и температура средства измерения NMM) и составляет $20,0 \pm 0,5 \text{ } ^\circ\text{C}$, а измерения проходят в течение нескольких минут, то примем, что изменение температуры во время измерения меры составляет не более $0,1 \text{ } ^\circ\text{C}$. Таким образом,

$$\theta_{\text{TE}} = \alpha \cdot \Delta t \cdot L = 5,6 \cdot 10^{-7} \cdot 0,1 \cdot L = 5,6 \cdot 10^{-8} \cdot L.$$

Основные источники неисключенных систематических погрешностей и их значения приведены в табл. 2.

Определение погрешности передачи размера единицы длины – метра в нанометровом диапазоне измерений. Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности эталона было определено экспериментально по мере высоты ступени с номинальным значением 780 нм.

Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности эталона S_L , нм, вычислено по формуле

$$S_L = \sqrt{\frac{\sum (L_i - \bar{L})^2}{n(n-1)}} \cdot \frac{1}{\bar{L}} \cdot 100\%,$$

где L_i – результат i -го наблюдения, нм; \bar{L} – среднее арифметическое результатов наблюдений, нм; n – число наблюдений.

Т а б л и ц а 2. Основные источники неисключенных систематических ошибок

T a b l e 2. Main sources of non-excluded systematic errors

Обозначение погрешности	Источник неисключенной систематической погрешности	Значение погрешности θ_i , нм
θ_r	Разрешение лазерного интерферометра	0,019
θ_{freq}	Нестабильность частоты He-Ne-лазера	$4,343 \cdot 10^{-9} \cdot L$
θ_{r_i}	Коэффициент преломления воздуха	$1,54 \cdot 10^{-7} \cdot L$
θ_{Abbe}	Ошибка Аббе	0,097
θ_{drift}	Дрейф системы	1,0
θ_{noise}	Уровень шума вдоль оси сканирования	1,0
θ_{nonlin}	Нелинейность лазерного интерферометра	0,5
θ_{TE}	Тепловое расширение измеряемого объекта	$5,6 \cdot 10^{-8} \cdot L$
Неисключенная систематическая погрешность θ		$1,1 \cdot (1,50 + 1,57 \cdot 10^{-7} \cdot L) = 1,65 + 1,73 \cdot 10^{-7} \cdot L$

П р и м е ч а н и е. Неисключенная систематическая погрешность определяется по формуле $\theta = K \sqrt{\sum \theta_i^2}$, где K – коэффициент, соответствующий доверительной вероятности P ; θ_i – значение погрешности; P – доверительная вероятность, равная 0,95.

Количество наблюдений в каждой исследуемой точке диапазона измерений n определялось по формуле

$$n = \frac{2}{1 - P},$$

где P – доверительная вероятность. При $P = 0,95$ в соответствии с ГОСТ 8.207 $n = 40$.

Так как случайная составляющая погрешности учитывается, а вариации отсутствуют, то количество наблюдений может быть уменьшено до $n = 10$.

Среднее квадратическое отклонение случайной составляющей погрешности S_L составляет $0,03L$, нм, где L – значение измеряемой величины в мкм.

Погрешность передачи размера единицы длины – метра в нанометровом диапазоне измерений S_Σ , нм, определена нами исходя из определения НСП и случайной составляющей погрешности по формуле

$$S_\Sigma = \sqrt{S_L^2 + \theta_L^2}$$

и составляет $1,65 + 0,03L$, нм, при доверительной вероятности $P = 0,95$; $K = 1,1$.

З а к л ю ч е н и е. Получена зависимость, позволяющая произвести расчет погрешности передачи размера единицы длины – метра в нанометровом диапазоне измерений S_Σ при использовании в качестве средства измерений наноизмерительной машины NMM (при $P = 0,95$; $K = 1,1$).

Использование расчетного значения позволяет на базе эталона Республики Беларусь проводить метрологическую оценку мер высоты ступени и ширины шага, используемых для калибровки средств измерений в нанометровом диапазоне, мер шероховатости в широком диапазоне, для калибровки профилометров и контурографов, а также шаблонов и объект-микромметров для измерительных микроскопов высокой точности.

Анализ результатов работы свидетельствует о том, что основной вклад в структуру погрешности вносят дрейф системы и уровень шума вдоль оси сканирования. Уровень шума вдоль оси сканирования обусловлен прежде всего шероховатостью поверхности измеряемого объекта. Выявление источника несоответствий открывает возможность для дальнейших исследований с целью уменьшения этой шероховатости.

Перспективными с точки зрения уменьшения погрешности представляются также исследования дрейфа системы. Адаптируя эти результаты для конкретных измерений и стабилизируя температуру и потоки окружающего воздуха, можно снизить неисключенную составляющую систематической погрешности измерения.

Список использованных источников

1. 100-nm-pitch standard characterization for metrology applications / M. Tortonese [et al.] // Proc. SPIE 4689, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVI (16 July 2002). – Santa Clara, 2002. <https://doi.org/10.1117/12.473495>
2. A metrological scanning force microscope used for coating thickness and other topographical measurements / M. Bienias [et al.] // Appl. Phys. A. – 1998. – Vol. 66, № 7. – P. S837–S842. <https://doi.org/10.1007/s003390051252>
3. Metrological large range scanning probe microscope / Gaoliang Dai [et al.] // Rev. Sci. Instruments. – 2004. – Vol. 75, № 4. – P. 962–969. <https://doi.org/10.1063/1.1651638>
4. Accurate dimensional metrology with atomic force microscopy / R. Dixon [et al.] // Proc. SPIE. 3998. – 2000. – P. 362–368. <https://doi.org/10.1117/12.386492>
5. Picotto, G. A sample scanning system with nanometric accuracy for quantitative SPM measurements / G. Picotto, Marco Pisani // Ultramicroscopy. – 2001. – Vol. 86. – P. 247–254. [https://doi.org/10.1016/S0304-3991\(00\)00112-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3991(00)00112-1)
6. Haycocks, J. Traceable calibration of transfer standards for scanning probe microscopy / J. Haycocks, K. Jackson // Precision Engineering. – 2005. – Vol. 29, № 2. – P. 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.06.002>
7. Meli, F. Long-range AFM profiler used for accurate pitch measurements / F. Meli, R. Thalmann // Measurement Science and Technology. – 1998. – Vol. 9. – P. 1087–1092. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/9/7/014>
8. Haessler-Grohne, W. An electron optical metrology system for pattern placement measurements / W. Haessler-Grohne, H. Bosse // Measurement Science and Technology. – 1998. – Vol. 9. – P. 1120–1128. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/9/7/020>
9. Advances in traceable nanometrology at the National Physical Laboratory / R. K. Leach [et al.] // Nanotechnology. – 2001. – Vol. 12, № 1. – R1. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/12/1/201>
10. Calibration of step heights and roughness measurements with atomic force microscopes / J. Garnæs [et al.] // Precision Engineering. – 2003. – Vol. 27. – P. 91–98. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(02\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(02)00184-8)
11. Uncertainty in pitch measurements of one-dimensional grating standards using a nanometrological atomic force microscope / I. Misumi [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2003. – Vol. 14. – P. 463–471. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/4/309>
12. Submicrometre-pitch intercomparison between optical diffraction, scanning electron microscope and atomic force microscope / I. Misumi [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2003. – Vol. 14. – P. 2065–2074. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/12/004>
13. Characterization of a 100-nm 1D pitch standard by metrological SEM and SFM / W. Haessler-Grohne [et al.] // SPIE Advanced Lithography. – 2004. <https://doi.org/10.1117/12.536285>
14. Lateral metrology using scanning probe microscopes, 2D pitch standards and image processing / J. F. Jørgensen, C. P. Jensen, J. Garnæs // Appl. Phys. A. – 1998. – Vol. 66. – P. S847–S852. <https://doi.org/10.1007/S003390051254>
15. Leach, R. Abbe Error/Offset / R. Leach // CIRP Encyclopedia of Production Engineering / eds. L. Laperrière, G. Reinhart. – Springer, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16793-1
16. Decker, J. E. Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry / J. E. Decker, J. R. Pekelsky // Metrologia. – 1997. – Vol. 34. – P. 479–493. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/34/6/4>
17. Accurate and traceable calibration of two-dimensional gratings / G. Dai [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2007. – Vol. 18. – P. 415–421. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/2/S13>
18. Edlen, B. The Refractive Index of Air / B. Edlen // Metrologia. – 1966. – Vol. 2. – P. 71–80. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/2/2/002>
19. Jones, F. E. The Refractivity of Air / F. E. Jones // Journal of Research of the National Bureau of Standards. – 1981. – Vol. 86, № 1. – P. 27–32. <https://doi.org/10.6028/JRES.086.002>
20. Schmidt, I. Beiträge zur Verringerung der Positionierungsunsicherheit in der Nanopositionier und Nanomessmaschine / I. Schmidt. – Ilmenau University of Technology, 2009. – 25 p.

References

1. Tortonese M., Prochazka J., Konicek P., Schneir J., Smith I. R. 100-nm-pitch standard characterization for metrology applications. *SPIE's 27th Annual International Symposium on Microlithography, 2002, Santa Clara, California, Proceedings Volume 4689, Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XVI*. Santa Clara, 2002. <https://doi.org/10.1117/12.473495>
2. Bienias M., Gao S., Hasche, Seemann R., Thiele K. A metrological scanning force microscope used for coating thickness and other topographical measurements. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1998, vol. 66, no. 7, pp. S837–S842. <https://doi.org/10.1007/s003390051252>
3. Dai G., Pohlenz F., Danzebrink H.-U., Xu M., Hasche K., Wilkening G. Metrological large range scanning probe microscope. *Review of Scientific Instruments*, 2004, vol. 75, no. 4, pp. 962–969. <https://doi.org/10.1063/1.1651638>
4. Dixon R., Köning R., Fu J., Vorbürger T., Renegar B. Accurate dimensional metrology with atomic force microscopy. *Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XIV, Proc. SPIE*, 2000, vol. 3998, pp. 362–368. <https://doi.org/10.1117/12.386492>
5. Picotto G., Pisani M. A sample scanning system with nanometric accuracy for quantitative SPM measurements. *Ultramicroscopy*, 2001, vol. 86, pp. 247–254. [https://doi.org/10.1016/S0304-3991\(00\)00112-1](https://doi.org/10.1016/S0304-3991(00)00112-1)
6. Haycocks J. A., Jackson K. Traceable calibration of transfer standards for scanning probe microscopy. *Precision Engineering*, 2005, vol. 29, pp. 168–175. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2004.06.002>

7. Meli F., Thalmann R. Long-range AFM profiler used for accurate pitch measurements. *Measurement Science and Technology*, 1998, vol. 9, pp. 1087–1092. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/9/7/014>
8. Haessler-Grohne W., Bosse H. An electron optical metrology system for pattern placement measurements. *Measurement Science and Technology*, 1998, vol. 9, pp. 1120–1128. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/9/7/020>
9. Leach R. K., Haycocks J. A., Jackson K., Lewis A., Oldfield S. J., Yacoot A. Advances in traceable nanometrology at the National Physical Laboratory. *Nanotechnology*, 2001, vol. 12, no. 1, R1. <https://doi.org/10.1088/0957-4484/12/1/201>
10. Garnæs J., Kofod N., Kühle A., Nielsen C., Dirscherl K., Blunt L. Calibration of step heights and roughness measurements with atomic force microscopes. *Precision Engineering*, 2003, vol. 27, pp. 91–98. [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(02\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(02)00184-8)
11. Misumi I., Gonda S., Kurosawa T., Takamasu K. Uncertainty in pitch measurements of one-dimensional grating standards using a nanometrological atomic force microscope. *Measurement Science and Technology*, 2003, vol. 14, pp. 463–471. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/4/309>
12. Misumi I., Gonda S., Kurosawa T., Tanimura Y., Ochiai N., Kitta J.-i., Kubota F., Yamada M., Fujiwara Y., Nakayama Y., Takamasu K. Submicrometre-pitch intercomparison between optical diffraction, scanning electron microscope and atomic force microscope. *Measurement Science and Technology*, 2003, vol. 14, pp. 2065–2074. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/14/12/004>
13. Haessler-Grohne W., Dziomba T., Frase C. G., Bosse H., Prochazka J. Characterization of a 100-nm 1D pitch standard by metrological SEM and SFM. *SPIE Advanced Lithography*, 2004. <https://doi.org/10.1117/12.536285>
14. Jørgensen J. F., Jensen C. P., Garnæs J. Lateral metrology using scanning probe microscopes, 2D pitch standards and image processing. *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 1998, vol. 66, pp. S847–S852. <https://doi.org/10.1007/S003390051254>
15. Leach R. Abbe Error / Offset. Laperrière L., Reinhart G. (eds.). *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*. Springer, 2014. https://doi.org/10.1007/978-3-642-35950-7_16793-1
16. Decker J. E., Pekelsky J. R. Uncertainty evaluation for the measurement of gauge blocks by optical interferometry. *Metrologia*, 1997, vol. 34, pp. 479–493. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/34/6/4>
17. Dai G., Pohlentz F., Dziomba T., Xu M., Diener A., Koenders L., Danzebrink H.-U. Accurate and traceable calibration of two-dimensional gratings. *Measurement Science and Technology*, 2007, vol. 18, pp. 415–421. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/18/2/S13>
18. Edlén B. The Refractive Index of Air. *Metrologia*, 1966, vol. 2, pp. 71–80. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/2/2/002>
19. Jones F. E. The Refractivity of Air. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 1981, vol. 86, no. 1, pp. 27–32. <https://doi.org/10.6028/JRES.086.002>
20. Schmidt I. *Beiträge zur Verringerung der Positionierungsunsicherheit in der Nanopositionier und Nanomessmaschine*. Ilmenau University of Technology, 2009. 25 p.

Информация об авторах

Багдун Александр Андреевич – ведущий инженер по метрологии – исследователь производственно-исследовательского отдела измерений геометрических величин, Белорусский государственный институт метрологии (Старовиленский тракт, 93, 220053, Минск, Республика Беларусь). E-mail: bagdun.ne@gmail.com

Соломахо Владимир Леонтьевич – доктор технических наук, профессор, Белорусский национальный технический университет (пр. Независимости, 65, 220213, Минск, Республика Беларусь). E-mail: v.solomakho@gmail.com

Information about the authors

Alexandr A. Bagdun – Leading Metrology Engineer – Researcher of the Production and Research Department for Measuring Geometric Quantities, Belarusian State Institute of Metrology (Starovilensky Trakt, 93, 220053, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: bagdun.ne@gmail.com

Vladimir L. Solomakho – D. Sc. (Engineering), Professor, Belarusian National Technical University (65, Nezavisimosti Ave., 220013, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: v.solomakho@gmail.com