ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО

ПО ТЕХНИЧЕСКОМУ РЕГУЛИРОВАНИЮ И МЕТРОЛОГИИ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ГОСТ Р 8.700— 2010

Государственная система обеспечения единства измерений

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЫСОТЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

Издание официальное

Москва
Стандартинформ
2019

gost.e-ecolog.ru

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН Открытым акционерным обществом «Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума», Федеральным государственным учреждением «Российский научный центр «Курчатовский институт», Государственным учреждением Российской академии наук «Институт кристаллографии имени А.В. Шубникова» и Государственным образовательным учреждением высшего профессионального образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

2 ВНЕСЕН Техническим комитетом по стандартизации ТК 441 «Нанотехнологии и наноматериалы»

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 5 апреля 2010 г. № 54-ст

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

5 ПЕРЕИЗДАНИЕ. Март 2019 г.

Правила применения настоящего стандарта установлены в статье 26 Федерального закона от 29 июня 2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации». Информация об изменениях к настоящему стандарту публикуется в ежегодном (по состоянию на 1 января текущего года) информационном указателе «Национальные стандарты», а официальный текст изменений и поправок — в ежемесячном информационном указателе «Национальные стандарты». В случае пересмотра (замены) или отмены настоящего стандарта соответствующее уведомление будет опубликовано в ближайшем выпуске ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты». Соответствующая информация, уведомление и тексты размещаются также в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет (www.gost.ru)

© Стандартинформ, оформление, 2010, 2019

Настоящий стандарт не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии

Содержание

1 Область применения . . . 1
2 Нормативные ссылки . . . 1
3 Термины и определения . . . 2
4 Требования к погрешности измерений . . . 3
5 Средства измерений и вспомогательные устройства . . . 3
6 Метод измерений . . . 3
7 Требования безопасности . . . 3
8 Требования к квалификации операторов . . . 3
9 Условия измерений . . . 3
10 Подготовка и проведение измерений . . . 4
11 Обработка результатов измерений . . . 5
12 Контроль погрешности результатов измерений . . . 9
13 Оформление результатов измерений . . . 9
Библиография . . . 11

НАЦИОНАЛЬНЫЙ СТАНДАРТ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Государственная система обеспечения единства измерений

МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ВЫСОТЫ ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ СКАНИРУЮЩЕГО ЗОНДОВОГО АТОМНО-СИЛОВОГО МИКРОСКОПА

State system for ensuring the uniformity of measurements.
Methods of surface roughness effective height measurements by means of scanning probe atomic force microscope

Дата введения — 2010—11—01

1 Область применения

Настоящий стандарт устанавливает методику измерений эффективной высоты шероховатости изотропных поверхностей твердых тел с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа.

Настоящий стандарт применяют при измерениях эффективной высоты шероховатости поверхностей твердых тел в диапазоне от 10^{-9} до 10^{-5} м.

2 Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 12.1.005 Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны

ГОСТ 12.1.045 Система стандартов безопасности труда. Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля

ГОСТ 25142 (СТ СЭВ 1156—78) Шероховатость поверхности. Термины и определения

ГОСТ Р 8.628 Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления

ГОСТ Р 8.629 Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецеидальным профилем элементов. Методика поверки

ГОСТ Р 8.630 Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые измерительные. Методика поверки

ГОСТ Р 8.635 Государственная система обеспечения единства измерений. Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые измерительные. Методика калибровки

ГОСТ Р 8.644 Государственная система обеспечения единства измерений. Меры рельефные нанометрового диапазона с трапецеидальным профилем элементов. Методика калибровки

ГОСТ Р ИСО 14644-1 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 1. Классификация чистоты воздуха по концентрации частиц

ГОСТ Р ИСО 14644-2 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 2. Требования к контролю и мониторингу для подтверждения постоянного соответствия ГОСТ Р ИСО 14644-1

ГОСТ Р ИСО 14644-5 Чистые помещения и связанные с ними контролируемые среды. Часть 5. Эксплуатация

Примечание — При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования — на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана

Издание официальное

недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого стандарта с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать версию этого стандарта с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт, на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку.

3 Термины и определения

В настоящем стандарте применены термины по ГОСТ 25142 и РМГ 29 [1], а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **шероховатость поверхности (твердого тела):** Совокупность неровностей поверхности с относительно малыми шагами, выделенная с помощью кадра сканирования зондового атомно-силового микроскопа.

3.2 **сканирующий зондовый атомно-силовой микроскоп (микроскоп):** Зондовый атомно-силовой микроскоп с нормированными метрологическими характеристиками, формирующий информативный сигнал путем сканирования поверхности острием зонда.

3.3 **кадр сканирования (поверхности твердого тела):** Пространственно локализованная часть поверхности, расположение которой и ее размеры введены в программу управления микроскопом.

Примечание — Расположение кадра сканирования задают точкой начала сканирования на поверхности твердого тела, направлением декартовых осей координат, линейными размерами и числом точек сканирования.

3.4 **радиус-вектор поверхности:** Направленный отрезок, соединяющий начало координат кадра сканирования и точку, расположенную в пределах кадра сканирования.

3.5 **функция неровностей поверхности (твердого тела):** Двумерная дискретная функция в декартовой системе координат, значения которой определяют по высотам неровностей поверхности, измеренным в заданных точках с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа.

3.6 **функция спектральной плотности мощности поверхности твердого тела:** Функция, равная квадрату модуля Фурье преобразования функции неровностей поверхности твердого тела.

Примечание — Функция спектральной плотности мощности поверхности твердого тела несет в себе полную статистическую информацию о распределении высот неровностей на поверхности по их линейным размерам.

3.7 **сканирование (неровностей поверхности твердого тела):** Измерение высот неровностей поверхности с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа.

3.8 **эффективная высота шероховатости поверхности:** Параметр шероховатости, равный среднеквадратическому отклонению высот неровностей поверхности, которое вычисляется интегрированием функции спектральной плотности мощности поверхности твердого тела.

3.9 **погрешность результата измерения (погрешность измерения):** Отклонение результата измерения от истинного (действительного) значения измеряемой величины [1].

3.10 **абсолютная погрешность измерения:** Погрешность измерения, выраженная в единицах измеряемой величины [1].

3.11 **относительная погрешность измерения:** Погрешность измерения, выраженная отношением абсолютной погрешности измерения к действительному или измеренному значению измеряемой величины [1].

3.12 **среднеквадратическая погрешность результата измерений среднеарифметического:** Оценка $S_{\overline{x}}$ случайной погрешности среднеарифметического значения результата измерений одной и той же величины в данном ряду измерений, вычисляемая по формуле

$$S_{\overline{x}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \overline{x})^2}{n(n-1)}},$$

где x_i — результат i-го единичного измерения;

$\overline{x}$ — среднеарифметическое значение измеряемой величины из n единичных результатов;

n — число единичных измерений в ряду [1].

3.13 **доверительные границы погрешности результата измерений:** Наибольшее и наименьшее значения погрешности измерений, ограничивающие интервал, внутри которого с заданной вероятностью находится искомое (истинное) значение погрешности результата измерений [1].

4 Требования к погрешности измерений

Пределы допускаемой относительной погрешности результатов измерений эффективной высоты шероховатости поверхности твердых тел должны быть менее ± 12 % при доверительной вероятности $P = 0,95$.

5 Средства измерений и вспомогательные устройства

5.1 Сканирующий зондовый атомно-силовой микроскоп с эффективным радиусом острия зонда не более 30 нм. Микроскоп должен быть поверен по ГОСТ Р 8.630 или откалиброван по ГОСТ Р 8.635 с помощью рельефной меры нанометрового диапазона, изготовленной по ГОСТ Р 8.628 и поверенной по ГОСТ Р 8.629 или откалиброванной по ГОСТ Р 8.644.

5.2 В качестве вспомогательного оборудования применяют оптический микроскоп с не менее чем 400-кратным увеличением.

5.3 Средства измерений параметров окружающей среды с абсолютными погрешностями измерений не более:

- температура окружающей среды ..... ± 0,3 °С;
- относительная влажность воздуха ..... ± 1,5 %;
- атмосферное давление ..... ± 130 Па.

6 Метод измерений

Измерение эффективной высоты шероховатости поверхности твердого тела проводят методом спектрального разложения функции неровностей поверхности, полученной путем сканирования поверхности твердого тела с помощью сканирующего зондового атомно-силового микроскопа.

7 Требования безопасности

При проведении измерений необходимо соблюдать правила электробезопасности по [2], [3] и требования по обеспечению безопасности на рабочих местах по ГОСТ 12.1.005, ГОСТ 12.1.045, [4] и [5], а также требования, установленные в эксплуатационной документации на используемый сканирующий зондовый атомно-силовой микроскоп.

Рабочие места операторов должны быть аттестованы по условиям труда в соответствии с требованиями национального трудового законодательства.

8 Требования к квалификации операторов

Измерения должны проводить штатные сотрудники предприятия, имеющие соответствующую профессиональную подготовку, опыт работы со сканирующими зондовыми атомно-силовыми микроскопами и изучившие требования настоящего стандарта.

9 Условия измерений

9.1 Помещение (зона), в котором проводят измерения, должно быть в эксплуатируемом состоянии и обеспечивать класс чистоты не более 8 ИСО по взвешенным в воздухе частицам размерами 0,5 и 5 мкм и концентрациям, определенными по ГОСТ ИСО 14644-1. Периодичность контроля состояния помещения (зоны) определяют по ГОСТ Р ИСО 14644-2. Эксплуатацию помещения (зоны) осуществляют по ГОСТ Р ИСО 14644-5.

9.2 При проведении измерений необходимо соблюдать следующие условия:

- температура окружающего воздуха должна быть (20 ± 5) °С, а ее изменения за время выполнения измерений — не более ± 0,9 °С;
- относительная влажность воздуха должна быть (65 ± 15) %, а ее изменения за время выполнения измерений — не более ± 5 %;
- атмосферное давление должно быть (100 ± 4) кПа;

- напряжение питающей электрической сети должно быть (220 ± 22) В;
- частота питающей электрической сети должна быть (50,0 ± 0,4) Гц.

9.3 При проведении измерений необходимо применение активной и пассивной защиты микроскопа от механических вибраций.

10 Подготовка и проведение измерений

10.1 При подготовке к проведению измерений эффективной высоты шероховатости поверхности твердых тел выполняют следующие операции.

10.1.1 Проводят измерения параметров окружающей среды, питающей электрической сети и проверяют выполнение требований, указанных в разделе 9.

10.1.2 Выполняют операции по подготовке сканирующего зондового атомно-силового микроскопа (далее — микроскоп) к работе. При этом проводят внешний осмотр микроскопа, в процессе которого должно быть установлено:

- соответствие комплекта поставки микроскопа данным, приведенным в паспорте (формуляре), и наличие свидетельства о поверке (сертификата о калибровке);
- отсутствие механических повреждений всех составных частей и функциональных элементов микроскопа;
- отсутствие повреждений соединительных кабелей и сетевых разъемов.

10.1.3 В соответствии с инструкцией по эксплуатации микроскопа устанавливают и закрепляют исследуемое твердое тело (далее — образец) в держатель рабочего стола микроскопа.

10.1.4 На поверхности образца выбирают участок, размеры которого должны быть не менее установленных в 10.2.1 и 10.3. В процессе операции рекомендуется использовать оптический микроскоп.

10.1.5 Зонд микроскопа устанавливают над поверхностью образца, при этом острие зонда должно быть расположено над точкой измерения поверхности образца.

10.2 Сканирование поверхности образца для формирования функции неровностей поверхности образца проводят в контактном или полуконтактном режимах в следующей последовательности.

10.2.1 В системе управления измерениями микроскопа устанавливают кадр сканирования, площадь которого имеет квадратную форму с размерами сторон 100 мкм.

10.2.2 В системе управления измерениями микроскопа устанавливают разрешение кадра сканирования 512 × 512 точек.

10.2.3 В соответствии с инструкцией по эксплуатации микроскопа сканируют исследуемый участок поверхности образца и записывают значения функции неровностей поверхности $z_1(x_p, y_q)$ в нанометрах в соответствующий файл на жестком диске электронно-вычислительного устройства микроскопа.

10.2.4 В системе управления измерениями микроскопа устанавливают кадр сканирования, площадь которого имеет квадратную форму с размерами сторон 10 мкм. Указанный кадр сканирования размещают в пределах площади кадра сканирования по 10.2.1.

10.2.5 В системе управления измерениями микроскопа устанавливают разрешение кадра сканирования 512 × 512 точек.

10.2.6 В соответствии с инструкцией по эксплуатации микроскопа сканируют исследуемый участок поверхности образца и записывают значения функции неровностей поверхности $z_2(x_p, y_q)$ в нанометрах в соответствующий файл на жестком диске электронно-вычислительного устройства микроскопа.

10.2.7 В системе управления измерениями микроскопа устанавливают кадр сканирования, площадь которого имеет квадратную форму с размерами сторон 1 мкм. Указанный кадр сканирования размещают в пределах площади кадра сканирования по 10.2.4.

10.2.8 В системе управления измерениями микроскопа устанавливают разрешение кадра сканирования 512 × 512 точек.

10.2.9 В соответствии с инструкцией по эксплуатации микроскопа сканируют исследуемый участок поверхности образца и записывают значения функции неровностей поверхности $z_3(x_p, y_q)$ в нанометрах в соответствующий файл на жестком диске электронно-вычислительного устройства микроскопа.

10.3 Измерения по 10.2 проводят еще четыре раза для $\alpha = 2, 3, ..., 5$. При этом расположение кадров сканирования на образце выбирают произвольно.

Примечание — Измерения, выполненные по 10.2 до проведения измерений по 10.3, соответствуют $\alpha = 1$.

11 Обработка результатов измерений

11.1 Вычисляют значения длин проекций на ось X — $x_p^{(l)}$, мкм, и на ось Y — $y_q^{(l)}$, мкм, радиус-вектора поверхности $\vec{\rho}_l\left(x_p^{(l)}, y_q^{(l)}\right)$ (l = 1, 2, 3) по формулам:

$$x_p^{(l)} = \frac{pL_l}{511} \text{ для } p = 0, 1, \ldots, 511, \tag{1}$$

$$y_q^{(l)} = \frac{qL_l}{511} \text{ для } q = 0, 1, \ldots, 511, \tag{2}$$

где L_l — линейный размер l-го кадра сканирования, установленный по 10.2.1, 10.2.4 и 10.2.7 соответственно, мкм.

11.2 Вычисляют значения длин проекций на ось X — $f_{x_m}^{(l)}$, мкм$^{-1}$, и на ось Y — $f_{y_n}^{(l)}$, мкм$^{-1}$, вектора пространственной частоты $\vec{f}^{(l)}\left(f_{x_m}^{(l)}, f_{y_n}^{(l)}\right)$ (l = 1, 2, 3) по формулам:

$$f_{x_m}^{(l)} = \frac{m}{L_l} \text{ для } m = -255, -254, \ldots, -1, 1, 2, \ldots, 256; \tag{3}$$

$$f_{x_m}^{(l)} = \frac{0{,}001}{L_l} \text{ для } m = 0; \tag{4}$$

$$f_{y_n}^{(l)} = \frac{n}{L_l} \text{ для } n = -255, -254, \ldots, 256, \tag{5}$$

где L_l — линейный размер l-го кадра сканирования, установленный по 10.2.1, 10.2.4 и 10.2.7 соответственно, мкм.

11.3 Вычисляют значения l-го Фурье преобразования $F_l\left(f_{x_m}^{(l)}, f_{y_n}^{(l)}\right)$, мкм^3, функции неровностей поверхности образца $z_l\left(x_m^{(l)}, y_n^{(l)}\right)$ для l = 1, 2, 3 по формуле

$$F_l\left(f_{x_m}^{(l)}, f_{y_n}^{(l)}\right) = \left(\frac{L_l}{511}\right)^2 \left[\sum_{p=0}^{511}\sum_{q=0}^{511} z_l\left(x_p^{(l)}, y_q^{(l)}\right) e^{2\pi i\left(f_{x_m}^{(l)} x_p^{(l)} + f_{y_n}^{(l)} y_q^{(l)}\right)}\right], \tag{6}$$

где L_l — линейный размер l-го кадра сканирования, установленный по 10.2.1, 10.2.4 и 10.2.7 соответственно, мкм;

$z_l\left(x_p^{(l)}, y_q^{(l)}\right)$ — значение l-й дискретной функции высот поверхности в точке $\left(x_p^{(l)}, y_q^{(l)}\right)$, измеренное по 10.2.3, 10.2.6 или 10.2.9 для l = 1, 2, 3 соответственно, нм;

$x_p^{(l)}$ — p-е значение длины проекции на ось X радиус-вектора поверхности $\vec{\rho}^{(l)}\left(x_p^{(l)}, y_q^{(l)}\right)$, вычисленное по 11.1, мкм;

$y_q^{(l)}$ — q-е значение длины проекции на ось Y радиус-вектора поверхности $\vec{\rho}^{(l)}\left(x_p^{(l)}, y_q^{(l)}\right)$, вычисленное по 11.1, мкм;

$i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица;

$f_{x_m}^{(l)}$ — m-е значение длины проекции на ось X вектора пространственной частоты $\vec{f}^{(l)}\left(f_{x_m}^{(l)}, f_{y_n}^{(l)}\right)$, вычисленное по 11.2, мкм$^{-1}$;

$f_{y_n}^{(l)}$ — n-е значение длины проекции на ось Y вектора пространственной частоты $\vec{f}^{(l)}\left(f_{x_m}^{(l)}, f_{y_n}^{(l)}\right)$, вычисленное по 11.2, мкм$^{-1}$.

11.4 Осуществляют переход от декартовых координат $f_{x_m}^{(l)}$, мкм$^{-1}$, $f_{y_n}^{(l)}$, мкм$^{-1}$, вектора пространственной частоты $\vec{f}^{(l)}\left(f_{x_m}^{(l)}, f_{y_n}^{(l)}\right)$ (l = 1, 2, 3) к полярным координатам вектора пространственной частоты $\vec{f}^{(l)}\left(f_{m,n}^{(l)}, \theta_{m,n}^{(l)}\right)$: модулю вектора пространственной частоты $f_{m,n}^{(l)}$, мкм$^{-1}$, и полярному углу вектора пространственной частоты $\theta_{m,n}^{(l)}$, рад, по формулам:

$$f_{m,n}^{(l)} = \sqrt{\left(f_{x_m}^{(l)}\right)^2 + \left(f_{y_n}^{(l)}\right)^2}, \tag{7}$$

$$\theta_{m,n}^{(l)} = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_{y_n}^{(l)}}{f_{x_m}^{(l)}}\right) \text{ для } f_{x_m}^{(l)} > 0, \tag{8}$$

$$\theta_{m,n}^{(l)} = \operatorname{arctg}\left(\frac{f_{y_n}^{(l)}}{f_{x_m}^{(l)}}\right) + \pi \text{ для } f_{x_m}^{(l)} < 0, \tag{9}$$

где $f_{x_m}^{(l)}$ — m-е значение длины проекции на ось X вектора пространственной частоты $\vec{f}^{(l)}\left(f_{x_m}^{(l)}, f_{y_n}^{(l)}\right)$, вычисленное по 11.2, мкм$^{-1}$;

$f_{y_n}^{(l)}$ — n-е значение длины проекции на ось Y вектора пространственной частоты $\vec{f}^{(l)}\left(f_{x_m}^{(l)}, f_{y_n}^{(l)}\right)$, вычисленное по 11.2, мкм$^{-1}$.

11.5 Проводят преобразование и переобозначение полярных координат $f_{m,n}^{(l)}$ и $\theta_{m,n}^{(l)}$ вектора пространственной частоты $\vec{f}^{(l)}\left(f_{x_m}^{(l)}, f_{y_n}^{(l)}\right)$:

- значения $f_{m,n}^{(l)}$ для каждого k (k = 1, 2, ..., 256), для которых выполняется условие $k^2 \le n^2 + m^2 < (k+1)^2$, считают равными $f_{x_k}^{(l)}$ и обозначают $f_k^{(l)}$,

где $f_{m,n}^{(l)}$ — модуль вектора пространственной частоты, вычисленный по 11.4, мкм$^{-1}$;

$f_{x_k}^{(l)}$ — k-е значение длины проекции на ось X вектора пространственной частоты $\vec{f}^{(l)}\left(f_{x_k}^{(l)}, f_{y_n}^{(l)}\right)$, вычисленное по 11.2, мкм$^{-1}$;

- значения углов $\theta_{m,n}^{(l)}$ векторов пространственной частоты, для которых выполняется условие $k^2 \le n^2 + m^2 < (k+1)^2$, обозначают $\theta_{s_k}^{(l)}$ и нумеруют в порядке возрастания их значений от 1 до S_k (s_k = 1, 2, ..., S_k),

где $\theta_{m,n}^{(l)}$ — полярный угол вектора пространственной частоты с модулем $f_{m,n}^{(l)}$, вычисленный по 11.4, рад.

11.6 Вычисляют значения l-й функции спектральной плотности мощности поверхности образца $P_l\left(f_k^{(l)}\right)$ (l = 1, 2, 3), мкм^4, по формуле

$$P_l\left(f_k^{(l)}\right) = \frac{1}{L_l^2}\sum_{s_k=1}^{s_k}\left|F_l\left(f_k^{(l)}, \theta_{s_k}^{(l)}\right)\right|^2, \tag{10}$$

где L_l — линейный размер l-го кадра сканирования, установленный по 10.2.1, 10.2.4 и 10.2.7 соответственно, мкм;

$F_l\left(f_k^{(l)}, \theta_{s_k}^{(l)}\right)$ — значение l-го Фурье преобразования в полярных координатах, переход к которым осуществлен по 11.4—11.5, функции неровностей поверхности образца $z_l\left(x_p^{(l)}, y_q^{(l)}\right)$, вычисленное по 11.3, мкм^6;

$f_k^{(l)}$ — значение модуля вектора пространственной частоты, вычисленное по 11.5, мкм$^{-1}$;

$\theta_{s_k}^{(l)}$ — s_k-е значение полярного угла вектора пространственной частоты с модулем $f_k^{(l)}$, вычисленное по 11.5, мкм$^{-1}$;

s_k — число значений углов векторов пространственной частоты с модулем $f_k^{(l)}$, определенное по 11.5.

11.7 Вычисляют значения максимального модуля вектора пространственной частоты $f_{\max}^{(l)}$, мкм$^{-1}$, и минимального модуля вектора пространственной частоты $f_{\min}^{(l)}$, мкм$^{-1}$, для l = 1, 2, 3 по формулам:

$$f_{\min}^{(l)} = 4L_l^{-1}, \tag{11}$$

$$f_{\max}^{(l)} = 256L_l^{-1}, \tag{12}$$

где L_l — линейный размер l-го кадра сканирования, заданный по 10.2.1, 10.2.4 и 10.2.7 соответственно, мкм.

11.8 Вычисляют значение эффективной высоты шероховатости поверхности образца σ_a, нм, в области значений модуля вектора пространственной частоты от $f_{min}^{(2)}$ до $f_{max}^{(1)}$, вычисленных по 11.7, по формуле

$$\sigma_a = \sqrt{0{,}005 \sum_{k=40}^{255} \left(P_1\left(f_k^{(1)}\right) f_k^{(1)} + P_1\left(f_{k+1}^{(1)}\right) f_{k+1}^{(1)} \right)}, \quad (13)$$

где $P_1\left(f_k^{(1)}\right)$ — значение функции спектральной плотности мощности поверхности в точке со значением модуля вектора пространственной частоты $f_k^{(1)}$, вычисленное по 11.6, мкм^4;

$f_k^{(1)}$ — значение модуля вектора пространственной частоты, вычисленное по 11.5, мкм$^{-1}$.

11.9 Вычисляют значение эффективной высоты шероховатости поверхности образца σ_b, нм, в области значений модуля вектора пространственной частоты от $f_{min}^{(2)}$ до $f_{max}^{(1)}$, вычисленных по 11.7, по формуле

$$\sigma_b = \sqrt{0{,}05 \sum_{k=4}^{25} \left(P_2\left(f_k^{(2)}\right) f_k^{(2)} + P_2\left(f_{k+1}^{(2)}\right) f_{k+1}^{(2)} \right)}, \quad (14)$$

где $P_2\left(f_k^{(2)}\right)$ — значение функции спектральной плотности мощности поверхности в точке со значением модуля пространственной частоты $f_k^{(2)}$, вычисленное по 11.6, мкм^4;

$f_k^{(2)}$ — значение модуля вектора пространственной частоты, вычисленное по 11.5, мкм$^{-1}$.

11.10 Вычисляют значение эффективной высоты шероховатости поверхности образца σ_c, нм, в области значений модуля вектора пространственной частоты от $f_{min}^{(3)}$ до $f_{max}^{(2)}$, вычисленных по 11.7, по формуле

$$\sigma_c = \sqrt{0{,}05 \sum_{k=40}^{255} \left(P_2\left(f_k^{(2)}\right) f_k^{(2)} + P_2\left(f_{k+1}^{(2)}\right) f_{k+1}^{(2)} \right)}, \quad (15)$$

где $P_2\left(f_k^{(2)}\right)$ — значение функции спектральной плотности мощности поверхности в точке со значением модуля пространственной частоты $f_k^{(2)}$, вычисленное по 11.6, мкм^4;

$f_k^{(2)}$ — значение модуля вектора пространственной частоты, вычисленное по 11.5, мкм$^{-1}$.

11.11 Вычисляют значение эффективной высоты шероховатости поверхности образца σ_d, нм, в области значений модуля вектора пространственной частоты от $f_{min}^{(3)}$ до $f_{max}^{(2)}$, вычисленных по 11.7, по формуле

$$\sigma_d = \sqrt{0{,}5 \sum_{k=4}^{25} \left(P_3\left(f_k^{(3)}\right) f_k^{(3)} + P_3\left(f_{k+1}^{(3)}\right) f_{k+1}^{(3)} \right)}, \quad (16)$$

где $P_3\left(f_k^{(3)}\right)$ — значение функции спектральной плотности мощности поверхности в точке со значением модуля пространственной частоты $f_k^{(3)}$, вычисленное по 11.6, мкм^4;

$f_k^{(3)}$ — значение модуля вектора пространственной частоты, вычисленное по 11.5, мкм$^{-1}$.

11.12 Вычисляют отношения Δ_1, %, и Δ_2, %, между значениями эффективных высот шероховатости σ_a, σ_b, σ_c, σ_d по формулам:

$$\Delta_1 = 2\frac{|\sigma_a - \sigma_b|}{\sigma_a + \sigma_b} 100, \quad (17)$$

$$\Delta_2 = 2\frac{|\sigma_c - \sigma_d|}{\sigma_c + \sigma_d} 100, \quad (18)$$

где σ_a — значение эффективной высоты шероховатости поверхности, вычисленное по 11.8, нм;

σ_b — значение эффективной высоты шероховатости поверхности, вычисленное по 11.9, нм;

σ_c — значение эффективной высоты шероховатости поверхности, вычисленное по 11.10, нм;

σ_d — значение эффективной высоты шероховатости поверхности, вычисленное по 11.11, нм.

11.13 Если Δ_1 или Δ_2 более 10 %, то исследуемая поверхность не является изотропной и настоящий стандарт не может быть использован для оценки эффективной высоты шероховатости поверхности.

11.14 Вычисляют значение низкочастотной эффективной высоты шероховатости поверхности σ_1, нм, в области значений модуля вектора пространственной частоты от $f_{min}^{(1)}$ до $f_{max}^{(1)}$, вычисленных по 11.7, мкм$^{-1}$, по формуле

$$\sigma_1 = \sqrt{0{,}005 \sum_{h=4}^{255} \left(P_1\left(f_h^{(1)}\right) f_h^{(1)} + P_1\left(f_{h+1}^{(1)}\right) f_{h+1}^{(1)} \right)}, \quad (19)$$

где $P_1\left(f_h^{(1)}\right)$ — значение первой функции спектральной плотности мощности поверхности в точке со значением модуля вектора пространственной частоты $f_h^{(1)}$, вычисленное по 11.6, мкм^4;

$f_h^{(1)}$ — значение модуля вектора пространственной частоты, вычисленное по 11.5, мкм$^{-1}$.

11.15 Вычисляют значение среднечастотной эффективной высоты шероховатости поверхности σ_2, нм, в области значений модуля вектора пространственной частоты от $f_{min}^{(1)}$ до $f_{max}^{(2)}$, вычисленных по 11.7, мкм$^{-1}$, по формуле

$$\sigma_2 = \sqrt{0{,}05 \sum_{h=25}^{255} \left(P_2\left(f_h^{(2)}\right) f_h^{(2)} + P_2\left(f_{h+1}^{(2)}\right) f_{h+1}^{(2)} \right)}, \quad (20)$$

где $P_2\left(f_h^{(2)}\right)$ — значение второй функции спектральной плотности мощности поверхности в точке со значением модуля вектора пространственной частоты $f_h^{(2)}$, вычисленное по 11.6, мкм^4;

$f_h^{(2)}$ — значение модуля вектора пространственной частоты, вычисленное по 11.5, мкм$^{-1}$.

11.16 Вычисляют значение высокочастотной эффективной высоты шероховатости поверхности σ_3, нм, в области значений модуля вектора пространственной частоты от $f_{min}^{(2)}$ до $f_{max}^{(3)}$, вычисленных по 11.7, мкм$^{-1}$, по формуле

$$\sigma_3 = \sqrt{0{,}5 \sum_{h=25}^{255} \left(P_3\left(f_h^{(3)}\right) f_h^{(3)} + P_3\left(f_{h+1}^{(3)}\right) f_{h+1}^{(3)} \right)}, \quad (21)$$

где $P_3\left(f_h^{(3)}\right)$ — значение третьей функции спектральной плотности мощности поверхности в точке со значением модуля вектора пространственной частоты $f_h^{(3)}$, вычисленное по 11.6, мкм^4;

$f_h^{(3)}$ — значение модуля вектора пространственной частоты, вычисленное по 11.5, мкм$^{-1}$.

11.17 Вычисляют значение эффективной высоты шероховатости поверхности $\sigma^{(1)}$, нм, по формуле

$$\sigma^{(1)} = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2}, \quad (22)$$

где σ_1 — значение низкочастотной эффективной высоты шероховатости поверхности, вычисленное по 11.14, нм;

σ_2 — значение среднечастотной эффективной высоты шероховатости поверхности, вычисленное по 11.15, нм;

σ_3 — значение высокочастотной эффективной высоты шероховатости поверхности, вычисленное по 11.16, нм.

11.18 Вычисление значения эффективной высоты шероховатости поверхности $\sigma^{(\alpha)}$ по 11.1—11.17 повторяют еще четыре раза (α = 2, 3, ..., 5) для результатов измерений, проведенных по 10.3.

Примечание — Результаты вычислений по 11.17 соответствуют α = 1 и обозначают $\sigma^{(1)}$. Результаты вычислений при α = 2, 3, ..., 5 обозначают $\sigma^{(2)}$, $\sigma^{(3)}$, ..., $\sigma^{(5)}$ соответственно.

11.19 Вычисляют значение эффективной высоты шероховатости поверхности образца σ, нм, по формуле

$$\sigma = \frac{\sum_{\alpha=1}^{5} \sigma^{(\alpha)}}{5}, \quad (23)$$

где $\sigma^{(\alpha)}$ — значение эффективной высоты шероховатости поверхности для α = 1, 2, ..., 5, вычисленное по 11.17—11.18, нм.

11.20 Значения эффективной высоты шероховатости поверхности σ и относительной погрешности ее измерений δ, вычисленные по 11.19 и 12.4, указывают совместно со значением эффективного радиуса острия зонда, определенным при поверке (калибровке) микроскопа по 5.1.

12 Контроль погрешности результатов измерений

12.1 Среднеквадратическую погрешность S_σ, нм, измерения значения эффективной высоты шероховатости поверхности σ вычисляют по формуле

$$S_\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=1}^{5}\left(\sigma^{(\alpha)} - \sigma\right)^2}{20}}, \qquad (24)$$

где $\sigma^{(\alpha)}$ — значение эффективной высоты шероховатости поверхности для $\alpha = 1, 2, \ldots, 5$, вычисленное по 11.17—11.18, нм;

σ — значение эффективной высоты шероховатости, вычисленное по 11.19, нм.

12.2 Суммарную погрешность S_Σ, нм, измерения значения эффективной высоты шероховатости поверхности образца вычисляют по формуле

$$S_\Sigma = \sigma\sqrt{\delta_z^2 + \left(\frac{S_\sigma}{\sigma}\right)^2}, \qquad (25)$$

где σ — значение эффективной высоты шероховатости, вычисленное по 11.19, нм;

δ_z — относительная погрешность результата измерений линейных размеров по оси Z, указанная в паспорте (формуляре) на микроскоп;

S_σ — среднеквадратическая погрешность измерения значения эффективной высоты шероховатости поверхности, вычисленная по 12.1, нм.

12.3 Доверительную границу суммарной погрешности ΔS_Σ, нм, измерения эффективной высоты шероховатости поверхности при доверительной вероятности $P = 0{,}95$ вычисляют по формуле

$$\Delta S_\Sigma = 4{,}47 S_\Sigma, \qquad (26)$$

где S_Σ — суммарная погрешность измерения значения эффективной высоты шероховатости поверхности, вычисленная по 12.2, нм.

12.4 Относительную погрешность измерения δ, %, эффективной высоты шероховатости поверхности образца вычисляют по формуле

$$\delta = \frac{\Delta S_\Sigma}{\sigma} 100, \qquad (27)$$

где ΔS_Σ — доверительная граница суммарной погрешности измерения эффективной высоты шероховатости поверхности, вычисленная по 12.3, нм;

σ — значение эффективной высоты шероховатости, вычисленное по 11.19, нм.

12.5 Сравнивают значение относительной погрешности измерения δ, вычисленное по 12.4, со значением погрешности измерения, приведенным в разделе 4.

Если вычисленное по 12.4 значение погрешности более установленного в разделе 4, то выясняют причины такого превышения, устраняют их и повторяют измерения в соответствии с требованиями настоящего стандарта.

13 Оформление результатов измерений

13.1 Результаты измерений эффективной высоты шероховатости поверхности твердых тел оформляют в виде протокола по форме, принятой на предприятии, проводившем измерения.

13.2 В протоколе должны быть приведены следующие сведения:

- полное и сокращенное наименования предприятия, проводившего измерения;

- дата проведения измерений;
- основание и цель проведения измерений;
- тип и номер основных средств измерений и вспомогательных устройств, значение эффективного радиуса острия зонда микроскопа;
- данные об условиях проведения измерений (параметры окружающей среды и показатели качества питающей электрической сети);
- идентификационные данные твердого тела, шероховатость поверхности которого подвергалась измерениям;
- данные о значениях эффективной высоты шероховатости поверхности твердого тела с вычисленными значениями погрешности их измерений;
- должности, фамилии и подписи всех сотрудников, проводивших измерения и обработку их результатов.

Библиография

[1] РМГ 29—99 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения

[2] Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей (утверждены Приказом Минэнерго России от 13 января 2003 г. № 6; зарегистрированы Минюстом России 22 января 2003 г., рег. № 4145)

[3] ПОТ РМ-016—2001 РД 153.34.0—03.150—00 Межотраслевые правила по охране труда (правила безопасности) при эксплуатации электроустановок

[4] СанПиН 2.2.4.1191—03 Электромагнитные поля в производственных условиях

[5] СанПиН 2.2.2/2.4.1340—03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы

УДК 531.711.7.089:006.354 ОКС17.040.01

Ключевые слова: твердые тела, поверхность, эффективная высота шероховатости поверхности, сканирующий зондовый атомно-силовой микроскоп, методика измерений

Редактор *Е.В. Лукьянова*
Технический редактор *И.Е. Черепкова*
Корректор *Е.Р. Ароян*
Компьютерная верстка *Ю.В. Поповой*

Сдано в набор 01.03.2019. Подписано в печать 15.07.2019. Формат 60 × 84 1/8. Гарнитура Ариал.
Усл. печ. л. 1,86. Уч.-изд. л. 1,40.

Подготовлено на основе электронной версии, предоставленной разработчиком стандарта

ИД «Юриспруденция», 115419, Москва, ул. Орджоникидзе, 11.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

Создано в единичном исполнении во ФГУП «СТАНДАРТИНФОРМ»
для комплектования Федерального информационного фонда стандартов,
117418 Москва, Нахимовский пр-т, д. 31, к. 2.
gost.e-ecolog.ru gost.e-ecolog.ru

gost.e-ecolog.ru