

**НЕЛИНЕЙНОСТЬ РАЗВЕРТКИ РАСТРОВОГО ЭЛЕКТРОННОГО
МИКРОСКОПА**

**В. В. АЛЬЗОБА*, В. П. ГАВРИЛЕНКО*, А. Ю. КУЗИН*, В. Б. МИТЮХЛЯЕВ*,
А. В. РАКОВ*, П. А. ТОДУА**, М. Н. ФИЛИППОВ*****

* Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума,
Москва, Россия, e-mail: fgurpicpv@mail.ru

** Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

*** Институт общей и неорганической химии им. Н. С. Курнакова,
Москва, Россия, e-mail: fil@igic.ras.ru

Проведена оценка нелинейности развертки растрового электронного микроскопа с использованием элемента рельефа с известной геометрической формой профиля. Измерено среднее значение шага рельефной тестовой структуры при перемещении исследуемого образца вдоль оси сканирования X. Экспериментально показано, что при 5× увеличении максимальное относительное отклонение от среднего значения шага тестовой структуры для использованного микроскопа не превышает 0,4 %.

Ключевые слова: растровый электронный микроскоп, рельефная тестовая шаговая структура, нелинейность развертки.

The estimation of scan nonlinearity of scanning electron microscope (SEM) with use of the relief element with known geometric profile form was carried out. The average pitch value of relief test structure at moving of the sample under study along the scanning axis X was measured. It shown experimentally for magnification 5× the maximum relative deviation from the mean value of the pitch of test structure does not exceed 0,4%.

Key words: scanning electron microscope, relief test pitch structure, scan nonlinearity.

Растровый электронный микроскоп (РЭМ) широко используется для измерений линейных размеров элементов нанорельефа поверхности, имеющих значения несколько десятков нанометров, например, при измерениях ключевых контрольных характеристик в производстве электронных микросхем. В указанном диапазоне актуальна задача

оценки нелинейности сканирования в пределах всего поля наблюдаемого кадра. Наличие значимой нелинейности развертки приводит к зависимости масштабного коэффициента (коэффициента увеличения) от места расположения измеряемого элемента на изображении. Это явление становится одним из источников систематической погрешности линейных измерений с помощью РЭМ. Целью настоящей работы являлась экспериментальная оценка нелинейности развертки в РЭМ.

Условия эксперимента. На РЭМ S-4800 (Hitachi, Япония) при энергии первичных электронов $E = 15$ кэВ и рабочем отрезке 5,0 мм, получали изображение рельефной шаговой структуры МШПС-2.0К, изготовленной по [1] с десятью элементами рельефа (выступами) трапецеидального профиля. Затем фотографировали восьмой и девятый выступы при 5× увеличении (рис. 1, а). Образец последовательно перемещали вдоль направления строчной развертки (далее ось X). Регистровали изображения указанной пары выступов в десяти последовательных положениях вдоль оси X . При этом в каждом положении делали по три снимка. На каждом из этих видеоизображений на одном и том же участке структуры выделяли область шириной в 60 строк (рис. 1, а), которую разбивали на 3 блока по 20 строк каждый. Шаг измеряли по видеосигналу, полученному путем усреднения видеосигналов от 20 строк в блоке (рис. 1, б). Далее получали среднее значение шага с помощью усреднения шагов, полученных из трех блоков в каждом из трех изображений, сделанных в одном и том же положении образца вдоль оси X . Диапазон в 60 строк был выбран с целью минимизации влияния нелинейности вдоль оси Y .

Для каждого положения высчитывали относительное отклонение от среднего значения шага N

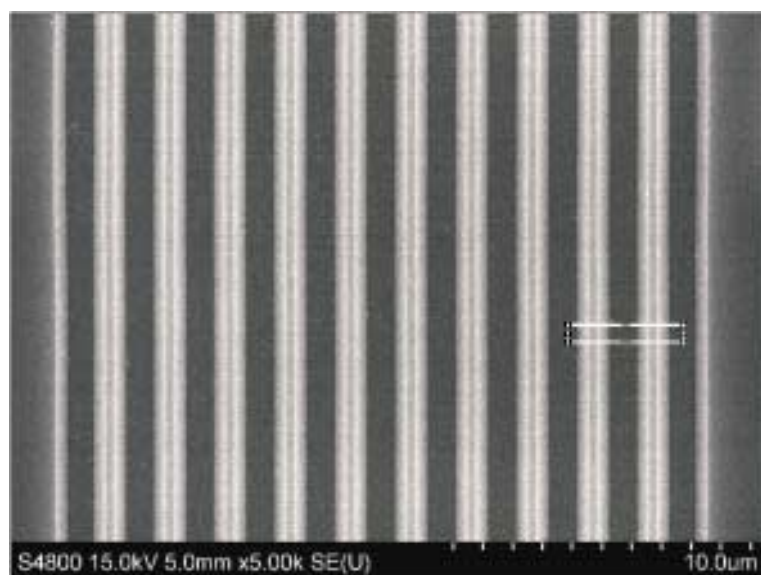
$$N = (T_i - T_0) / T_0,$$

где T_i , T_0 – средние значения шага для i -го и всех десяти положений,

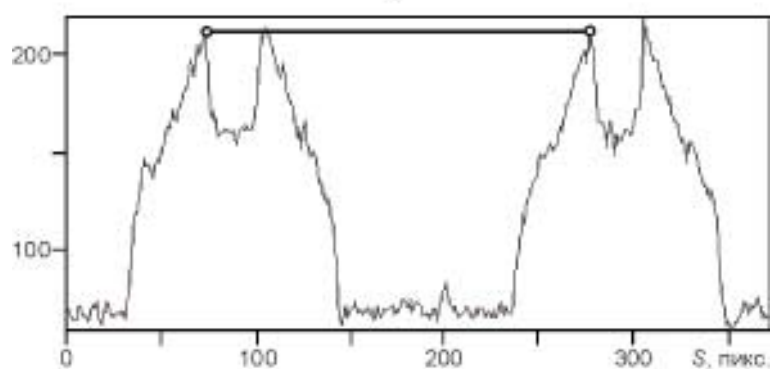
$$\text{соответственно, } T_0 = \sum_{i=1}^{10} \frac{T_i}{10}.$$

По полученным результатам строили зависимости среднего значения шага и относительного отклонения среднего шага измеряемой пары выступов от положения образца вдоль оси X (рис. 2, 3).

Экспериментальные результаты. На рис. 1, а, б приведены видеоизображение в РЭМ исследуемой шаговой структуры и пример усредненной (просуммированной по двадцати строкам) одной из кривых видеосигнала в медленных вторичных электронах. На рис. 2 представлена



a



б

Рис. 1. РЭМ-изображение исследуемой шаговой структуры (*a*) и пример усредненной (просуммированной по двадцати строкам) кривой видеосигнала 8-го и 9-го выступов в медленных вторичных электронах (*б*)

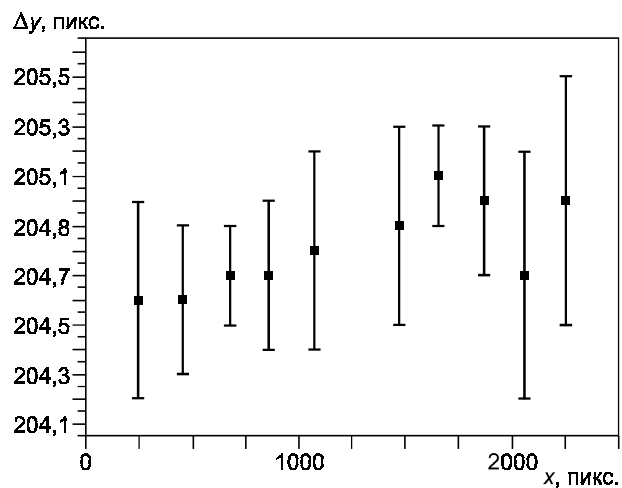


Рис. 2. Зависимость среднего значения шага Δy от координаты исследуемого участка x на изображении

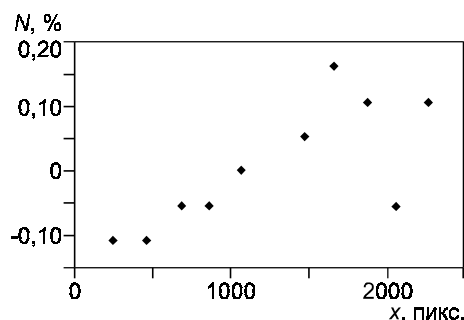


Рис. 3. Зависимость относительного отклонения среднего шага измеряемой пары выступов N от координаты исследуемого участка x на изображении

зависимость среднего шага упомянутой пары выступов от координаты участка структуры, на котором производили измерения, на рис. 3 – зависимость относительного отклонения среднего шага измеряемой пары выступов от координаты исследуемого участка на изображении.

Как следует из рис. 3, N зависит от положения измеряемого элемента на поле изображения.

В качестве интегрального показателя нелинейности, характеризующего все изображение, примем величину Z как

$$Z = \max |N_i| = \left[\max |T_i - T_0| \right] / T_0. \quad (1)$$

Значение Z , рассчитываемое по (1), составляет 0,2 %. В бюджет неопределенности Z не вносят вклада неопределенности, связанные с

калибровкой РЭМ, использованного для измерений, и калибровки структуры. Речь идет об относительном изменении действительного значения коэффициента увеличения по полю зрения. На практике объект может располагаться в произвольном месте поля изображения, поэтому оценка неопределенности Z , характеризующей нелинейность, может быть оценена по типу A . Обработка полученных результатов для расширенной неопределенности Z (коэффициент охвата 2) дала значение 0,2 %. С учетом этого можно утверждать, что значение Z не выше 0,4 %.

Пределы допускаемой относительной погрешности измерений линейных размеров с помощью РЭМ обычно составляют 1 – 10 %. Таким образом, вклад нелинейности развертки в суммарную погрешность для данного РЭМ незначителен. С другой стороны, необходимо подчеркнуть, что данный параметр может меняться как от модели к модели РЭМ, так и при переходе к другим экземплярам данной модели. В настоящее время количественный показатель, характеризующий нелинейность развертки микроскопа, отсутствует среди метрологических характеристик этого прибора. По мнению авторов должен быть введен в номенклатуру метрологических характеристик, поскольку с повышением точности линейных измерений в нанометровом диапазоне он может стать значимым источником систематической погрешности измерений.

Проведенные исследования показали, что в настоящее время, при настоящем уровне точностных показателей линейных измерений с помощью растрового электронного микроскопа, на РЭМ S-4800 при $5\times$ увеличении отсутствует значимая нелинейность сканирования в направлении строчной развертки. При этом широко используемая для калибровки РЭМ эталонная мера МШПС-2.0К может быть эффективно использована и для количественной оценки нелинейности развертки микроскопа.

Работа проводилась при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации с использованием оборудования Центров коллективного пользования МФТИ и НИЦПВ (государственный контракт № 16.552.11.7038).

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. ГОСТ Р 8.628–2007. ГСИ. Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к геометрическим формам, линейным размерами выбору материала для изготовления.

Дата принятия 26.06.2012 г.