

## Применение метода сложного отношения в широкодиапазонных измерительных приборах

О. А. ЦЫБУЛЬСКИЙ

ЗАО «Промсервис», Димитровград, Россия, e-mail: multimer@promservis.ru

*Рассмотрена функция преобразования широкодиапазонного измерительного прибора, полоса предельной погрешности которого нормирована трехчленной формулой. Показана целесообразность применения метода сложного (двойного) отношения для повышения точности преобразования широкодиапазонного прибора.*

**Ключевые слова:** широкодиапазонное преобразование, метрологические характеристики прибора.

*Conversion function of a wide-range measurement instrument with a limiting error band set by a trinomial formula is considered. Application of the complex (double) ratio method for conversion function factors determination is grounded.*

**Key words:** wide-range conversion, metrology descriptions of device.

Нормируемую предельную погрешность в настоящее время задают в виде двухчленной формулы с полосой погрешности, состоящей из аддитивной и мультипликативной составляющих погрешности. Чем шире диапазон прибора, тем в большей степени проявляется несогласованность реальной полосы погрешности прибора с аддитивно-мультипликативным способом нормирования предельной погрешности. Это вынуждает при нормировании погрешности использовать поддиапазоны. В [1] показано, что вместо использования поддиапазонов предельную относительную погрешность линейных широкодиапазонных приборов более адекватно представить трехчленной формулой

$$\delta X = \delta_a X_H / X + \delta_m + \delta_r X / X_B, \quad (1)$$

где  $X$ ,  $X_H$ ,  $X_B$  — соответственно значения измеряемой величины, нижней и верхней границ диапазона измерения;  $\delta_a$ ,  $\delta_m$ ,  $\delta_r$  — соответственно аддитивная, мультипликативная и нелинейная (гиперболическая) составляющие погрешности.

Учет нелинейной составляющей в выражении, описывающем предельную погрешность широкодиапазонного прибора, позволяет исключить поддиапазоны при нормировании этой погрешности. Если реальная полоса предельной погрешности соответствует трехчленной формуле, то каким должно быть уравнение измерения широкодиапазонного прибора, чтобы полоса его погрешности квантования была пропорциональной частью предельной полосы погрешности, соответствующей трехчленной формуле (1)?

В [2, 3] показано, что если предельная погрешность линейного широкодиапазонного прибора нормируется формулой (1), то реальная функция преобразования этого прибора является дробно-линейной

$$(X - X_1)(X_H - X_2) / [(X - X_2)(X_H - X_1)] = K, \quad (2)$$

где  $X_1$ ,  $X_2$  — действительные корни квадратного уравнения, левая часть которого описывает полосу предельной абсолютной погрешности этого прибора с помощью трехчленной формулы

$$\delta_a X_H + \delta_m X + \delta_r X^2 / X_B = 0;$$

$K$  — выходной код преобразования, шкала квантования которого в зависимости от соотношения корней квадратного уравнения может иметь или аддитивную линейную, или экспоненциальную (мультипликативную) шкалу, заданную, на

пример, в виде  $K = e^{\delta_m N}$ , где  $N = 0, 1, \dots, N_{\max}$ . В этом случае полоса погрешности квантования будет пропорциональна полосе предельной погрешности, нормируемой трехчленной формулой, во всем диапазоне измерения. Если уравнение измерения широкодиапазонного прибора представлено в виде дробно-линейной функции (2), то для повышения точности этого прибора можно эффективно использовать метод сложного отношения, областью применения которого являются приборы с дробно-линейной функцией преобразования.

Впервые метод сложного отношения применен в измерительной технике В. Д. Мазиным [4] для повышения точности параметрических измерительных преобразователей и в дальнейшем подробно исследован в [5]. Приложение метода сложного отношения к аналого-цифровым преобразователям с дробно-линейной функцией преобразования рассмотрено в [6].

Метод позволяет эффективно повысить точность измерения прибора, снижая при этом требования к точности и долговременной стабильности элементов тракта преобразования сигнала. Суть метода состоит в постоянстве сложного отношения четырех произвольных точек измерительной шкалы при их проективном измерительном преобразовании одной величины в другую.

Зададим на шкале измеряемой величины  $X$  четыре произвольных точки  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$ ,  $X$ . Выполним преобразование прибором этих четырех точек шкалы и получим значения выходных кодов  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ ,  $K$ . Тогда будет выполняться соотношение

$$\frac{(X_3 - X_1)(X - X_2)}{(X_3 - X_2)(X - X_1)} = \frac{(K_3 - K_1)(K - K_2)}{(K_3 - K_2)(K - K_1)} = W. \quad (3)$$

Величина  $W$  сложного (двойного) отношения четырех точек шкалы является инвариантом проективного (дробно-линейного) преобразования, так как при любом проективном преобразовании шкалы  $X$  в шкалу  $K$  сложное отношение произвольной группы четырех точек шкалы  $X$  равно сложному отношению соответствующих точек шкалы  $K$ . Используя выходные коды для расчета сложного отношения, значение измеряемой величины можно определить по формуле

$$X = [X_2(X_3 - X_1) - WX_1(X_3 - X_2)] / [(X_3 - X_1) - W(X_3 - X_2)]. \quad (4)$$

Сравнение формул (2) и (3) показывает, что уравнение измерения (2) широкодиапазонного измерительного прибора, полоса погрешности которого нормируется трехчлен-

ной формулой (1), имеет тот же вид, что и уравнение преобразования методом сложного отношения.

Следовательно, метод сложного отношения можно эффективно применять для повышения точности линейных широкодиапазонных приборов, полоса погрешности которых нормируется трехчленной формулой (1).

Формулу (4) можно привести к более привычному виду уравнения измерения, связывающего между собой входную и выходную величины. Тогда коэффициенты функции преобразования можно рассчитывать не при каждом измерении, а с учетом интервала стабильности этих коэффициентов. Применим обозначения

$$\gamma_x = (X_3 - X_1)/(X_3 - X_2), \quad \gamma_k = (K_3 - K_1)/(K_3 - K_2),$$

называемые простым отношением трех точек шкалы, и после преобразований получим уравнение измерения в виде дробно-линейной функции, связывающей напрямую входную и выходную величины измерительного преобразования

$$X = (a_0 + a_1K)/(b_0 + b_1K),$$

$$\text{где } a_0 = \frac{\gamma_k K_2 X_1 - \gamma_x K_1 X_2}{\gamma_k K_2 - \gamma_x K_1}; \quad a_1 = \frac{\gamma_x X_2 - \gamma_k X_1}{\gamma_k K_2 - \gamma_x K_1}; \quad b_0 = 1;$$

$$b_1 = \frac{\gamma_x - \gamma_k}{\gamma_k K_2 - \gamma_x K_1}.$$

В частном случае при  $\gamma_x = \gamma_k$  получим линейную форму уравнения измерения.

Таким образом, если полоса предельной погрешности широкодиапазонного прибора нормируется трехчленной формулой (1), то в таком приборе для повышения точности измерения можно применять метод сложного отношения.

#### Л и т е р а т у р а

1. **Цыбульский О. А.** Погрешность широкодиапазонных измерений // Законодательная и прикладная метрология. 2010. № 4. С. 5—10.

2. **Цыбульский О. А.** Инварианты измерительного преобразования // Законодательная и прикладная метрология. 2011. № 1. С. 22—26.

3. **Цыбульский О. А.** Проективные свойства широкодиапазонных измерений // Измерительная техника. 2013. № 1. С. 27—29.

4. **Мазин В. Д.** Способ повышения точности измерительных приборов и преобразователей // Измерительная техника. 1980. № 6. С. 14—15; **Mazin V. D.** Method for raising the precision of measuring instruments and transducers // Measurement Techniques. 1980. V. 23. N 6. P. 479—480.

5. **Мазин В. Д.** Геометрические аспекты измерений: Автореф. дис. на соиск. учен. степ. докт. техн. наук. СПб, 1994.

6. **Цыбульский О. А.** Аналого-цифровые преобразователи с гиперболической шкалой (теория и способы построения): Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. Л., 1989.

Дата принятия 08.11.2012 г.

## НАНОМЕТРОЛОГИЯ

621.382

### Искажение профиля рельефных элементов на поверхности монокристаллического кремния в результате их контаминации в низковольтном растровом электронном микроскопе

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

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

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

Представлены результаты исследований влияния контаминации в растровом электронном микроскопе S-4800 при энергии электронов 1 кэВ на профиль рельефных элементов меры МШПС-2.0К. Показано, что после электронного облучения наблюдаемая ширина верхнего основания рельефных элементов увеличивается в зависимости от дозы облучения при его разных режимах.

**Ключевые слова:** контаминация, низковольтный растровый электронный микроскоп (РЭМ), рельефные элементы, доза электронного облучения.

The results of study of the contamination effect of in S-4800 SEM at electron energy 1 keV on the profile of relief elements of the MSHPS-2.0K measure are presented. It is shown that the electron irradiation leads to increase of the relief elements upper base subject to the electron irradiation dose at different irradiation modes.

**Key words:** contamination, low voltage scanning electron microscope (SEM), relief elements, electron irradiation dose.

Растровые электронные микроскопы (РЭМ) широко используют для измерений геометрических параметров объектов в микро- и нанометровом диапазоне. Их применение

особенно актуально, в частности, в микроэлектронной промышленности, где обычной практикой является использование низковольтного РЭМ для контроля фоторезистов.