

Література

1. Нестер, С. Вредители и болезни сахарной свеклы [Текст] / С Нестер // «Настоящий хозяин». Ежемесячный агрожурнал. – 2005. - №10 – С. 13-22.
2. Черенков, А. Д. Применение информационных электромагнитных полей в технологических процессах сельского хозяйства [Текст] / Черенков А. Д., Косулина Н. Г. // Светотехника та електроенергетика. – 2005. - №5 – С. 77-80.
3. Жукова, П. С. Регуляторы роста и гербициды [Текст] / П. С. Жукова // «Урожай». – 1990. – С. 165.
4. Анго А. Математика для электро- и радионинженеров [Текст] / А. Анго. – М.: Наука, 1965. – 778 с.

Abstract

In this paper a mathematical model was developed to describe the process of diffraction of monochromatic electromagnetic radiation on bio sugar beet seeds. Radiation was modelled by dielectric body with a spherical boundary-dimensional surface exposed to small perturbations overload. The analysis of model is based on two methods - generalized method of oscillations and perturbation method.

By theoretical studies the characteristic equation was obtained for determining the frequency of the exciting electromagnetic wave in which the amplitude of the electric field within the sugar beet seed takes on the maximum value.

The calculated value of the resonance frequency of EMF for sugar beet seed allows along with other parameters of the EMF to increase yields of sugar beet through presowing its seeds

Keywords: sugar beet seeds, frequency EMF, seed dressing

В статті проведено аналіз основних складових невизначеності при калібруванні растрових електронних наноскопів в нанометровому діапазоні вимірювання та визначено шляхи підвищення точності калібрування, побудови альтернативних стандартних зразків з меншою невизначеністю нормованих параметрів

Ключові слова: растровий електронний наноскоп, калібрування, невизначеність

В статье проведен анализ основных составляющих неопределенности при калибровке растровых электронных наноскопов в нанометровом диапазоне измерения и определены пути повышения точности калибровки, построения альтернативных стандартных образцов с меньшей неопределенностью нормируемых параметров

Ключевые слова: растровый электронный наноскоп, калибровка, неопределенность

УДК 006.91:621.385.833.28

ОЦІНЮВАННЯ СКЛАДОВИХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ПРИ КАЛІБРУВАННІ РАСТРОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ НАНОСКОПІВ

А.С. Шантир

Аспірант

Кафедра автоматизації експериментальних досліджень
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»
пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056
Контактний тел.: 050-837-39-59
E-mail: anton.shantyr@gmail.com

1. Вступ

На сьогодні сотні компаній в різних країнах ведуть дослідження у галузі нанотехнологій, використовують або створюють нанопродукти.

Серед них Intel, IBM, Hewlett-Packard, General-Electric, Motorola, Sony, Siemens, Xerox; такі компанії, як NEC, Mitsubishi Electric активно інвестують в нанотехнологічні стартапи. Важливою задачею нанотехнологій, зокрема в галузі наноелектроні-

ки, є розробка інтегральних схем з нанометровими технологічними розмірами і продуктів на основі наноелектронної елементної бази. Для прикладу, в найближчому майбутньому довжина затвору транзистора наблизиться до 14 nm, що робить очевидним проблеми пов'язані з забезпеченням певного рівня точності [1, 2] – якість нанопродукції залежить від точності вимірювання характеристик елементів розміри яких відповідають граничним технологічним можливостям.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Міжнародною організацією International SEMATECH розроблено маршрутну карту ITRS [3], в якій відображено зміни точностних вимог у відповідності до зменшення критичних розмірів напівпровідникових елементів. В табл. 1 наведена залежність точностних характеристик вимірювання і контролю критичних розмірів від їх рівня, у відповідності до маршрутної карти ITRS. Загалом контроль та вимірювання для потреб наноелектроніки мають забезпечуватися з точністю кращою ніж 1% від критичного розміру [3].

Таблиця 1

Маршрутна карта ITRS: метрологія літографії

Показник	Рівень критичного розміру, nm					
	180	130	100	70	50	35
Технологічний вузол						
Контроль критичних розмірів після травлення, nm	14	8	6	5	3	2
3σ для контролю критичних розмірів (для одиночної лінії при T/P=0,2), nm	2,4	1,6	1,2	1	0,5	0,4
Контроль суміщення (середнє значення + 3σ), nm	65	45	35	25	20	14
Точність суміщення (при T/P=0,1), nm	6,5	4,5	3,5	2,5	2	1,4
T/P – рівень запланованої при виготовленні відносної похибки						

Вирішення задачі вимірювання лінійних розмірів в нанометровому діапазоні потребує відповідного інструментального забезпечення. Серед існуючих засобів вимірювань в нанометровому діапазоні широкого використання набули растрові електронні наноскопи (ПЕН, англ. SEN – Scanning Electron Nanoscope) завдяки свої універсальності [4]. З використанням ПЕН досліджують структури масивних тіл товщиною більшою 1 μm, зокрема, монокристали нанесені на підложку. Системи на базі ПЕН використовуються з технологічною метою – виготовлення наносхем з шириною лінії ~1..10 nm (на відміну від роздільної здатності під шириною лінії мають на увазі мінімальний розмір елементу, який можна отримати з заданою точністю) методом електронної літографії [2].

Довіра до результатів вимірювання та забезпечення їх простежуваності є обов'язковими умовами використання ПЕН для вимірювання лінійних розмірів. Це реалізується калібруванням ПЕН з використанням спеціально створених стандартних зразків, які є стійкими до вакууму (необхідного для отримання граничної роздільної здатності ~0,1 nm) та інших критичних умов (атомарна роздільна здатність досягається при енергії пучка електронів порядку 300 KeV). Стандартні зразки є мобільними, оскільки ПЕН не є транспортабельними і потребують оцінювання точностних характеристик на місці використання, без розбору-збору.

3. Мета та задачі дослідження

Метою даної статті є створення апіорної інформації про складові невизначеності при вимірюваннях в нанометровому діапазоні для забезпечення вирішення

задачі підвищення точності калібрування ПЕН з використанням стандартних зразків з відомими розмірами структурних елементів, та виявлення можливості побудови альтернативних стандартних зразків.

4. Модель вимірювального сигналу ПЕН

Вимірювання лінійних розмірів зазвичай виконується ПЕН в режимі збору вторинних електронів, інтенсивність відбитого потоку яких відповідає рельєфу поверхні. Сигнал вторинних електронів містить три складові:

- вибиті з поверхні електрони SE_1 ,
 - генеровані зворотно-розсіяними електронами під час їх виходу зі зразка SE_2 ,
 - генеровані зворотно-розсіяними електронами під час ударів о стінки камери де розміщено зразок SE_3 .
- Загалом вимірювальний сигнал ПЕН $SE(x)$ можна подати у вигляді

$$SE(x, t) = SE_1(x, t) + SE_2(x, t) + SE_3(x, t) + N(x, t),$$

де $N(x, t)$ – складова сигналу обумовлена джерелами невизначеності розглянутими далі, x – координата поверхні досліджуваного зразка в момент часу t . Розподіл вимірювального сигналу ПЕН є наближеним до нормального (рис. 1), тому його доцільно, з міркувань оптимізації обчислень, представити рядом Еджворта:

$$P_{SE}(x_{norm}) = \phi(x_{norm}) + \sum_{l=1}^{\infty} E_l(x_{norm}),$$

де x_{norm} – нормована змінна, зв'язана з аргументом функції

$$SE(x, t = const) \text{ співвідношенням } x_{norm} = \frac{x - m_{SE}}{\sigma_{SE}},$$

x – поточне значення кількості вторинних електронів $SE(x, t = const)$,

m_{SE} – математичне очікування $SE(x, t = const)$,

$\sigma_{SE} = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_i (SE_i - \overline{SE})^2}$ – середньоквадратичне відхилення $SE(x, t = const)$,

$$\phi(x_{norm}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x_{norm}^2}{2}} \text{ – стандартизований нормальний розподіл щільності ймовірності,}$$

$E_l(z)$ – член ряду Еджворта з номером l ,

$$E_1(z, \gamma_1) = -\frac{\gamma_1}{3!} \phi'''(z),$$

$$E_2(z, \gamma_1, \gamma_2) = \frac{\gamma_2}{4!} \phi^{IV}(z) + \frac{10\gamma_1^2}{6!} \phi^{VI}(z) \text{ и т.д.,}$$

γ_1, γ_2 – коефіцієнти асиметрії та ексцесу відповідно.

Середнє значення числа вторинних електронів на один електрон з потоку зонду називається виходом вторинних електронів і зазвичай варіює в діапазоні від 0,1 до 10 для різних матеріалів. Слід зазначити, що підвищення напруги прискорення E_0 зменшує ефективний діаметр електронного зонда (збільшує роздільну здатність), але призводить до збільшення вкладу складових SE_2 та SE_3 в сумарний сигнал мало впливаючи власне на генерацію вторинних електронів.

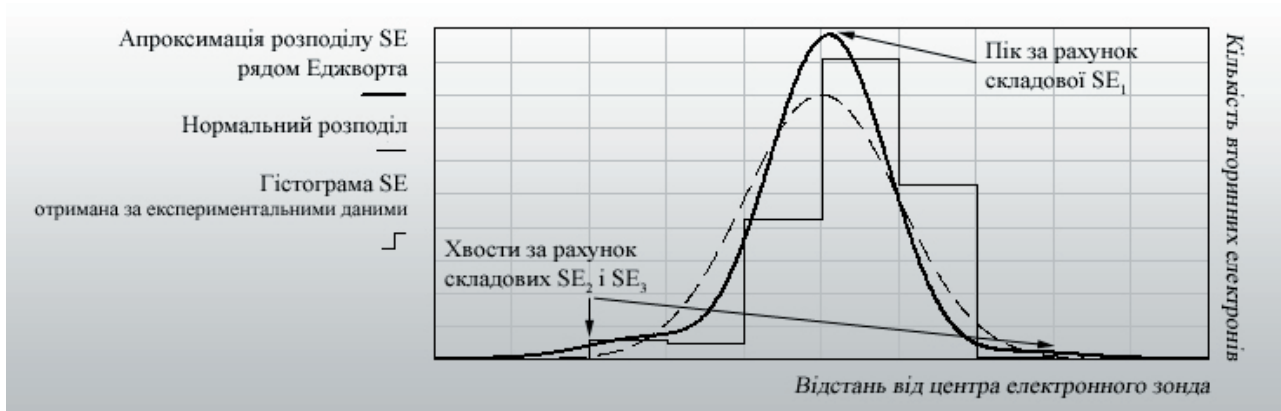


Рис. 1. Розподіл сигналу вторинних електронів та його складові

Вторинна електронна емісія рельєфної поверхні твердого тіла має нелінійний характер, відносно геометричних параметрів досліджуваних структур і РЕН. Також мають місце механізми генерації вторинних повільних електронів, обумовлені емісією електронів з поверхневих станів (під дією первинних електронів, які перетинають поверхню за напрямком з вакууму в тверде тіло) [3]. Тому функції $SE_i(x,t)$ є нелінійними.

При взаємодії електронного зонда та зразка мають місце крайові ефекти, які змінюються в залежності від позиції електронного зонда відносно зразка. Детектори вторинних електронів зазвичай розташова-

ні з одного боку, що посилює топографічні ефекти. Площини зразка зорієнтовані до детектора, виглядатимуть світлішими у порівнянні з площинами зорієнтованими від детекторів – кількість вторинних електронів N_2 , у випадку зорієнтованої площини до детектора (рис. 2а), більша за кількість вторинних електронів N_1 , у випадку поверхні перпендикулярній напрямку падіння потоку первинних електронів (рис. 2б). Ця проблема зазвичай вирішується конструктивно, використанням додаткового детектора, або програмно, використанням відповідних алгоритмів обробки вимірювального сигналу.

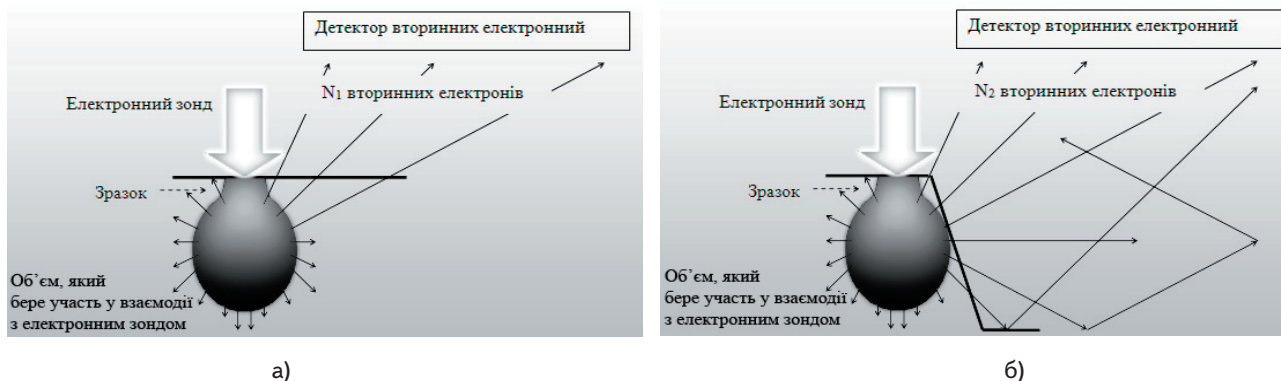


Рис. 2. Детектування вторинних електронів

5. Складові невизначеності при калібруванні РЕН

Невизначеність досліджуваних зразків

В нанометровому діапазоні вимірювання особливого значення набуває невизначеність досліджуваного зразка та підходи до її оцінки. Нехай наявні два джерела невизначеності: невизначеність обумовлена недосконалістю вимірювання U_1 та невизначеність об'єкту вимірювання U_2 . Розширена невизначеність U_2 є незначною на рівні $(1-\alpha)$ по відношенню до розширеної невизначеності U_1 , якщо сумарна розширена невизначеність $\sqrt{U_1^2 + U_2^2}$ перевищує U_1 не більше ніж на α .

Таким чином, $U_2 = k \cdot U_1$, де k – числовий коефіцієнт.

Тоді граничне значення знаходимо з рівності

$$\sqrt{U_1^2 + (k \cdot U_1)^2} = (1 + \alpha) \cdot U_1.$$

Проаналізуємо рівність:

$$U_1^2 + (k \cdot U_1)^2 = (1 + \alpha)^2 \cdot U_1^2,$$

$$1 + k^2 = (1 + \alpha)^2 \Rightarrow 1 + k^2 = 1 + 2 \cdot \alpha + \alpha^2 \Rightarrow k = \sqrt{2 \cdot \alpha + \alpha^2}.$$

Критерій незначущості ϵ

$$U_2 \leq k \cdot U_1 = \sqrt{2 \cdot \alpha + \alpha^2} \cdot U_1 \Rightarrow U_1 \geq \frac{U_2}{\sqrt{2 \cdot \alpha + \alpha^2}}.$$

Прийmemo $U_{2(\alpha=0,1)} = 111 \cdot 10^{-12}$ (ковалентний радіус атома кремнію), тоді $U_1 \geq 0,24$ нм. Таким чином, вимірювання в нанометровому діапазоні не можуть бути виконані з $U(P \approx 0,9) \leq 0,24$ нм за умови, що час вимірювання прямує до 0.

Метрологічні характеристики стандартних зразків зазвичай зводяться до невизначеності відтворення лінійний розмірів характерних елементів, які унікальними для кожного зразка. Для кремнієвих мір метрологічні характеристики не є сталими внаслідок взаємодії з електронним зондом (ресурс таких зразків мір складає порядку 100 вимірювань), оскільки на їх поверхні виникає оксидна та контамінаційна плівка, яка змінює розміри профілю рельєфу, та діелектрична плівка, яка вносить викривлення в отримане на РЕН зображення (рис. 3). Діелектричні зразки позбавлені цих недоліків.

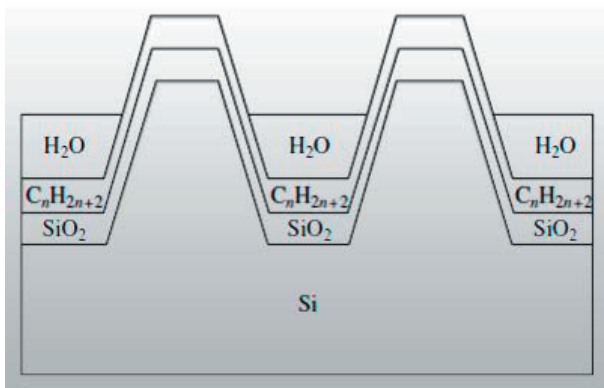


Рис. 3. Схема трапецієвидного профілю розрізу кремнієвої лінійної міри та плівки на її поверхні

Невизначеність обумовлена взаємодією вимірювального впливу і досліджуваного зразка

Більшість досліджуваних зразків має неоднорідну структуру, тобто містить в своєму складі різні хімічні елементи, які мають різні коефіцієнти вторинної електронної емісії. Коефіцієнт залежить від природи матеріалу поверхні, енергії первинних електронів та їх кута падіння на поверхню. У напівпровідників і діелектриків цей коефіцієнт більший ніж у металів. Це пояснюється тим, що в металах, де концентрація електронів провідності велика, вторинні електрони, часто стикаючись з ними, втрачають свою енергію і не можуть вийти з металу. В напівпровідниках і діелектриках через малу концентрацію електронів провідності зіткнення вторинних електронів з ними відбуваються набагато рідше і ймовірність виходу вторинних електронів зростає в кілька разів.

При дослідженні зразка, в якому розмір ділянок різних елементів менший за роздільну здатність РЕН, невизначеність результату вимірювання у вертикальній площині буде значною. Якщо роздільна здатність РЕН менша за розміри ділянок різних елементів невизначеність також зростатиме, проте природа її буде іншою. Найменшою невизначеність буде при дослідженні однорідних зразків.

Невизначеність обумовлена первинним вимірювальним перетворенням

Для детектування вторинних електронів зазвичай використовуються детектори Еверхарта-Торнлі. Детектор складається з сцинтилятора всередині сітки Фарадея всередині камери РЕН. Оскільки енергія вторинних електронів дуже мала (<50 eV) позитивна напруга (80..250 V) подається на сітку Фарадея, що уможливорює їх вхід всередину сітки. Ефективність

збору електронів становить майже 100%. Великий позитивний потенціал (10..12 kV) підводиться до верхньої сцинтилятора, який покритий тонкою металеву плівкою. Взаємодія прискорених електронів з сцинтилятором продукує фотони, які шляхом повного внутрішнього відбиття у світловоді проводяться до фотоелектронного помножувача. Високий коефіцієнт посилення фотоелектронного помножувача ($10^5..10^6$) забезпечує низький рівень шумів та широкосмугове посилення. Оскільки детектор збирає всі низькоенергетичні електрони в камері РЕН, загальний сигнал складається з трьох складових – SE_1 , SE_2 , SE_3 (описаних вище). Таким чином, створена вимірювальна інформація описує вторинні та зворотно-розсіяні електрони. В цілому детектор Еверхарта-Торнлі забезпечує відмінні легко впізнаванні топографічні зображення, проте його використання для вимірювання лінійних розмірів мало досліджене. [4]

Вихідний сигнал детектора Еверхарта-Торнлі потребує певної обробки, яка має на меті виділення інформативної (при вимірювання лінійних розмірів) складової SE_1 та усунення впливу складових SE_2 , SE_3 , які збільшують невизначеність вимірювання.

Невизначеність обробки вимірювального сигналу

При обробці вимірювального сигналу з виходу детектора Еверхарта-Торнлі вносяться наступні складові невизначеності:

- невизначеність обумовлена аналоговим перетворенням вимірювального сигналу наноскопу. Аналогові перетворення вимірювального сигналу для мінімізації невизначеності, зводяться до нормалізації сигналу для подачі на вхід аналого-цифрового перетворювача;

- невизначеність обумовлена аналого-цифровим перетворенням. Оцінюється традиційними методами виходячи з характеристик (кількість розрядів, основна та додаткова похибки, час встановлення вихідного сигналу при зміні вхідного і т. д.) аналого-цифрового перетворювача що використовується.

- невизначеність обумовлена попередньою цифровою обробкою вимірювального сигналу наноскопу. Попередня обробка зазвичай представлена фільтрацією, яка має на меті згладжування сигналу без викривлення його форми.

Суб'єктивна невизначеність

Суб'єктивна невизначеність обумовлена неможливістю точного визначення координат контрольних точок на отриманому зображенні, які відповідають характерним точкам зразка, за якими визначаються нормовані геометричні розміри його елементів.

На величину суб'єктивної невизначеності значною мірою впливають методи формування та обробки зображення (зазвичай реалізовані програмно), за яким вимірюються лінійні розміри. При визначенні координат оператором суб'єктивна складова сумарної невизначеності може значно перевищувати граничне значення роздільної здатності, для сучасних засобів наноскопії приймемо $U_{sub}(P=0,99) > ds \approx 1 \text{ nm}$. Розподіл величини суб'єктивної похибки можна прийняти за нормальний.

Для усунення впливу оператора на результати вимірювань в сучасних РЕН використовуються автоматизовані алгоритми. Однак, в основі існуючих алгоритмів не лежать фізично обґрунтовані уявлення про механізми формування відеосигналу в РЕН – не

враховуються апріорні відомості про вимірювальний сигнал.

6. Оцінювання та мінімізація невизначеності калібрування РЕН

При оцінюванні сумарної невизначеності результату вимірювання або калібрування РЕН, розглянути вище складові невизначеності можна вважати взаємозалежними, та вважати правдивим припущення про відсутність домінуючих складових.

У загальному бюджеті невизначеності на операції калібрування масштабного коефіцієнту РЕН доцільно відводити не більше третини від допуску на розміри елементів досліджуваного зразка. Досягнута нині невизначеність калібрування $\sim 1\%$ для нанометрового діапазону.

Ця невизначеність покриває весь ресурс невизначеності у відповідності з картою ITRS. Це доводить необхідність досліджень з метою мінімізації невизначеності обробки вимірювального сигналу, суб'єктивної невизначеності та досліджень з метою побудови альтернативних зразків, позбавлених описаних вище недоліків.

Тому перспективними видається використання фільтрації Калмана, та фільтрації на основі короткохвильового перетворення, з метою зменшення вказаних складових невизначеності, які дозволяють:

- зменшити рівень шумів,
- встановити обмеження на декількох рівнях розкладу з врахуванням конкретних шумових характеристик і сигналів.

Також можливе використання перетворювачів на поверхневих акустичних хвилях в якості стандартних зразків, функція перетворення яких залежить від їх геометричних параметрів, з метою зменшення невизначеності власне стандартного зразка. Таким чином, подаючи на перетворювач відомий тестовий сигнал і вимірюючи інформативні параметри сигналу на виході можна контролювати геометричні параметри (або їх зміну) перетворювача перед кожним сеансом калібрування РЕН.

7. Висновки

Проаналізовано основні джерела невизначеності при калібруванні растрових електронних наноскопів в нанометровому діапазоні вимірювання.

Показано можливі шляхи підвищення точності калібрування з використанням стандартних зразків з відомими розмірами структурних елементів впровадженням відповідної обробки вимірювального сигналу.

Показані можливості побудови альтернативних стандартних зразків.

Література

1. Groeseneken G. ESD solutions in sub-14 nm CMOS: from ESD device development to IO solutions [Електронний ресурс] / G. Groeseneken // Metrology & Characterization competence center. – 2012. – Режим доступу: http://www2.imec.be/be_en/education/phd/metrology-and-characterization/esd-solutions-in-sub-14-nm-cmos.html. – Назва з екрану.
2. Андриевский, Р. Линейная мера микрометрового и нанометрового диапазонов для растровой электронной и атомно-силовой микроскопии / Р. Андриевский // Наноиндустрия. – 2007. – №3 – С. 12–16.
3. The International Technology Roadmap for Semiconductors [Електронний ресурс]. – 2012. – Режим доступу: <http://www.itrs.net/>. – Назва з екрану.
4. Scanning Electron Microscope Laboratory [Електронний ресурс]. – 2011. – Режим доступу: <http://www4.nau.edu/microanalysis/>. – Назва з екрану.

Abstract

Nowadays, hundreds of companies in different countries conduct the researches in the field of the nanotechnology, use or create nanoproductions. The important task of the nanotechnologies, particularly in the field of the nanoelectronics, is the development of the integrated circuits with the nanometer technological sizes and products based on the nanoelectronic components, whose quality depends on the accuracy of measurement of the characteristics of elements, whose sizes correspond to limiting technological capabilities. The model of the measuring signal of the scanning electron nanoscope was suggested. The uncertainty of the samples, which were studied in the nanoscopes, were estimated and the change of their characteristics during the measurement was described. The main sources of uncertainty were analyzed by the calibration of the scanning electron nanoscopes in the nanometer range of the measurement. The possible ways to improve the accuracy of the calibration using standard samples with known sizes of the structural elements were shown by the introduction of the appropriate processing of the measuring signal. The possibilities of construction of alternative standard samples were shown. The results can be used to develop new methods of the calibration of the scanning electron nanoscopes and standard samples of the nanometer range

Keywords: scanning electron nanoscope, calibration, uncertainty