



ДЕРЖАВНА СЛУЖБА
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ
ВЛАСНОСТІ
УКРАЇНИ

УКРАЇНА

(19) UA

(11) 97893

(13) C2

(51) МПК

G01B 11/02 (2006.01)

(12) ОПИС ДО ПАТЕНТУ НА ВИНАХІД

(21) Номер заявки:	а 2010 12212	(72) Винахідник(и):	Кондратов Владислав Тимофійович (UA)
(22) Дата подання заявки:	15.10.2010	(73) Власник(и):	ІНСТИТУТ КІБЕРНЕТИКИ ІМ. В.М. ГЛУШКОВА НАН УКРАЇНИ,
(24) Дата, з якої є чинними права на винахід:	26.03.2012		вул. Академіка Глушкова, 40, м. Київ-187, 03187 (UA)
(41) Публікація відомостей про заявку:	25.11.2010, Бюл.№ 22	(56) Перелік документів, взятих до уваги експертизою:	SU 1262280 A1, 07.10.1986 RU 2134864 C1, 20.08.1999 US 5445011 A, 29.08.1995 WO 8604676, 14.08.1986 DE 4408226 A1, 11.09.1995 CN 101799273 A, 11.08.2010 Новиков Ю.А., Раков А.В., Тодуа П.А. Нанотехнология и нанометрология // Труды Института общей физики им. А.М.Прохорова. - 2006. - Т. 62. - С.3-13
(46) Публікація відомостей про видачу патенту:	26.03.2012, Бюл.№ 6		

(54) СПОСІБ НАДЛИШКОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ЛІНІЙНИХ РОЗМІРІВ НАНООБ'ЄКТІВ

(57) Реферат:

Винахід належить до вимірювальних засобів для створення високоточних цифрових вимірювачів лінійних розмірів нанооб'єктів. Спосіб надлишкових вимірювань лінійних розмірів нанооб'єктів полягає у опроміненні зображення нанооб'єкта потоком випромінювання заданої потужності Φ_0 та довжини хвилі λ_0 з вузькою спектральною смугою, формуванні первинного просторового оптичного образу нанооб'єкта, оптичному підсиленні його у $k_{оп}$ рази, оптико-електронному закономірному перетворенні просторового первинного оптичного образу у просторовий дискретно-аналоговий сигнал, інтегруванні його протягом заданого проміжку часу, підсиленні у k_e рази та аналого-цифровому перетворенні просторового дискретно-аналогового сигналу у масив даних, упорядкованому запам'ятовуванні, зворотному перетворенні цих даних у збільшений за розмірами вторинний оптичний образ, додатковому формуванні на екрані дисплею і суміщенні з отриманим вторинним оптичним образом зображень двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал з відповідними числовими мітками і визначенні значення довжини за числовими мітками шкал або за координатною сіткою з апіорі пронормованими розмірами сторін квадратів. Спочатку встановлюють перше нормоване значення $S_{п1}$ коефіцієнта перетворення зображення, опромінюють наноміру довжини, зображення первинного оптичного образу наноміри довжини у вигляді вертикальних смуг рівної товщини підсилюють у $S_{п1}$ рази і перетворюють у вторинний образ з нормованим за значенням кроком $\Delta l_1 \{ \Delta l_1 \} = S_{п1} \{ \Delta l(\lambda_1) \}$ електронним способом змінюють масштаб основних міток двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал доти, доки значення відстані Δl_0 між сусідніми мітками шкал стане рівним підсиленому у $S_{п1}$ рази значенню відстані $\Delta l(\lambda_1)$ між паралельними вертикальними смугами наноміри довжини, тобто до $\{ \Delta l_{01} \} = 0,1 \{ \Delta l_1 \} = 0,1 k_{п1} \{ \Delta l(\lambda_1) \}$, суміщують

UA 97893 C2

початок координат з однією з вертикальних смуг вторинного образу наноміри довжини, ділять розміри квадратів отриманої координатної сітки на десять частин $\{\Delta l_{01}\} = 0,1\{\Delta l_1\} = 0,1k_{m1}\{\Delta l(\lambda_1)\}$ і штучно утворюють додаткову дрібну сітку з нормованим за значенням кроком $\{\Delta l_{01}\}_{nm} \times \{\Delta l_{01}\}_{nm}$, запам'ятовують отримане на екрані дисплея графічне зображення шкал з основною та додатковими координатними сітками, заміщають наноміру довжини другою наномірою з лінійним розміром довжини l_0 , яка вибирається за умови, що $\{l_0\} \geq (3-10)\{\Delta l_1\}$, аналогічним чином перетворюють первинний оптичний образ другої наноміри у вторинний при коефіцієнті перетворення зображення рівним S_{n1} , визначають довжину $l'_0 (\{l'_0\} = S_{n1}\{l_0\})$ вторинного оптичного образу другої наноміри, отримане значення довжини N_1 або \bar{N}_1 запам'ятовують, замінюють другу наноміру довжини досліджуваним нанооб'єктом невідомої довжини l_x , визначають довжину $l_2 (\{l_2\} = S_{n1}\{l_x\})$ вторинного оптичного образу досліджуваного об'єкта аналогічно, отримане значення довжини N_2 або \bar{N}_2 запам'ятовують, встановлюють друге нормоване значення S_{n2} коефіцієнта підсилення зображення, визначають довжину $l_3 (\{l_3\} = S_{n2}\{l_x\})$ вторинного оптичного образу досліджуваного нанооб'єкта, заміщують досліджуваний нанооб'єкт невідомої довжини l_x другою наномірою, при новому значенні коефіцієнта перетворення S_{n2} визначають довжину $l_4 (\{l_4\} = S_{n2}\{l_0\})$ вторинного оптичного образу цієї наноміри, про дійсне значення довжини досліджуваного нанооб'єкта судять за наданим рівнянням числових значень. Винахід забезпечує виключення систематичних похибок вимірювання.

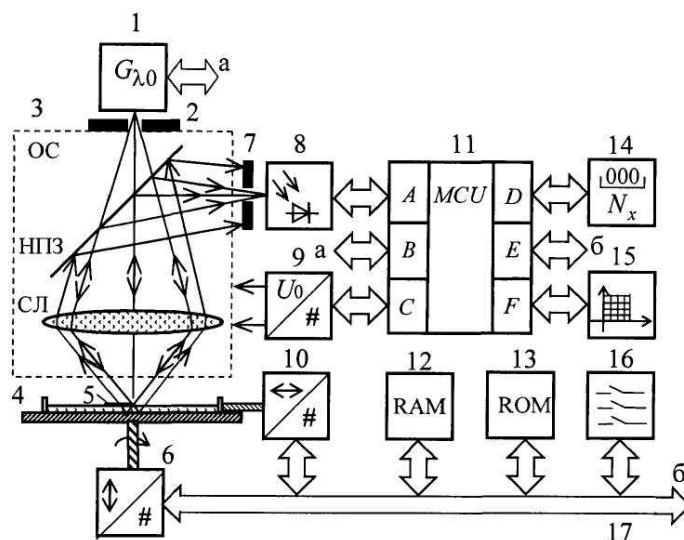


Рисунок. Функціональна схема цифрового вимірювача лінійних розмірів нанооб'єктів

Винахід належить до нанометрії і може бути використаний при створенні високоточних оптико-електронних засобів вимірювання лінійних розмірів нанооб'єктів з попереднім підсиленням оптичного зображення нанооб'єкта та його візуалізацією.

Відомий спосіб вимірювання лінійних розмірів нанооб'єктів* (див., наприклад, М.Н.Стриханов, Н.Н.Дегтяренко, В.В.Пилюгин и др. Опыт компьютерной визуализации наноструктур в НИЯУ МИФИ (рис. 14. Измерение расстояний и углов). <http://sv-journal.com/example/index.html>), оснований на використанні програми інтерактивної візуалізації нанооб'єкта та визначенні найкоротшої відстані між атомами.

Відомому способу притаманні недостатньо висока точність вимірювання лінійних розмірів нанооб'єктів чи відстані між заданими ділянками (атомами), тому що в основу покладені методи прямих вимірювань, що дають результат вимірювання, приведений до виходу вимірювального каналу зі всіма похибками вимірювання. Крім того, відомий спосіб не направлений на зменшення чи виключення систематичних похибок вимірювання.

Відомий спосіб визначення лінійних розмірів нанооб'єктів (див. наприклад, А.Ю.Кузин, В.Н.Марютин, В.В.Календин. Методы и средства измерений линейных размеров в нанометровом диапазоне. <http://nano-technology.org/nano-metrovyiy-diapason/metody-i-sredstva-izmereniy-lineynyih-razmerov-v-nanometro-vom-diap.html>), оснований на опроміненні зображення нанооб'єкта потоком оптичного чи жорсткого випромінювання заданої довжини хвилі з вузькою спектральною смугою або когерентним світлом, формуванні первинного просторового оптичного образу нанооб'єкта, оптико-електронному підсиленні його, перетворенні у вторинний оптичний образ з наступним визначенням його розмірів методом прямих вимірювань.

Відомому способу також притаманні не достатньо висока точність вимірювання лінійних розмірів нанооб'єктів чи відстані між заданими ділянками (атомами), тому що в його основу також покладені методи прямих вимірювань, що забезпечують отримання результату вимірювання, приведенного до виходу вимірювального каналу. Крім того, він не забезпечує зменшення чи виключення систематичних похибок вимірювання, в тому числі похибки від зміни довжини оптичного шляху.

Найбільш близький за технічною суттю є спосіб вимірювання лінійних розмірів нанооб'єктів (див. Ю.А.Новиков, А.В.Раков, П.А.Тодуа. Нанотехнология и нанометрология. http://www.gpi.ru/trudiof/Vol_62/I_novikov.pdf), оснований на опроміненні зображення нанооб'єкта потоком оптичного (чи жорсткого) випромінювання заданої потужності Φ_0 та довжини хвилі λ_0 з вузькою спектральною смугою або когерентним світлом і формуванні первинного просторового оптичного образу нанооб'єкта, оптичному підсиленні його у $k_{оп}$ рази, оптико-електронному закономірному перетворенні просторового первинного оптичного образу у просторовий дискретно-аналоговий сигнал, інтегруванні (експозиції) його протягом заданого проміжку часу $\Delta t_0 \leq 1/2f_{зч}$ сек., де $f_{зч}$ - частота зчитування сигналу, електронному підсиленні у k_e рази, закономірному аналого-цифровому перетворенні (з коефіцієнтом перетворення k_n) просторового дискретно-аналогового сигналу у масив даних (чисел), упорядкованому запам'ятовуванню отриманих даних (цифрових кодів), зворотному перетворенні (з коефіцієнтом перетворення $k_{ц}$) цих даних у збільшений за розмірами вторинний оптичний образ (на екрані дисплея) з загальним коефіцієнтом перетворення (чи підсилення) рівним $S_n = k_{оп}k_e k_{ц}$, на додатковому формуванні на екрані дисплея і суміщенні з отриманим вторинним оптичним образом зображень двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал з відповідними числовими (оцифрованими) мітками, встановленими з кроком Δl_0 , і зображенні відповідної їм кодуєваної координатної сітки зі змінюваними значеннями сторін квадратів $S_{п1}$, визначенні лінійних розмірів вторинного оптичного образу нанооб'єкта шляхом встановлення курсору на початкову та кінцеву точки оптичного образу, найкоротша відстань між котрими є довжиною і підлягає визначенню, з подальшим визначенням значення довжини за числовими мітками шкал чи за координатною сіткою з апіорі пронормованими розмірами сторін квадратів.

Відомий спосіб не забезпечує високу точність вимірювання лінійних розмірів нанооб'єктів чи відстані між заданими його ділянками тому, що в його основу покладений метод прямих вимірювань, що дає результат вимірювання, приведений до виходу вимірювального каналу. Тому всі похибки, що обумовлені нестабільністю параметрів оптико-електронного каналу, впливають на кінцевий результат вимірювання. Крім того, відомий спосіб не забезпечує зменшення чи виключення основних та додаткових систематичних похибок вимірювання, в тому числі й похибки від зміни довжини оптичного шляху.

В основу винаходу поставлена задача створення такого способу визначення лінійних розмірів нанооб'єктів, який забезпечував би автоматичне виключення основних та додаткових

систематичних похибок вимірювання, обумовлених різною довжиною оптичного шляху, нестабільністю елементів оптико-електронного каналу, забрудненням та запотіванням оптичних елементів оптичних елементів каналу, впливом флуктуації довжини оптичного шляху із-за турбулентності повітря та флуктуацій інтенсивності потоку оптичного випромінювання.

- 5 Поставлена технічна задача забезпечується тим, що спосіб надлишкових вимірювань лінійних розмірів нанооб'єктів, оснований на опроміненні зображення нанооб'єкта потоком оптичного (чи жорсткого) випромінювання заданої потужності Φ_0 та довжини хвилі λ_0 з вузькою спектральною смугою або когерентним світлом і формуванні первинного просторового оптичного образу нанооб'єкта, оптичному підсиленні його у $k_{оп}$ рази, оптико-електронному
- 10 закономірному перетворенні просторового первинного оптичного образу у просторовий дискретно-аналоговий сигнал, інтегруванні (експозиції) його протягом заданого проміжку часу $\Delta t_0 \leq 1/2f_{зч}$ сек., де $f_{зч}$ - частота зчитування сигналу, електронному підсиленні у k_e рази, закономірному аналого-цифровому перетворенні (з коефіцієнтом перетворення k_n) просторового дискретно-аналогового сигналу у масив даних (цифрових кодів), упорядкованому
- 15 запам'ятовуванні отриманих даних, зворотному перетворенні (з коефіцієнтом перетворення $k_ц$) цих даних у збільшений за розмірами вторинний оптичний образ (на екрані дисплею) з загальним коефіцієнтом перетворення (чи підсилення) рівним $S_n = k_{оп}k_e k_ц$, на додатковому формуванні на екрані дисплею і суміщенні з отриманим вторинним оптичним образом зображень двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал з відповідними числовими
- 20 (оцифрованими) мітками, встановленими з кроком Δl_0 , і зображенні відповідної їм координатної сітки з кодированими значеннями сторін квадратів ($\Delta l_{0j} \times \Delta l_{0j}$), визначенні лінійних розмірів вторинного оптичного образу нанооб'єкта шляхом встановлення курсору на початкову та кінцеву точки оптичного образу, найкоротша відстань між котрими є довжиною і підлягає визначенню, з подальшим зчитуванням координат точок і визначенням значення довжини за
- 25 числовими мітками шкал чи за координатною сіткою в апіорі пронормованими розмірами сторін квадратів.

- Від відомих запропонований спосіб відрізняється тим, що спочатку встановлюють перше нормоване значення $S_{п1}$ коефіцієнта перетворення (чи підсилення) зображення, опромінують наноміру довжини, зображення первинного оптичного образу наноміри довжини у вигляді
- 30 вертикальних смуг рівної товщини (чи паралельних дифракційних смуг або у вигляді зображення нормованої за розміром атомної структури тест-матеріалу наноміри) з нормованим за значенням кроком $\Delta l(\lambda_1)$ смуг підсилюють у $S_{п1}$ рази і перетворюють у вторинний образ з нормованим за значенням кроком $\Delta l_1(\{\Delta l_1\} = S_{п1}\{\Delta l(\lambda_1)\})$ смуг, електронним способом змінюють масштаб основних міток двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал доти, доки значення
- 35 відстані Δl_0 між сусідніми мітками шкал стане рівною підсиленому у $S_{п1}$ рази значенню відстані $\Delta l(\lambda_1)$ між паралельними вертикальними смугами наноміри довжини, тобто до $\{\Delta l_1\} = S_{п1}\{\Delta l(\lambda_1)\}$, суміщують початок координат з однією з вертикальних смуг вторинного образу наноміри довжини (як правило знизу її лівого боку), ділять розміри квадратів отриманої координатної сітки на десять частин $\{\Delta l_{01}\} = 0,1\{\Delta l_1\} = 0,1k_{п1}\{\Delta l(\lambda_1)\}$ і штучно утворюють додаткову (дрібну) сітку з
- 40 нормованим зазначенням кроком $\{\Delta l_{01}\}_{nm} \times \{\Delta l_{01}\}_{nm}$, запам'ятовують отримане на екрані дисплея графічне зображення шкал з основною та додатковими координатними сітками, заміщають наноміру довжини другою наномірою з лінійним розміром довжини l_0 , яка вибирається за умовою, що $\{l_0\} \geq (3-10)\{\Delta l_1\}$, аналогічним чином перетворюють первинний оптичний образ другої наноміри у вторинний при коефіцієнті перетворення (чи підсилення) зображення рівним
- 45 $S_{п1}$, визначають довжину $l'_0(\{l'_0\} = S_{п1}\{l_0\})$ вторинного оптичного образу другої наноміри шляхом наведення курсору на початкову та кінцеву точки зазначеного образу, найкоротша відстань між котрими є його довжиною і підлягає визначенню, зчитують один чи декілька (10-100) разів і обробляють координати цих точок, отримане значення довжини N_1 чи \bar{N}_1 запам'ятовують, заміняють другу наноміру довжини досліджуванним нанооб'єктом невідомої довжини l_x ,
- 50 визначають довжину $l_2\{l_2\} = S_{п1}\{l_x\}$ вторинного оптичного образу досліджуваного об'єкта шляхом наведення курсору на початкову та кінцеву точки вторинного оптичного образу досліджуваного об'єкта, відстань між котрими є його довжиною і підлягає визначенню, зчитують один чи декілька (10-100) разів і обробляють координати цих точок, отримане значення довжини

N_2 чи \bar{N}_2 запам'ятовують, встановлюють друге нормоване значення S_{n2} коефіцієнта підсилення зображення, визначають довжину $l_3(\{l_3\} = S_{n2}\{l_x\})$ вторинного оптичного образу досліджуваного нанооб'єкта шляхом наведення курсору на його початкову та кінцеву точки, зчитують один чи декілька (10-100) разів і обробляють координати цих точок, отримане значення відстані N_3 чи \bar{N}_3 , запам'ятовують, заміщують досліджуваний нанооб'єкт невідомої довжини l_x другою наномірою, при новому значенні коефіцієнта перетворення S_{n2} визначають довжину $l_4(\{l_4\} = S_{n2}\{l_0\})$ вторинного оптичного образу цієї наноміри шляхом наведення курсору та зчитування один чи декілька (10-100) разів координат початку та кінця її образу, отримане значення довжини N_4 чи \bar{N}_4 запам'ятовують, а про дійсне значення довжини досліджуваного нанооб'єкта судять за рівнянням числових значень

$$N_x = \{l_{01}\} \frac{N_3 - N_2}{N_4 - N_1}$$

чи, при наявності випадкових завад, за рівнянням числових значень

$$\bar{N}_x = \{l_{01}\} \frac{\bar{N}_3 - \bar{N}_2}{\bar{N}_4 - \bar{N}_1},$$

де \bar{N}_1 , \bar{N}_2 , \bar{N}_3 і \bar{N}_4 - усереднені результати вимірювання довжин, що отримані при зчитуванні координат початку та кінця оптичного образу довжини 10-100 разів.

Спосіб відрізняється тим, що при формуванні вторинних оптичних образів другої наноміри і досліджуваного нанооб'єкта одним із відомих методів забезпечують рівність між собою довжин оптичного шляху $l_{оп} \pm \Delta l_1$, $l_{оп} \pm \Delta l_2$, $l_{оп} \pm \Delta l_3$ і $l_{оп} \pm \Delta l_4$, де Δl_1 , Δl_2 , Δl_3 і Δl_4 - похибки встановлення заданої довжини оптичного шляху, тобто $\{l_{оп1}\} = \{l_{оп2}\} = \{l_{оп3}\} = \{l_{оп4}\} = \{l_{оп}\}$ при $\{\Delta l_1\} = \{\Delta l_2\} = \{\Delta l_3\} = \{\Delta l_4\} = \{\Delta l\} = \text{const}$ або $\{\Delta l_1\} = \{\Delta l_2\} = \{\Delta l_3\} = \{\Delta l_4\} = 0$.

На рисунку наведена функціональна схема цифрового вимірювача лінійних розмірів нанооб'єктів, де 1 - джерело оптичного випромінювання; 2 - точкова діафрагма-джерело; 3 - оптична система; 4 - предметний стіл; 5 - об'єкт дослідження; 6 - перший виконавчий механізм; 7 - конфокальна діафрагма; 8 - відеосенсор (прилад з зарядовим зв'язком або ПЗЗ-матриця); 9 - формувач напруги керування коефіцієнтом перетворення первинного оптичного образу у вторинний; 10 - другий виконавчий механізм; 11 - мікроконтролер; 12 - постійний запам'ятовуючий пристрій; 13 - оперативний запам'ятовуючий пристрій; 14 - цифровий відліковий пристрій; 15 - графічний дисплей; 16 - клавіатура; 17 - загальна шина.

Суть запропонованого способу надлишкових вимірювань лінійних розмірів нанооб'єкта полягає в наступному.

Запропонований спосіб визначення лінійних розмірів нанооб'єктів, оснований на опроміненні зображення нанооб'єкта потоком оптичного (чи жорсткого) випромінювання заданої потужності Φ_0 та довжини хвилі λ_0 з вузькою спектральною смугою або когерентним світлом і формуванні первинного просторового оптичного образу нанооб'єкта.

Використання того чи іншого опромінення залежить від способу створення зображення первинного оптичного образу наноміри довжини: у вигляді паралельних смуг рівної товщини; у вигляді паралельних дифракційних смуг чи у вигляді зображення нормованої за розміром атомної структури тест-матеріалу наноміри з нормованим за значенням кроком $\Delta(\lambda_1)$ смуг чи міжатомними відстанями. Все це пов'язано також з використанням того чи іншого мікроскопа (лазерного конфокального оптичного мікроскопа із скануванням, електронного мікроскопа чи іншого).

Первинний оптичний образ нанооб'єкта (досліджуваного чи наноміри довжини) оптично підсилюють у $k_{оп}$ рази. Після цього здійснюють оптико-електронне закономірне перетворення підсиленого оптичного просторового образу у просторовий дискретно-аналоговий сигнал. Останній інтегрують протягом заданого проміжку часу $\Delta t_0 \leq 1/2f_{зч}$ сек. Просторовий дискретно-аналоговий електричний сигнал підсилюють у k_e рази. Потім здійснюють закономірне аналого-цифрове перетворення (з коефіцієнтом перетворення k_n) просторового дискретно-аналогового сигналу у масив даних (цифрових кодів). Отримані дані упорядковано запам'ятовують. Здійснюють зворотне перетворення (з коефіцієнтом перетворення k_u) отриманих даних у збільшений за розмірами вторинний оптичний образ (на екрані дисплею). Загальний коефіцієнтом перетворення (чи підсилення) стає рівним $S_n = k_{оп}k_e k_u$.

Додатково формують на екрані дисплея і суміщують з отриманим вторинним оптичним образом зображення двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал з відповідними числовими (оцифрованими) мітками, які встановлені з кроком Δl_0 . Одночасно на екрані дисплея (у інтерактивному просторі) формують зображення відповідної їм координатної сітки з кодокерованими значеннями сторін квадратів ($\Delta l_{0j} \times \Delta l_{0j}$).

Визначення лінійних розмірів вторинного оптичного образу нанооб'єкта здійснюють шляхом встановлення курсору на початкову та кінцеву точки оптичного образу, найкоротша відстань між котрими є довжиною і підлягає визначенню, з подальшим зчитуванням координат точок і визначенням значення довжини за числовими мітками шкал або за координатною сіткою з апріорі пронормованими розмірами сторін квадратів.

Від відомих запропонований спосіб відрізняється тим, що спочатку встановлюють перше нормоване значення S_{n1} коефіцієнта перетворення (чи підсилення) зображення. Опромінюють наноміру довжини. Зображення первинного оптичного образу наноміри довжини у вигляді паралельних смуг рівної товщини (чи паралельних дифракційних смуг або у вигляді зображення нормованої за розміром атомної структури тест-матеріалу наноміри) з нормованим за значенням кроком $\Delta l(\lambda_1)$ смуг підсилюють у S_{n1} рази і перетворюють у вторинний образ з нормованим за значенням кроком $\Delta l_1(\{ \Delta l_1 \} = S_{n1} \{ \Delta l(\lambda_1) \})$ смуг.

Електронним способом змінюють масштаб основних міток двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал доти, доки значення відстані Δl_0 між сусідніми мітками шкал стане рівною підсиленому у S_{n1} рази значенню відстані $\Delta l(\lambda_1)$ між паралельними вертикальними смугами наноміри довжини, тобто до $\{ \Delta l_1 \} = S_{n1} \{ \Delta l(\lambda_1) \}$.

Суміщують початок координат штучної шкали з однією з вертикальних смуг вторинного образу наноміри довжини. Це здійснюють, як правило, знизу її лівого боку. Для підвищення точності відліку результатів вимірювання ділять розміри квадратів отриманої координатної сітки на десять частин, тобто $\{ \Delta l_{01} \} = 0,1 \{ \Delta l_1 \} = 0,1 S_{n1} \{ \Delta l(\lambda_1) \}$, і штучно створюють додаткову (дрібну) сітку з нормованим за значенням кроком $\{ \Delta l_{01} \} \text{nm} \times \{ \Delta l_{01} \} \text{nm}$. Після цього запам'ятовують отримане на екрані дисплею графічне зображення шкал з основною та додатковими координатними сітками.

Заміщають наноміру довжини, яку використовували для калібрування віртуальної шкали на екрані дисплею, другою наномірою. Лінійний розмір довжини l_0 другої наноміри вибирається за умови, що $\{ l_0 \} \geq (3-10) \{ \Delta l_1 \}$. Вважаємо, що при вимірюваннях повинна використовуватися наноміра довжини, однорідна з нанооб'єктом. Це необхідно для урахування тотожних оптичних властивостей досліджуваного нанооб'єкта і наноміри довжини.

Аналогічним чином перетворюють первинний оптичний образ другої наноміри довжини у вторинний при коефіцієнті перетворення (чи підсилення) потоку випромінювання рівним S_{n1} .

Визначають довжину $l'_0(\{ l'_0 \} = S_{n1} \{ l_0 \})$ вторинного оптичного образу другої наноміри шляхом наведення курсору на початкову (індекс «п») та кінцеву (індекс «п») точки зазначеного образу, найкоротша відстань між котрими є його довжиною і підлягає визначенню. Зчитують один чи декілька (10-100) разів і обробляють координати цих точок. В результаті отримують числове значення N_1 довжини наноміри.

І. При використанні за сенсор тільки лінійної ПЗЗ-матриці це значення може бути описано наступним чином:

$$N_1 = k_e k_{оп1} \Phi_0 e^{-\alpha \{ l_{оп} \} k_2} \{ l_0 \} k_{ц} = k_e k_{оп1} \Phi_e \{ l_0 \} k_{ц} = S_{n1} \Phi_e \{ l_0 \}, (1)$$

де $\Phi_e = \Phi_0 e^{-\alpha \{ l_{оп} \} k_2}$ - потік енергії випромінювання на одиницю довжини; $l_{оп}$ - довжина оптичного шляху потоку оптичного випромінювання; α - коефіцієнт поглинання потужності потоку оптичного випромінювання; $k_2 = 2$,

або

$$\overline{N_1} = k_e k_{оп1} \Phi_0 e^{-\alpha \{ l_{оп} \} k_2} k_{ц} \{ l_0 \} = k_e k_{оп1} k_{ц} \overline{\Phi_e} \{ l_0 \} = S_{n1} \overline{\Phi_e} \{ l_0 \}, (2)$$

де $\overline{\Phi_{x1}}$ - середнє (за 10-100 зчитувань) значення загального потоку енергії $\overline{\Phi_{x1}} = \overline{\Phi_e} l_0$; $\{ l_{оп} \}$ - середнє (за 10-100 зчитувань) значення довжини оптичного шляху.

Значення (1) і (2) запам'ятовуються.

Вважається, що за час вимірювань значення коефіцієнта оптичного поглинання постійно. Може змінюватися тільки довжина оптичного шляху.

II. При використанні за відеосенсор прямокутної ПЗЗ-матриці, мають місце наступні три випадки:

- 1) при встановленні другої наноміри довжини паралельно (індекс «г» від слова «горизонтально») осі абсцис віртуальної шкали шляхом повороту предметного столу з об'єктом, результат вимірювання отримують у вигляді

$$N_1 = N_{1гп} = N_{1гк} = S_{п1}\{\Phi_e\}\{l_o\} \quad (3)$$

чи

$$\overline{N_1} = \overline{N_{1гп}} = \overline{N_{1гк}} = S_{п1}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_o\}, \quad (4)$$

де - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини наноміри на вісь абсцис;

- 2) при розміщенні другої наноміри довжини паралельно (індекс «в» від слова «вертикально») осі ординат віртуальної шкали шляхом повороту предметного столу з об'єктом, результат вимірювання отримують у вигляді

$$N_1 = N_{1вп} - N_{1вк} = l_{п1}\{\Phi_e\}\{l_o\}, \quad (5)$$

чи

$$\overline{N_1} = \overline{N_{1вп}} - \overline{N_{1вк}} = l_{п1}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_o\}, \quad (6)$$

- де $N_{1вп}$ і $N_{1вк}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини наноміри на вісь ординат;

3) при розміщенні нанооб'єкта під кутом β до осей координат (без повороту предметного столу), результат вимірювання отримують у вигляді

$$N_1 = \sqrt{N_{1г\beta}^2 + N_{1в\beta}^2} = \sqrt{(N_{1гп\beta} - N_{1гк\beta})^2 + (N_{1вп\beta} - N_{1вк\beta})^2} = S_{п1}\{\Phi_e\}\{l_o\} \quad (7)$$

чи

$$\overline{N_1} = \sqrt{\overline{N_{1г\beta}}^2 + \overline{N_{1в\beta}}^2} = \sqrt{(\overline{N_{1гп\beta}} - \overline{N_{1гк\beta}})^2 + (\overline{N_{1вп\beta}} - \overline{N_{1вк\beta}})^2} = S_{п1}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_o\}, \quad (8)$$

- де $N_{1г\beta}$ і $N_{1гк\beta}$, $N_{1в\beta}$ і $N_{1вк\beta}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини наноміри на вісь абсцис; $N_{1вп\beta}$ і $N_{1вк\beta}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини наноміри на вісь ординат.

Отримане значення довжини N_1 чи $\overline{N_1}$ запам'ятовують.

Замінюють другу наноміру довжини досліджуваного нанооб'єктом невідомої довжини l_x .

- Визначають довжину $l_2\{l_2\} = S_{п1}\{l_x\}$ вторинного оптичного образу досліджуваного об'єкта шляхом наведення курсору на початкову та кінцеву точки вторинного оптичного образу досліджуваного об'єкта, відстань між котрими є його довжиною і підлягає визначенню. Зчитують один чи декілька (10-100) разів і обробляють координати цих точок. Отримане значення довжини N_2 досліджуваного нанооб'єкта запам'ятовують.

- I. При використанні за сенсор тільки лінійної ПЗЗ-матриці це значення може бути описано наступним чином:

$$N_2 = k_e k_{оп1}\{\Phi_o\}e^{-\alpha\{l_{оп}\}k_2}\{l_x\}k_u = k_e k_{оп1}\{\Phi_e\}\{l_x\}k_u = S_{п1}\{\Phi_e\}\{l_x\} \quad (9)$$

чи

$$\overline{N_2} = k_e k_{оп1}\{\overline{\Phi_o}\}e^{-\alpha\{\overline{l_{оп}}\}k_2}\{l_x\}k_u = k_e k_{оп1}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_x\}k_u = S_{п1}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_x\}. \quad (10)$$

Значення (9) і (10) запам'ятовують.

- II. При використанні за відеосенсор прямокутної ПЗЗ-матриці, мають місце наступні три випадки:

1) при встановленні досліджуваного нанооб'єкта паралельно осі абсцис віртуальної шкали шляхом повороту предметного столу з об'єктом, результат вимірювання отримують у вигляді

$$N_2 = N_{2гп} - N_{2гк} = S_{п1}\{\Phi_e\}\{l_x\} \quad (11)$$

чи

$$\overline{N_2} = \overline{N_{2гп}} - \overline{N_{2гк}} = S_{п1}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_x\}, \quad (12)$$

- де $N_{2гп}$ і $N_{2гк}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини досліджуваного нанооб'єкта на вісь абсцис;

2) при розміщенні досліджуваного нанооб'єкта паралельно осі ординат віртуальної шкали, за рахунок повороту предметного столу, результат вимірювання отримують у вигляді

$$N_2 = N_{2\text{вп}} - N_{2\text{вк}} = S_{\text{п1}}\{\Phi_e\}\{l_x\} \quad (13)$$

чи

$$\overline{N_2} = \overline{N_{2\text{вп}}} - \overline{N_{2\text{вк}}} = S_{\text{п1}}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_x\}, \quad (14)$$

де $N_{2\text{вп}}$ і $N_{2\text{вк}}$, $\overline{N_{2\text{вп}}}$ і $\overline{N_{2\text{вк}}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини досліджуваного нанооб'єкта на вісь ординат;

3) при розміщенні досліджуваного нанооб'єкта під кутом (3 до осей координат, - без повороту предметного столу з нанооб'єктом, результат вимірювання отримують у вигляді

$$N_2 = \sqrt{N_{2\text{г}\beta}^2 + N_{2\text{в}\beta}^2} = \sqrt{(N_{2\text{гп}\beta} - N_{2\text{гк}\beta})^2 + (N_{2\text{вп}\beta} - N_{2\text{вк}\beta})^2} = S_{\text{п1}}\{\Phi_e\}\{l_x\} \quad (15)$$

чи

$$\overline{N_2} = \sqrt{\overline{N_{2\text{г}\beta}}^2 + \overline{N_{2\text{в}\beta}}^2} = \sqrt{(\overline{N_{2\text{гп}\beta}} - \overline{N_{2\text{гк}\beta}})^2 + (\overline{N_{2\text{вп}\beta}} - \overline{N_{2\text{вк}\beta}})^2} = S_{\text{п1}}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_x\}, \quad (16)$$

де $N_{2\text{гп}\beta}$ і $N_{2\text{гк}\beta}$, $\overline{N_{2\text{гп}\beta}}$ і $\overline{N_{2\text{гк}\beta}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини досліджуваного нанооб'єкта на вісь абсцис; $N_{2\text{вп}\beta}$ і $N_{2\text{вк}\beta}$, $\overline{N_{2\text{вп}\beta}}$ і $\overline{N_{2\text{вк}\beta}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини досліджуваного нанооб'єкта на вісь ординат.

Отримані значення (11)-(16) запам'ятовують.

Встановлюють друге нормоване значення $S_{\text{п2}}$ коефіцієнта підсилення зображення.

Визначають довжину $l_3\{l_3\} = S_{\text{п2}}\{l_x\}$ вторинного оптичного образу досліджуваного нанооб'єкта шляхом наведення курсору на його початкову та кінцеву точки. Зчитують один чи декілька (10-100) разів і обробляють координати цих точок, отримане значення відстані N_3 запам'ятовують.

I. При використанні за сенсор тільки лінійної ПЗЗ-матриці це значення може бути описано наступним чином:

$$N_3 = k_e k_{\text{оп2}}\{\Phi_o\}e^{-\alpha\{l_{\text{оп}}\}k_2}\{l_x\}k_{\text{ц}} = k_e k_{\text{оп2}}\Phi_e\{l_x\}k_{\text{ц}} = S_{\text{п2}}\Phi_e\{l_x\}, \quad (17)$$

чи

$$\overline{N_3} = k_e k_{\text{оп2}}\{\Phi_o\}e^{-\alpha\{\overline{l_{\text{оп}}}\}k_2}\{l_x\}k_{\text{ц}} = k_e k_{\text{оп1}}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_x\}k_{\text{ц}} = S_{\text{п2}}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_x\}. \quad (18)$$

Отримані значення (17) і (18) запам'ятовують.

II. При використанні за відеосенсор прямокутної ПЗЗ-матриці, мають місто наступні три випадки:

1) при розміщенні досліджуваного нанооб'єкта паралельно осі абсцис віртуальної шкали

$$N_3 = N_{3\text{гп}} - N_{3\text{гк}} = S_{\text{п2}}\{\Phi_e\}\{l_x\} \quad (19)$$

чи

$$\overline{N_3} = \overline{N_{3\text{гп}}} - \overline{N_{3\text{гк}}} = S_{\text{п2}}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_x\}, \quad (20)$$

де $N_{3\text{гп}}$ і $N_{3\text{гк}}$, $\overline{N_{3\text{гп}}}$ і $\overline{N_{3\text{гк}}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини досліджуваного нанооб'єкта на вісь абсцис.

2) при розміщенні досліджуваного нанооб'єкта паралельно осі ординат віртуальної шкали

$$N_3 = N_{3\text{вп}} - N_{3\text{вк}} = S_{\text{п2}}\{\Phi_e\}\{l_x\} \quad (21)$$

чи

$$\overline{N_3} = \overline{N_{3\text{вп}}} - \overline{N_{3\text{вк}}} = S_{\text{п2}}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_x\}, \quad (22)$$

де $N_{3\text{вп}}$ і $N_{3\text{вк}}$, $\overline{N_{3\text{вп}}}$ і $\overline{N_{3\text{вк}}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини досліджуваного нанооб'єкта на вісь ординат.

3) при розміщенні досліджуваного нанооб'єкта під кутом β до осей координат, -

$$N_3 = \sqrt{N_{3\text{г}\beta}^2 + N_{3\text{в}\beta}^2} = \sqrt{(N_{3\text{гп}\beta} - N_{3\text{гк}\beta})^2 + (N_{3\text{вп}\beta} - N_{3\text{вк}\beta})^2} = S_{\text{п2}}\{\Phi_e\}\{l_x\} \quad (23)$$

чи

$$\overline{N_3} = \sqrt{\overline{N_{3\text{г}\beta}}^2 + \overline{N_{3\text{в}\beta}}^2} = \sqrt{(\overline{N_{3\text{гп}\beta}} - \overline{N_{3\text{гк}\beta}})^2 + (\overline{N_{3\text{вп}\beta}} - \overline{N_{3\text{вк}\beta}})^2} = S_{\text{п2}}\{\overline{\Phi_e}\}\{l_x\}, \quad (24)$$

де $N_{3\text{гп}\beta}$ і $N_{3\text{гк}\beta}$, $\overline{N_{3\text{гп}\beta}}$ і $\overline{N_{3\text{гк}\beta}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини досліджуваного нанооб'єкта на вісь абсцис; $N_{3\text{вп}\beta}$ і $N_{3\text{вк}\beta}$

$\overline{N_{3вп\beta}}$ $\overline{N_{3вк\beta}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини досліджуваного нанооб'єкта на вісь ординат.

Заміщують досліджуваний нанооб'єкт невідомої довжини l_x другою наномірою довжиною l_0 . При новому значенні коефіцієнта перетворення $k_{п2}$ визначають довжину $l_4 = k_{п2}l_0$ вторинного оптичного образу цієї наноміри шляхом наведення курсору та зчитування один чи декілька (10-100) разів координат початку та кінця її образу, отримане значення довжини N_4 запам'ятовують.

I. При використанні за сенсор тільки лінійної ПЗЗ-матриці це значення може бути описано наступним чином:

$$N_4 = k_e k_{он2} \{\Phi_o\} e^{-\alpha \{l_{он}\} k_2} \{l_0\} k_{ц} = k_e k_{он2} \{\Phi_e\} \{l_0\} k_{п2} = S_{п2} \Phi_e \{l_0\}, (25)$$

чи

$$\overline{N_4} = k_e k_{он2} \{\Phi_o\} e^{-\alpha \{\overline{l_{он}}\} k_2} \{l_0\} k_{ц} = k_e k_{он2} \{\overline{\Phi_e}\} \{l_0\} k_{ц} = S_{п2} \{\overline{\Phi_e}\} \{l_0\}. (26)$$

Отримані значення (25) і (26) запам'ятовують.

II. При використанні за відеосенсор прямокутної ПЗЗ-матриці, мають місце наступні три випадки:

1) при розміщенні вторинного оптичного образу другої наноміри паралельно осі абсцис віртуальної шкали

$$N_4 = N_{4гп} - N_{4гк} = S_{п2} \{\Phi_e\} \{l_0\} (27)$$

чи

$$\overline{N_4} = \overline{N_{4гп}} - \overline{N_{4гк}} = S_{п2} \{\overline{\Phi_e}\} \{l_0\}, (28)$$

де $N_{2гп}$ і $N_{2гк}$ $\overline{N_{2гп}}$ і $\overline{N_{2гк}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини досліджуваного нанооб'єкта на вісь абсцис;

2) при розміщенні вторинного оптичного образу другої наноміри паралельно осі ординат віртуальної шкали

$$N_4 = N_{4вп} - N_{4вк} = S_{п2} \{\Phi_e\} \{l_0\} (29)$$

чи

$$\overline{N_4} = \overline{N_{4вп}} - \overline{N_{4вк}} = S_{п2} \{\overline{\Phi_e}\} \{l_0\}, (30)$$

де $N_{4вп}$ і $N_{4вк}$ $\overline{N_{4вп}}$ і $\overline{N_{4вк}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини досліджуваного нанооб'єкта на вісь ординат;

3) при розміщенні вторинного оптичного образу другої наноміри під кутом β до осей координат, -

$$N_4 = \sqrt{N_{4г\beta}^2 + N_{4в\beta}^2} = \sqrt{(N_{4гп} - N_{4гк})^2 + (N_{4вп} - N_{4вк})^2} = S_{п2} \{\Phi_e\} \{l_0\} (31)$$

чи

$$\overline{N_4} = \sqrt{(\overline{N_{4г\beta}})^2 + (\overline{N_{4в\beta}})^2} = \sqrt{(\overline{N_{4гп}} - \overline{N_{4гк}})^2 + (\overline{N_{4вп}} - \overline{N_{4вк}})^2} = S_{п2} \{\overline{\Phi_e}\} \{l_x\}, (32)$$

де $N_{4гп}$ і $N_{4гк}$, $\overline{N_{4гп}}$ і $\overline{N_{4гк}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини вторинного оптичного образу другої наноміри на вісь абсцис; $N_{4вп}$ і $N_{4вк}$ $\overline{N_{4вп}}$ і $\overline{N_{4вк}}$ - неусереднені і усереднені числові значення проекції початкової та кінцевої точок довжини вторинного оптичного образу другої наноміри на вісь ординат.

Про дійсне значення довжини досліджуваного нанооб'єкта судять за рівнянням числових значень

$$k_e k_{он} \{\Phi_o\} e^{-\alpha \{l_{он}\} k_2} \{l_x\} k_{ц}$$

$$N_x = \{l_{01}\} \frac{N_3 - N_2}{N_4 - N_1} = \{l_{01}\} \frac{k_e k_{он2} \{\Phi_o\} e^{-\alpha \{l_{он}\} k_2} \{l_x\} k_{ц} - k_e k_{он1} \{\Phi_o\} e^{-\alpha \{l_{он}\} k_2} \{l_x\} k_{ц}}{k_e k_{он2} \{\Phi_o\} e^{-\alpha \{l_{он}\} k_2} \{l_0\} k_{ц} - k_e k_{он1} \{\Phi_o\} e^{-\alpha \{l_{он}\} k_2} \{l_0\} k_{ц}}, (33)$$

$$= \{l_{01}\} \frac{k_{он2} \{l_x\} - k_{он1} \{l_x\}}{k_{он2} \{l_0\} - k_{он1} \{l_0\}} = \{l_{01}\} \frac{\{l_x\}}{\{l_{01}\}} = \{l_x\}$$

$$\overline{N_x} = \{l_{01}\} \frac{\overline{N_3} - \overline{N_2}}{\overline{N_4} - \overline{N_1}}, (34)$$

Як видно з рівнянь (33) і (34) числових значень, результат вимірювання не залежить від потужності потоку оптичного випромінювання, від коефіцієнта поглинання, довжини оптичного шляху, від абсолютних значень коефіцієнтів оптичного підсилення, електронного підсилення і цифро-аналогового перетворення.

Особливістю запропонованого способу є те, що кінцевий результат отриманий приведеним до входу оптико-електронного каналу, тобто має розмірність у нанометрах, як й наноміра. Як видно з (33) і (34), похибка вимірювання залежить, в основному, від похибки наноміри довжини, що використовується.

При формуванні вторинних оптичних образів другої наноміри і досліджуваного нанооб'єкта рівність між собою довжин оптичного шляху $l_{оп} \pm \Delta_{l1}$, $l_{оп} \pm \Delta_{l2}$, $l_{оп} \pm \Delta_{l3}$, і $l_{оп} \pm \Delta_{l4}$, де Δ_{l1} , Δ_{l2} , Δ_{l3} і Δ_{l4} похибки встановлення заданої довжини оптичного шляху, забезпечують одним із відомих методів таким чином, щоб $\{l_{оп1}\} = \{l_{оп2}\} = \{l_{оп3}\} = \{l_{оп4}\} = \{l_{оп}\}$ при $\{\Delta_{l1}\} = \{\Delta_{l2}\} = \{\Delta_{l3}\} = \{\Delta_{l4}\} = \{\Delta_{l1}\} = \text{const}$ або $\{\Delta_{l1}\} = \{\Delta_{l2}\} = \{\Delta_{l3}\} = \{\Delta_{l4}\} = 0$. До відомих методів можна віднести: метод, пов'язаний з фіксацією положення фокусу (у конфокальній мікроскопії) і переміщенням тільки предметного столу вздовж вертикальної осі; метод вирівнювання довжини оптичного шляху за рахунок введення додаткового шляху, тобто методом «сірого клина»; метод, оснований на зміні одного з парціальних коефіцієнтів підсилення, що складають загальний коефіцієнт $S_n = k_{оп}k_e k_{ц}$ перетворення первинного оптичного образу у вторинний, в залежності від зміни висоти досліджуваного нанооб'єкта відносно висоти другої наноміри тощо.

При наявності випадкових завад різної фізичної природи, що вносять випадкову складову похибки в кінцевий результат вимірювання, здійснюється по 10-100 зчитувань координат початкової та кінцевої точок з наступною статистичною обробкою отриманих результатів (див. парні номери формул). По отриманих результатах визначають середні значення вимірювальних довжин та їх невизначеність. Отримані усереднені результати багатократних вимірювань довжин також обробляють за рівнянням числових значень (34).

Таким чином, запропонований спосіб визначення лінійних розмірів нанооб'єктів забезпечує автоматичне виключення основних та додаткових систематичних похибок вимірювання, обумовлених довгостроковою нестабільністю елементів оптико-електронного каналу, забрудненням та запотіванням оптичних елементів оптичних елементів каналу, що збільшує коефіцієнт поглинання, впливом зміни довжини оптичного шляху та флуктуацій інтенсивності потоку оптичного випромінювання.

Пояснимо суть запропонованого способу визначення лінійних розмірів нанооб'єктів на прикладі роботи цифрового вимірювача лінійних розмірів нанооб'єктів, структурна схема якого наведена на рисунку. В прикладі за оптичну систему використовується оптична система конфокального мікроскопа.

За допомогою джерела оптичного випромінювання 1 формується потік оптичного випромінювання заданої довжини хвилі в інфрачервоному чи ультрафіолетовому діапазоні. Цей потік проходить через точкову діафрагму-джерело 2 і, через оптичну систему 3 надходить на нанооб'єкт (наноміру чи досліджуваний нанооб'єкт) і опромінює його. Слід зауважити, що оптична система включає в собі напівпрозоре дзеркало ППЗ та систему лінз СЛ, коефіцієнт оптичного підсилення якої може бути змінений на нормоване значення за допомогою вихідного сигналу з формувача напруги 9.

Відбитий від нанооб'єкта потік оптичного випромінювання у вигляді первинного оптичного образу нанооб'єкта зворотно проходить через оптичну систему 3, підсилюється у $k_{оп}$ рази, відбивається від напівпрозорого дзеркала НПЗ і через конфокальну діафрагму 7 надходить на вхід відеосенсора 8. За допомогою останнього здійснюється перетворення, а потім у цифровий, що являє собою масив даних (кодів чисел). Масив даних надходить на паралельний порт «А» мікроконтролера 11. За заданою програмою здійснюється цифрове підсилення цифрового образу. Отриманий масив даних з виходу порту «F» надходить на графічний дисплей, де перетворюється у вторинний, підсилений у k_n рази, оптичний образ нанооб'єкта.

За допомогою сигналу з виходу формувача 9 напруги керування коефіцієнтом перетворення первинного оптичного образу у вторинний здійснюється встановлення заданого значення коефіцієнта перетворення оптико-електронного каналу - S_{n1} чи S_{n2} . Вихідний сигнал залежить від коду числа, що надходить на цифровий вхід формувача 9 з виходу порту «С» мікроконтролера 11. Результат вимірювання відображається на цифровому відліковому пристрої 14, що підключений до порту «D» мікроконтролера 11. Керування роботою цифрового вимірювача здійснюється за допомогою клавіатури 16, яка, через загальну шину 17, підключена до паралельного порту «В» мікроконтролера 11. Для запам'ятовування великого масиву

постійних та оперативних даних використовуються постійний запам'ятовуючий пристрій 12 та оперативний запам'ятовуючий пристрій 13. Керування предметним столом 4 здійснюється по команді з мікроконтролера 11, що подається у вигляді кодів чисел на входи першого 6 і другого 10 виконавчих механізмів. За допомогою першого виконавчого механізму 6 здійснюється

переміщення предметного столу 4 по вертикалі та його кругове переміщення. За допомогою другого виконавчого механізму 10 здійснюється переміщення предметного столу 4 по горизонталі.

Робота цифрового вимірювача лінійних розмірів нанооб'єктів складається з чотирьох тактів вимірювання довжин нанооб'єктів та одного такту обчислення результатів надлишкових вимірювань.

Після натиску кнопки «пуск» на клавіатурі на екрані графічного дисплею 15 з'являється зображення двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал з відповідними числовими (оцифрованими) мітками, встановленими з кроком Δl_0 , а також зображення відповідної їм координатної сітки з кодированими значеннями сторін квадратів.

По команді з мікроконтролера 11 предметний стіл 4 встановлюється по центру оптичної осі. Після цього встановлюється перше значення S_{n1} коефіцієнта перетворення оптико-електронного каналу. Відомим способом на підкладку предметного столу 4 встановлюють першу зразкову міру довжини. На екрані графічного дисплея 15 отримують вторинний оптичний образ наноміри довжини у вигляді паралельних смуг рівної товщини з нормованим за значенням кроком.

Встановлюють зазначені смуги рівної товщини паралельно вертикальним лініям координатної сітки. Це здійснюють шляхом повороту предметного столу з першою наномірою. Потім автоматично чи оператором суміщають між собою вертикальні лінії від першої наноміри з лініями координатної сітки.

Електронним способом змінюють масштаб основних міток двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал доти, доки значення відстані Δl_0 між сусідніми мітками шкал стане рівною підсиленому у S_{n1} рази значенню відстані $\Delta l(\lambda_1)$ між паралельними вертикальними смугами першої наноміри довжини, тобто до $\{\Delta l_1\} = S_{n1} \{\Delta l(\lambda_1)\}$;

По команді з мікроконтролера 11 суміщають початок координат з однією з вертикальних смуг вторинного образу наноміри довжини (як правило знизу її лівого боку). Ділять розміри квадратів отриманої координатної сітки на десять частин $\{\Delta l_{01}\} = 0,1 \{\Delta l_1\} = 0,1 k_{n1} \{\Delta l(\lambda_1)\}$, тобто штучно утворюють додаткову (дрібну) сітку з нормованим за значенням кроком $\{\Delta l_{01}\}_{nm} \times \{\Delta l_{01}\}_{nm}$.

Отримане на екрані дисплея графічне зображення шкал з основною та додатковими координатними сітками запам'ятовують в оперативному запам'ятовуючому пристрої 13.

Заміщають наноміру довжини другою наномірою з лінійним розміром довжини l_0 . Визначають довжину вторинного оптичного образу другої наноміри шляхом наведення курсору на початкову та кінцеву точки її оптичного образу, відстань між котрими є довжиною наноміри і підлягають визначенню. Зчитують і обробляють координати цих точок. Обчислюють та запам'ятовують отриманий результат (1) в оперативному запам'ятовуючому пристрої 13.

У другому такті заміняють другу наноміру довжини досліджуванним нанооб'єктом невідомої довжини l_x . Це здійснюється, наприклад, шляхом переміщення предметного столу 4 таким чином, щоб на екрані графічного дисплею ми побачили досліджуваний нанооб'єкт 5. Визначають довжину вторинного оптичного образу досліджуваного об'єкта шляхом наведення курсору на початкову та кінцеву точки вторинного оптичного образу досліджуваного нанооб'єкта, відстань між котрими є його довжиною і підлягає визначенню. Зчитують і обробляють координати цих точок. Отримане значення довжини (5) досліджуваного нанооб'єкта запам'ятовують в оперативному запам'ятовуючому пристрої 13.

У третьому такті, по команді з мікроконтролера 11, встановлюється нове значення коефіцієнта S_{n2} перетворення оптико-електронного каналу. Визначають довжину вторинного оптичного образу досліджуваного нанооб'єкта вже при новому значенні S_{n2} коефіцієнта перетворення. Отримане значення довжини (9) запам'ятовують в оперативному запам'ятовуючому пристрої 13.

У четвертому такті заміщають досліджуваний нанооб'єкт другою наномірою з лінійним розміром довжини l_0 шляхом відповідного переміщення предметного столу 4 вздовж осі абсцис. Визначають довжину вторинного оптичного образу другої наноміри при новому значенні

коефіцієнта S_{n2} перетворення оптико-електронного каналу. Наводять курсор на початкову та кінцеву точки її оптичного образу. Натискають кнопку «зчитування» на клавіатурі 16 і зчитують координати цих точок. Обчислюють та запам'ятовують отриманий результат (13) в оперативному запам'ятовуючому пристрої 13.

5 У п'ятому такті результати проміжних вимірювань обробляють за рівнянням числових значень (33). Отриманий результат запам'ятовують в постійному запам'ятовуючому пристрої 12.

У цифровому вимірювачі лінійних розмірів нанооб'єктів існує також режим вимірювання при наявності випадкових завад різної фізичної природи, що вносять випадкову складову похибки в кінцевий результат вимірювання. Для цього по команді «вимірювання при завадах», що надається натиском на відповідну кнопку клавіатури 16, виконується програма вимірювання, за 10 якою в кожному такті здійснюють по 10-100 вимірювань. По отриманих результатах визначають середні значення довжин в кожному такті та їх невизначеність. Отримані усереднені результати багатократних вимірювань довжин обробляють за рівнянням числових значень (34).

Для забезпечення рівності між собою довжин оптичного шляху при кожному такті вимірювання використана оптична система 3 конфокального мікроскопа з високоточною фіксацією положення фокусної плями. Шляхом переміщення предметного столу 4 вздовж вертикальної осі до фокусованої оптичної плями. Тим самим здійснюється вирівнювання довжини оптичного шляху від нанооб'єкта до відеосенсора 8.

20 Таким чином, запропонований спосіб вимірювання лінійних розмірів нанооб'єктів забезпечує вирішення поставленої технічної задачі.

ФОРМУЛА ВИНАХОДУ

25 Спосіб надлишкових вимірювань лінійних розмірів нанооб'єктів, оснований на опроміненні зображення нанооб'єкта потоком оптичного або жорсткого випромінювання заданої потужності Φ_0 та довжини хвилі λ_0 з вузькою спектральною смугою або когерентним світлом тієї ж потужності, формуванні первинного просторового оптичного образу нанооб'єкта, оптичному підсиленні його у $k_{оп}$ рази, оптико-електронному закономірному перетворенні просторового 30 первинного оптичного образу у просторовий дискретно-аналоговий сигнал, інтегруванні його протягом заданого проміжку часу $\Delta t_0 \leq 1/2f_{зч}$ сек., де $f_{зч}$ - частота зчитування сигналу, електронному підсиленні у k_e рази, закономірному аналого-цифровому перетворенні з коефіцієнтом перетворення k_n просторового дискретно-аналогового сигналу у масив даних, упорядкованому запам'ятовуванні отриманих даних, зворотному перетворенні з коефіцієнтом 35 перетворення $k_{ц}$ цих даних у збільшений за розмірами вторинний оптичний образ на екрані дисплея з загальним коефіцієнтом перетворення або підсилення, рівним $S_n = k_{оп}k_e k_{ц}$, додатковому формуванні на екрані дисплея і суміщенні з отриманим вторинним оптичним образом зображень двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал з відповідними числовими мітками, встановленими з кроком Δl_0 , і зображенні відповідної їм координатної сітки з 40 кодированими значеннями сторін квадратів $(\Delta l_{oj} \times \Delta l_{oi})$, визначенні лінійних розмірів вторинного оптичного образу нанооб'єкта шляхом встановлення курсора на початкову та кінцеву точки оптичного образу, найкоротша відстань між якими є довжиною і підлягає визначенню, з подальшим зчитуванням координат точок і визначенням значення довжини за числовими мітками шкал або за координатною сіткою з апіорі пронормованими розмірами 45 сторін квадратів, який **відрізняється** тим, що спочатку встановлюють перше нормоване значення S_{n1} коефіцієнта перетворення або підсилення зображення, опромінюють наноміри довжини, зображення первинного оптичного образу наноміри довжини у вигляді вертикальних смуг рівної товщини або паралельних дифракційних смуг, або у вигляді зображення нормованої за розміром атомної структури тест-матеріалу наноміри з нормованим за значенням кроком 50 $\Delta l(\lambda_1)$ смуг, підсилюють у S_{n1} рази і перетворюють у вторинний образ з нормованим за значенням кроком $\Delta l_1\{\{\Delta l_1\} = S_{n1}\{\Delta l(\lambda_1)\}\}$, електронним способом змінюють масштаб основних міток двох лінійних взаємно перпендикулярних шкал доти, доки значення відстані Δl_0 між сусідніми мітками шкал стане рівним підсиленому у S_{n1} рази значенню відстані $\Delta l(\lambda_1)$ між паралельними вертикальними смугами наноміри довжини, тобто до $\{\Delta l_{01}\} = 0,1\{\Delta l_1\} = 0,1k_{n1}\{\Delta l(\lambda_1)\}$, 55 суміщують початок координат з однією з вертикальних смуг вторинного образу наноміри

- довжини як правило знизу її лівого боку, ділять розміри квадратів отриманої координатної сітки на десять частин $\{\Delta l_{01}\} = 0,1\{\Delta l_1\} = 0,1k_{п1}\{\Delta l(\lambda_1)\}$ і штучно утворюють додаткову дрібну сітку з нормованим за значенням кроком $\{\Delta l_{01}\}_{nm} \times \{\Delta l_{01}\}_{nm}$, запам'ятовують отримане на екрані дисплея графічне зображення шкал з основною та додатковими координатними сітками,
- 5 заміщають наноміру довжини другою наномірою з лінійним розміром довжини l_0 , яка вибирається за умови, що $\{l_0\} \geq (3-10)\{\Delta l_1\}$, аналогічним чином перетворюють первинний оптичний образ другої наноміри у вторинний при коефіцієнті перетворення або підсилення зображення, який дорівнює $S_{п1}$, визначають довжину $l'_0(\{l'_0\} = S_{п1}\{l_0\})$ вторинного оптичного образу другої наноміри шляхом наведення курсора на початкову та кінцеву точки зазначеного образу, найкоротша відстань між якими є його довжиною і підлягає визначенню, зчитують один
- 10 або декілька від 10 до 100 разів і обробляють координати цих точок, отримане значення довжини N_1 або \bar{N}_1 запам'ятовують, заміняють другу наноміру довжини досліджуваним нанооб'єктом невідомої довжини l_x , визначають довжину $l_2(\{l_2\} = S_{п1}\{l_x\})$ вторинного оптичного образу досліджуваного об'єкта шляхом наведення курсора на початкову та кінцеву точки вторинного оптичного образу досліджуваного об'єкта, відстань між якими є його довжиною і підлягає визначенню, зчитують один або декілька від 10 до 100 разів і обробляють координати цих точок, отримане значення довжини N_2 чи \bar{N}_2 запам'ятовують, встановлюють друге нормоване значення $S_{п2}$ коефіцієнта підсилення зображення, визначають довжину $l_3(\{l_3\} = S_{п2}\{l_x\})$ вторинного оптичного образу досліджуваного нанооб'єкта шляхом наведення
- 15 курсора на його початкову та кінцеву точки, зчитують один або декілька від 10 до 100 разів і обробляють координати цих точок, отримане значення відстані N_3 або \bar{N}_3 запам'ятовують, заміщують досліджуваний нанооб'єкт невідомої довжини l_x другою наномірою, при новому значенні коефіцієнта перетворення $S_{п2}$ визначають довжину $l_4(\{l_4\} = S_{п2}\{l_0\})$ вторинного оптичного образу цієї наноміри шляхом наведення курсора та зчитування один або декілька від
- 20 10 до 100 разів координат початку та кінця її образу, отримане значення довжини N_4 чи \bar{N}_4 запам'ятовують, а про дійсне значення довжини досліджуваного нанооб'єкта судять за рівнянням числових значень
- $$N_x = \{l_{01}\} \frac{N_3 - N_2}{N_4 - N_1}$$
- або, при наявності випадкових завад, за рівнянням числових значень
- 30 $\bar{N}_x = \{l_{01}\} \frac{\bar{N}_3 - \bar{N}_2}{\bar{N}_4 - \bar{N}_1}$, де
- $\bar{N}_1, \bar{N}_2, \bar{N}_3$ і \bar{N}_4 - усереднені результати вимірювання довжин, що отримані при зчитуванні координат початку та кінця оптичного образу довжини від 10 до 100 разів.
2. Спосіб за п. 1, який **відрізняється** тим, що при формуванні вторинних оптичних образів другої наноміри і досліджуваного нанооб'єкта одним із відомих методів забезпечують рівність
- 35 між собою довжин оптичного шляху $l_{оп} \pm \Delta l_1, l_{оп} \pm \Delta l_2, l_{оп} \pm \Delta l_3$, і $l_{оп} \pm \Delta l_4$, де $\Delta l_1, \Delta l_2, \Delta l_3$ і Δl_4 - похибки встановлення заданої довжини оптичного шляху, тобто $\{l_{оп1}\} = \{l_{оп2}\} = \{l_{оп3}\} = \{l_{оп4}\} = \{l_{оп}\}$ при $\{\Delta l_1\} = \{\Delta l_2\} = \{\Delta l_3\} = \{\Delta l_4\} = \{\Delta l\} = \text{const}$ або $\{\Delta l_1\} = \{\Delta l_2\} = \{\Delta l_3\} = \{\Delta l_4\} = 0$.

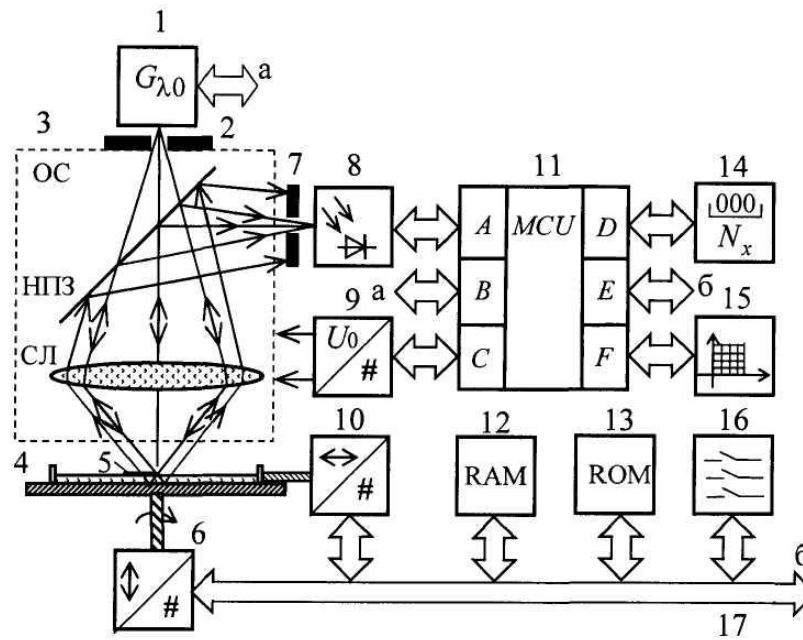


Рисунок. Функціональна схема цифрового вимірювача лінійних розмірів нанооб'єктів

Комп'ютерна верстка В. Мацело

Державна служба інтелектуальної власності України, вул. Урицького, 45, м. Київ, МСП, 03680, Україна

ДП "Український інститут промислової власності", вул. Глазунова, 1, м. Київ – 42, 01601