

УДК 537.533

К.П. Неежмаков

*Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина*

## ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАНОМЕТРОЛОГИИ В УКРАИНЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАСТРОВЫХ ЭЛЕКТРОННЫХ МИКРОСКОПОВ

*Развитие микроэлектроники, микромеханики, нанотехнологий требует совершенствования методов измерения линейных размеров элементов топологии микросхем, анализа поверхностных структур, а также требует средств измерений, подтверждающих достоверность результатов измерений размеров реальных объектов и их элементного состава. Измерения линейных размеров в микронном и субмикронном диапазонах методом растровой электронной микроскопии на сегодняшний день считаются одними из наиболее точных. Следует отметить, что ведущие страны мира, занимающие ключевые позиции в микроэлектронике, вопросам внедрения метрологии в практику линейных измерений в микро- и нанометровом диапазонах уделяют первостепенное значение.*

**Ключевые слова:** нанометрология, растровый электронный микроскоп, меры, калибровка, эталон.

### Введение

Интенсивное развитие нанотехнологий требует создания системы метрологического обеспечения измерений. Важное место занимает измерение длины в нанометровом диапазоне.

Большинство измерительных средств нанометрового диапазона в Украине в настоящее время находится вне сферы метрологического обслуживания и не обеспечено средствами калибровки и поверки. Все это снижает уровень контрольно-измерительных операций при производстве изделий микро-, наноэлектроники, не гарантирует единства и достоверности данных измерений и, тем самым, наносит существенный материальный ущерб в базовых отраслях экономики.

В то же время, что ведущие страны мира, занимающие ключевые позиции в микроэлектронике, вопросам внедрения метрологии в практику линейных измерений в микро- и нанометровом диапазонах уделяют первостепенное значение.

Перспективы развития измерений длины в субмикронном диапазоне, на наш взгляд, связаны с применением растрового электронного микроскопа (РЭМ).

Измерения линейных размеров с помощью РЭМ могут проводиться двумя способами. В первом случае РЭМ используется как средство визуализации и позиционирования микрообъекта, а измерения проводятся независимо с использованием методов лазерной интерферометрии. Второй способ заключается в непосредственном измерении размеров в поле зрения РЭМ по задаваемому увеличению и аналогичен измерению линейных размеров с помощью оптических микроскопов. В этом случае должны быть известны погрешность увеличения РЭМ и методика проведения измерений по задаваемому

увеличению. РЭМ в данной методике выступает как компаратор, сравнивающий измеряемый объект с эталонной мерой, по которой градуируется его увеличение. Такое сравнение позволяет уменьшить погрешность определения увеличения РЭМ, которая в диапазоне до 20000 крат может достигать 30%.

Для снижения погрешности, обусловленной искажением изображения на экране, измерения необходимо выполнять без визуализации структуры объектов по профилю детектируемого видеосигнала. Такой способ измерений размеров элементов требует наличия аттестованных эталонных мер малой длины с периодической структурой.

Более высокую точность и воспроизводимость результатов измерений малых длин дает метод прямых непосредственных измерений с использованием лазерных интерферометрических систем. Эталонной мерой в этом случае служит длина волны лазерного излучения, относительная погрешность измерений которой для He-Ne лазера составляет  $10^{-9}$ .

Наряду с РЭМ, существуют специальные электронно-оптические средства измерений линейных размеров, которые можно использовать для аттестации эталонных мер малой длины в микронном и нанометровом диапазонах.

### Опыт калибровки средств измерительной техники в нанометровом диапазоне за рубежом

На данный момент довольно развитыми странами в области нанометрологии являются Россия и Германия. Рассмотрим более подробно подходы этих стран.

Важнейшим этапом в решении задач метрологического обеспечения линейных измерений в

нанометровом диапазоне в России явилось создание вещественных носителей размера – мер с программируемым нанорельефом поверхности, обеспечивающих калибровку средств измерений с наивысшей точностью [1].

Именно такие трехмерные меры, позволяющие осуществлять комплексную калибровку и контроль основных параметров РЭМ, обеспечивают привязку измеряемых величин в нанометровой области к первичному эталону единицы длины – метру.

Аттестация эталонов сравнения осуществляется с использованием трехмерной интерферометрической системы измерений наноперемещений. Аттестуются шаг меры и размеры верхних и нижних оснований выступов и канавок (ширина линии), а также высота (глубина) рельефа. Мера позволяет по одному ее изображению в РЭМ выполнить калибровку микроскопа, определить его увеличение, линейность шкал и диаметр электронного зонда. При одном и том же шаге структуры возможно изготовление эталонов сравнения с шириной линий в диапазоне 10 – 1500 нм и высотой рельефа 100 – 1500 нм [2].

При необходимости можно контролировать параметры РЭМ непосредственно в процессе измерений размеров исследуемого объекта, что является дополнительной гарантией их высокого качества. Мера позволяет легко автоматизировать линейные измерения и создавать на основе РЭМ автоматизированные измерительные комплексы. В частности, в НИЦПВ создан такой комплекс на основе РЭМ JSM-6460LV для линейных измерений в области размеров от 1 нм до 100 мкм.

Однако, существенным недостатком данной меры является ее цена. И не многие организации могут позволить покупку этих мер.

В РТВ (Германия) калибровку РЭМ выполняют с помощью 2D мер с шагом периодической структуры 200 нм, 300 нм, 1000 нм и др. Одним из средств их высокоточной калибровки горизонтальных периодов калибровочных решеток в микро- и нанометровом диапазоне является оптический дифрактометр. Принцип измерения основан на модифицированной конфигурации Литтрова, где падающий и дифрагированный лазерные лучи находятся почти на одной прямой. В этой установке могут быть использованы различные длины волн лазера, от 266 нм до 633 нм. Исходя из параметров длины волны УФ лазера, наименьший измеримый шаг составляет около 150 нм. В зависимости от качества образца, погрешность измерения может быть менее 10 нм. [3]

В дифрактометре (рис. 1) для реализации мульти-волнового метода используются три различных лазера: мультилучевой He-Ne лазер, который излучает в 633 нм, 594 нм и 543 нм диапазоне длин волн, Argon Ion лазер с различными длинами волн, обычно в нем используются 514 нм, 496 нм и 476 нм, и квадрочастотный Nd:YAG лазер с длиной волны около 266 нм. Это обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с одно-волновыми установками: имеется возможность сравнить и проверить результаты, чтобы определить зависимые от используемых длин волн ошибки, а также выбирать длину волны, которая лучше всего подходит для выбранной решетки.

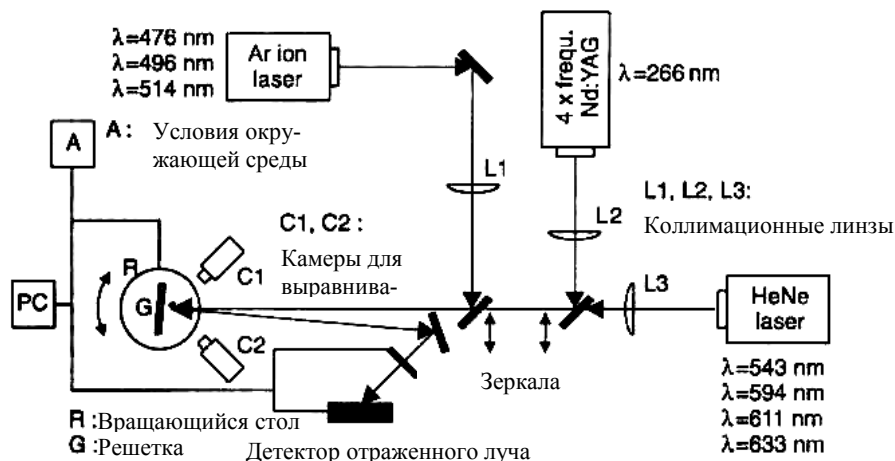


Рис. 1. Схематический вид измерительной установки

Мощность лазеров, подаваемая на образцы - несколько мВт. Лазерные лучи фокусируются на образце в пятно диаметром около 1 мм.

Один существенный недостаток присущ принципу измерения Литтрова – это неточное определение измерения положения, которое определяется положением лазерного пятна на

решетке. Т.е с помощью такого метода калибровки мы получаем усредненное значение периода в конкретном световом пятне. Помимо того, что не существует резкой границы области измерения, световое пятно на образце меняется по размеру в зависимости от угла между решеткой и направлением лазера.

В Украине растровая электронная микроскопия представлена РЭМ-106И. Он представляет собой измерительный прибор для автоматизированных измерений линейных размеров микрорельефа поверхности в диапазоне линейных измерений от 5 мкм до 200 нм. Он обладает следующими границами допустимых ошибок измерений:

- в диапазоне свыше 0,2 мкм до 0,8 мкм  $\pm$  40 нм;
- в диапазоне свыше 0,8 мкм до 5000 мкм  $\pm$  4% при разрешающей способности 4 нм в режиме вторичных электронов и 6 нм в режиме отраженных электронов.

РЭМ-106И комплектуется мерами штриховыми российского производства для градуировки увеличений электронных микроскопов в диапазоне увеличений от 10 до 300 000 крат.

Меры представлены в трех вариантах исполнения: сеточные с известными значениями периодов – ячеек сеточек; сеточные с нанесенными на них тонкими репликами дифракционной решетки с известным периодом реплик; чипов из немагнитных материалов с нанесенными на них тонкими репликами дифракционных решеток – с известным периодом реплик.

Для калибровки РЭМ-106И применяются меры штриховые МШ-1,65-1(2), МШ-0,83-1(2), МШ-100, МШ-30.

Меры штриховые МШ-1,65-1; МШ-0,83-1; МШ-0,83-1К (период 1,67 и 0,85 мкм соответственно) представляют собой угольные реплики с дифракционных решеток, которые нанесены на электролитические медные сетки диаметром 3 мм, имеют калиброванное значение периода решетки и отненены золотом. Предназначены для калибровки и поверки электронных микроскопов в диапазоне увеличений от 500 до 300000 крат.

В ННЦ «Институт метрологии» существует Государственный первичный эталон единицы длины для измерений параметров шероховатости  $R_{max}$ ,  $R_z$  и  $R_a$  в диапазоне от 0,025 мкм до 1600 мкм.[4]

Основой эталона (рис. 2) является интерференционный микроскоп, в котором профиль поверхности образца преобразуется в изображение на интерференционной картине. Схема построения интерференционного микроскопа позволяет получить высокие характеристики по фазовому и пространственному разрешению.

Интерференционный микроскоп соединяет в себе интерферометр и микроскоп.

Микроскоп эталона позволяет визуализировать отдельные структурные элементы поверхности образца и производить измерения в латеральном направлении с помощью интерферометра перемещения  $x(y)$ -интерферометра. Нижняя граница диапазона этих измерений определяется

пределом оптического разрешения микроскопа. При освещении в видимой области спектра (400 – 700 нм) теоретический предел разрешения примерно 200-350 нм. Реальное разрешение составляет более 350 нм.



Рис. 2. Устройство в составе эталона для вертикальных и латеральных измерений

В качестве объектов для латеральных измерений были взяты штриховые меры для калибровки увеличения растровых электронных микроскопов (РЭМ), описанные ранее, а также периодическая шаговая структура.

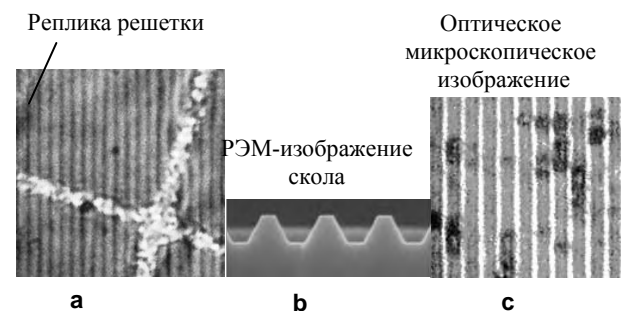


Рис. 3. Изображения структур для латеральных измерений: а – решетка для калибровки РЭМ (оптическое микроскопическое изображение) б, с – периодическая шаговая структура

Меры для калибровки увеличения РЭМ (рис. 3) – угольные реплики дифракционных решеток 600 линий/мм и 1200 линий/мм. Эти реплики зафиксированы на опорной медной электролитической

скої сетке с периодом 30 или 100 мкм и отненены золотом. Номинальные паспортные значения периода данных мер ( $1670 \pm 50$ ) нм и ( $850 \pm 30$ ) нм. Измеренные значения – 1660 нм и 837 нм соответственно. Измеренное среднее значение ширины линии для первой меры – 760 нм, а для второй меры ширина линии оценивалась примерно как 350 нм, что для данного микроскопа и способа освещения находится на уровне предела его разрешающей способности.

### Выводы

1. В Украине устройство калибровки мер микро- и нанометрового диапазона обладает разрешением порядка 350 нм, т.к. в ее основе лежит оптический метод.
2. Разработки в Украине метрологических установок высокого разрешения для поверки и калибровки эталонных мер нанометрового диапазона будут способствовать повышению качества измерений.
3. Создание эталона для измерений в нанометровом диапазоне на основе РЭМ, позволит осуществлять калибровку мер малой длины с разрешением от 1 нм. Для его калибровки и перевода из средств визуализации необходимо создание ряда эталонных мер. Их необходимо калибровать либо в странах, имеющих установки для калибровки мер нанометрового диапазона (что будет дешевле), либо создавать в Украине подобную установку (что позволит калибровать большое

количество решеток не только для себя, но и для других организаций).

4. Создавать эталон для измерений в нанометровом диапазоне необходимо с учетом достижений в этой области Германии и России.

### Список литературы

1. Российский прототип международного тест-объекта нанорельефа для РЭМ и АСМ. / В. Гавриленко, Ю. Новиков, Ю. Озерин, А. Раков, П. Тодуа, // *Наноиндустрия*. – 2008. – № 6. – С. 22-26.
2. Калибровка растрового электронного микроскопа по двум координатам с использованием одного аттестованного размера / Ч.П. Волк, Ю.А. Новиков, А.В. Раков, П.А. Тодуа // *Измерительная техника*. – 2008. – № 6. – С. 18-20.
3. *Multi-wavelength VIS/UV optical diffractometer for high-accuracy calibration of nano-scale pith standarts* / Egbert Buhr, Winfried Michaelis, Alexandr Diener, Werner Mirande // *Meas. Sci. Technol.* – 2007. – 18. – P. 667-674.
4. Ковишов С.Б. Измерения трехмерных структур на интерференционном микроскопе с интерферометром перемещения / С.Б. Ковишов, В.С. Купко, И.В. Лукин // *Украинский метрологический журнал*. – 2009. – № 2. – С. 39-43.

Поступила в редколлегию 12.08.2011

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. И.В. Руженцев, Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, Украина.

## ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ НАНОМЕТРОЛОГІЇ В УКРАЇНІ З ВИКОРИСТАННЯМ РАСТРОВИХ ЕЛЕКТРОННИХ МІКРОСКОПІВ

К.П. Неєжмаков

*Розвиток мікроелектроніки, мікромеханіки, нанотехнологій вимагає вдосконалення методів вимірювання лінійних розмірів елементів топології мікросхем, аналізу поверхневих структур, а також вимагає засобів вимірювань, які підтверджують достовірність результатів вимірювань розмірів реальних об'єктів і їх елементного складу. Вимірювання лінійних розмірів в мікронних і субмікронних діапазонах методом растрової електронної мікроскопії на сьогоднішній день вважаються одними з найбільш точних.*

*Слід зазначити, що провідні країни світу, що займають ключові позиції в мікроелектроніці, питань впровадження метрології в практику лінійних вимірювань в мікро-і нанометровому діапазонах приділяють першорядне значення.*

**Ключові слова:** нанометрологія, растровий електронний мікроскоп, міри, калібрування, еталон.

## FUTURE DEVELOPMENT OF NANOMETROLOGY WITH USING SCANNING ELECTRON MICROSCOPY IN UKRAINE

K.P. Neiezhmakov

*The development of microelectronics, micromechanics, nanotechnology requires improved methods for measuring the linear dimensions of the elements of the topology of the chip, analysis of surface structures, and also requires measuring instruments, confirming the validity of the measurements of the dimensions of real objects and their elemental composition. Measurements of linear dimensions in the micron and submicron range by scanning electron microscopy today is considered one of the most accurate.*

*It should be noted that the leading countries of the world, occupying key positions in microelectronics and implementation issues in the practice of metrology of linear measurements in micro-and nanometer ranges give paramount importance.*

**Keywords:** nanometrology, scanning electron microscope, the measures, calibration, standard.