

# РЕАЛИЗАЦИЯ НАНОШКАЛЫ В РОССИИ

**Р**азвитие нанотехнологии требует решения проблемы обеспечения единства линейных измерений в нанометровом диапазоне. Для этого необходимо решить проблему создания системы линейных измерений в этом диапазоне с абсолютной привязкой к Первичному эталону единицы длины – метру.

## КОНЦЕПЦИЯ МЕТРОЛОГИИ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ В НАНОДИАПАЗОНЕ

Реализация наношкалы основана на концепции метрологии линейных измерений нанометрового диапазона, которая обеспечивает в России единство этих измерений. Концепция включает:

- материальный носитель Первичного эталона единицы длины – метра,
- измерители наноперемещений на основе лазерных интерферометров-фазометров,
- трехмерный измеритель наноперемещений на основе атомно-силового микроскопа (АСМ), перемещение по трем координатам которого контролируется лазерными измерителями наноперемещений,

- трехмерные меры малой длины – материальные носители нанометрового размера по трем координатам, аттестуемые на трехмерном измерителе наноперемещений,
- методики калибровки имеющихся у потребителя для работы в нанодиапазоне растровых электронных микроскопов (РЭМ) и АСМ,
- алгоритмы измерений размеров рельефных наноструктур на РЭМ и АСМ и соответствующее им математическое и программное обеспечение,
- российские национальные стандарты на меры малой длины и методики поверки и калибровки РЭМ и АСМ.

Схема передачи размера единицы длины в нанодиапазон представлена на рис.1 и демонстрирует связи отдельных элементов концепции друг с другом.

## НАНОМЕТРОЛОГИЯ ЛИНЕЙНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

### Первичный эталон единицы длины – метр

В основе этой схемы лежит Первичный эталон единицы длины – метр. Материальным носителем такого эталона является длина волны излучения He-Ne/ $I_2$ -лазера, стабилизированного по линии насыщенного поглощения в молекулярном йоде. Параметры его излучения составляют:

$$\nu = 473612214705 \text{ кГц}, \quad \lambda = 632,99139822 \text{ нм}.$$

Первичный эталон метра, реализующий этот физический принцип, обеспечивает воспроизведение единицы длины – метра с абсолютной погрешностью 0,02 нм.

### Трехмерный интерферометрический измеритель наноперемещений

Трехмерный интерферометрический измеритель наноперемещений [1], схема которого показана на рис.2, со-

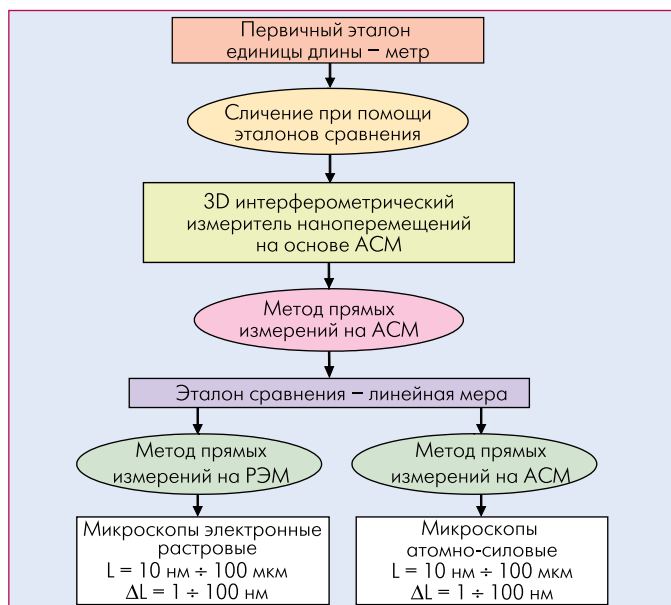
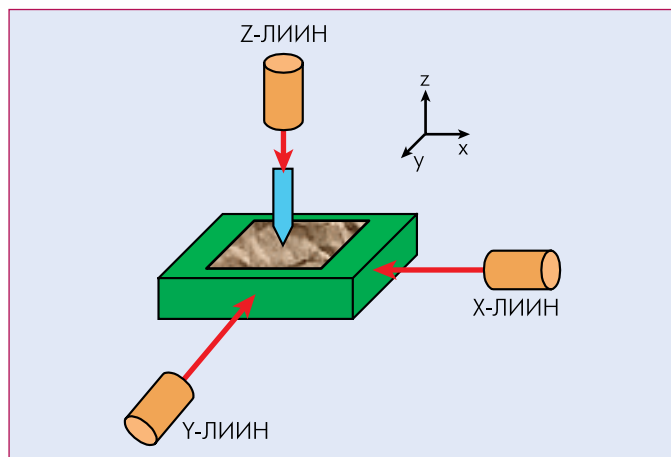


Рис.1 Схема передачи размера единицы длины в нанодиапазон для измерения размеров элементов рельефных структур



**Рис.2** Схема трехмерного лазерного интерферометрического измерителя наноперемещений (ЛИИН)

здан на основе АСМ оригинальной конструкции и трех лазерных интерферометрических измерителей наноперемещений [2]. Он предназначен для измерения линейных перемещений по трем координатам и аттестации линейных мер и тест-объектов, используемых для калибровки измерительных систем потребителей. Диапазон области перемещений по X и Y – 1–3000 нм, по Z – 1–1000 нм. Точность измерений перемещений по X и Y – 0,5 нм,

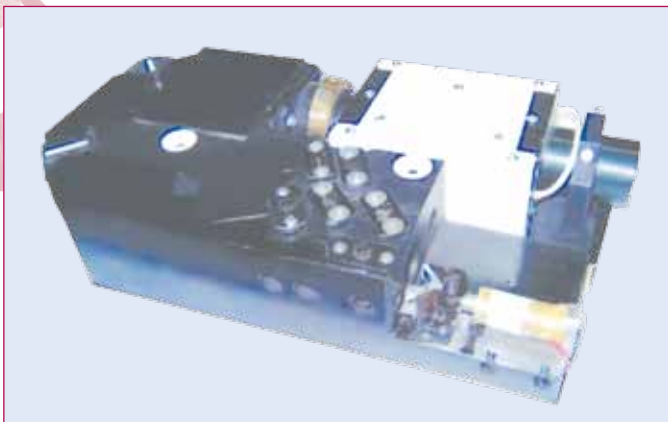
по Z – 0,5–3 нм. Диапазон смещений области перемещений – 0–10 мм.

Непосредственное измерение наноперемещений по X, Y и Z координатам в трехмерном измерителе осуществляется тремя лазерными интерферометрическими измерителями наноперемещений [2].

### Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений

Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений (ЛИИН) [2] предназначен для измерений линейных перемещений в реальном масштабе времени, в том числе, для калибровки систем сканирования и позиционирования в микро- и нанотехнологии, точном машиностроении, микромеханике, робототехнике, растровой электронной и сканирующей зондовой микроскопии. Диапазон измерений перемещений – 1 нм–10 мм, дискретность отсчета – 0,1 нм. Абсолютная погрешность измерений лежит в диапазоне 0,5–3 нм при максимальном значении измеряемой скорости перемещения 3 мм/с.

В конструкции ЛИИН заложена комбинация методов интерферометрии и фазометрии. С целью обеспечения макси-

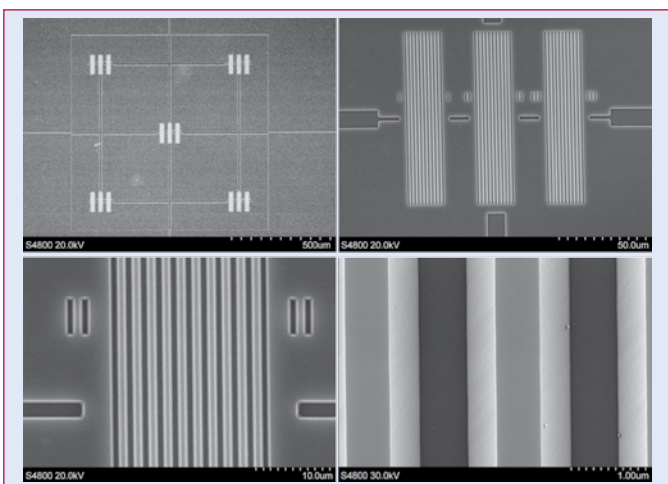


**Рис.3** Оптический блок лазерного интерферометрического измерителя наноперемещений

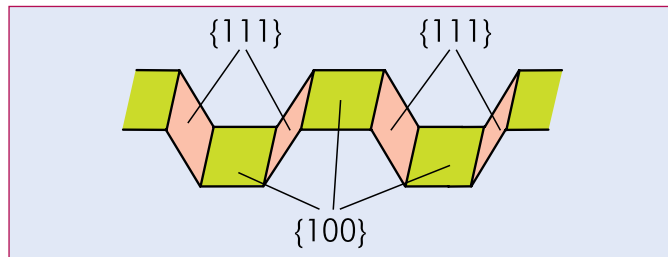
мальной чувствительности и быстродействия в конструкции изделия реализована схема измерений на основе двухчастотного лазерного гетеродинного интерферометра с переносом частоты измерительного сигнала в радиодиапазон. Оптическая схема измерений реализована на основе двухлучевой интерференции с использованием модифицированного интерферометра Майкельсона. В качестве материального носителя единицы длины используется He-Ne-лазер российского производства типа "ЛГН-304". На рис.3 приведена фотография оптического блока ЛИИН. (Более подробная информация о конструкции и параметрах ЛИИН приведена в [2].)

### Эталон сравнения – линейная мера

В качестве линейной меры в России используется тест-объект МШПС-2.0К [3], представляющий собой шаговые структуры на поверхности кремния, плоскость которой совпадает с кристаллографической плоскостью (100). Элементы шаговых структур (выступы и канавки) имеют трапециевидный профиль с большими углами наклона боковых стенок. Тест-объекты могут иметь разные размеры элементов (ширины и высоты выступов), но один номинальный размер шага 2000 нм. Высота выступов может быть обеспечена в диапазоне 100–1200 нм, а их ширина (размер верхнего основания



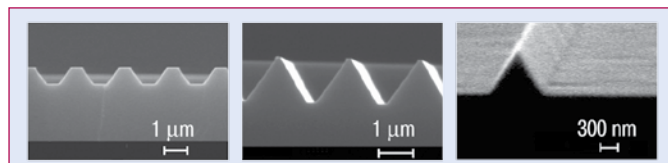
**Рис.4** Микрофотографии тест-объекта МШПС-2.0К, выполненные на РЭМ S 4800 при разных увеличениях



**Рис.5** Схема расположения кристаллографических плоскостей кремния в структуре, полученной анизотропным жидкостным травлением пластины с ориентацией поверхности (100) сквозь окна в маске

выступа) – в диапазоне 5–700 нм. Вид тест-объекта в РЭМ при разных увеличениях приведен на рис.4.

Рельеф структуры получают в процессе анизотропного жидкостного травления пластины Si(100) через литографическую маску. В результате травления профиль каждой канавки имеет форму трапеции. Боковые стороны канавок совпадают с кристаллографическими плоскостями {111}, а дно канавок и верх выступов – с кристаллографическими плоскостями {100} (рис.5). Угол наклона боковой стороны относительно нормали к нижнему основанию равен углу между кристаллографическими плоскостями (100) и (111) и составляет  $\varphi = \text{arctg}\sqrt{2} \approx 35,26^\circ$ . Глубина рельефа определяется временем травления.



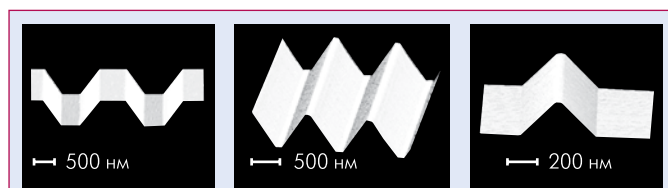
**Рис.6** Изображения в РЭМ сколов тест-объектов МШПС-2.0К с разными высотой и шириной выступов

На рис.6 приведены микрофотографии сколов структур тест-объектов МШПС-2.0К с разными шириной и высотой выступов, демонстрирующие форму профиля элементов тест-объекта, а на рис.7 – изображения отдельных элементов тест-объектов в АСМ. (Более подробно с тест объектом МШПС-2.0К можно ознакомиться в [3]).

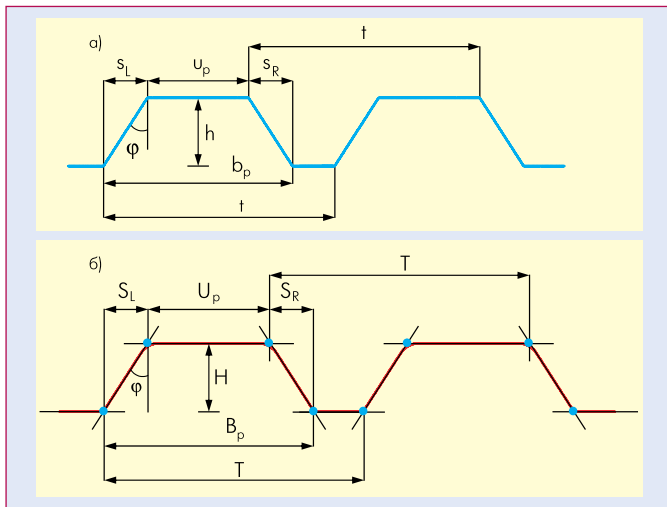
Аттестация тест-объекта осуществляется на трехмерном интерферометрическом измерителе наноперемещений с помощью метода прямых измерений на АСМ.

### Метод прямых измерений на АСМ

Передача размера от трехмерного интерферометрического измерителя наноперемещений к эталону сравнения и от



**Рис.7** Изображения отдельных элементов тест-объектов МШПС-2.0К с разными шириной и высотой выступов, полученные на АСМ



**Рис.8** Схемы выступа с трапециевидным профилем (а) и трапециевидного приближения сигнала (б) с обозначением параметров выступа (а) и сигнала (б)

него к находящемуся в распоряжении потребителя АСМ осуществляется с помощью метода прямых измерений.

При условии малости радиуса  $r$  острия кантилевера по сравнению с величинами параметров выступа (рис.8а) [4]

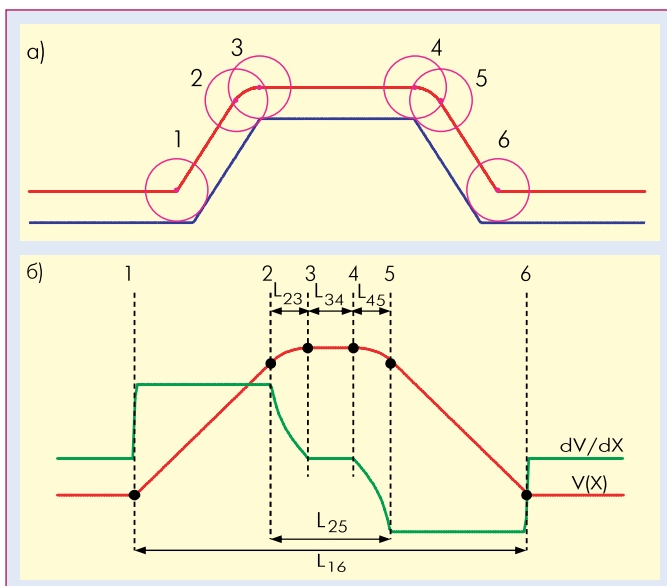
$$b_p \gg 2r, \quad u_p \gg 2r, \quad s_{L,R} \gg 2r \quad (1)$$

форма сигнала АСМ близка к трапеции.

На рис.8 приведены схемы выступа с трапециевидным профилем (рис.8а) и сигнала (рис.8б) с обозначением параметров выступа и сигнала. Некоторые параметры выступа (см. рис.8а) для структуры с большими углами наклона боковых стенок связаны с параметрами сигнала (см. рис.8б) с помощью выражений

$$t = m_x T, \quad h = m_z H, \quad s_L = m_x S_L, \quad s_R = m_x S_R, \quad (2)$$

где  $m_x$  – цена деления шкалы оси  $X$ , а  $m_z$  – цена деления шкалы оси  $Z$ .

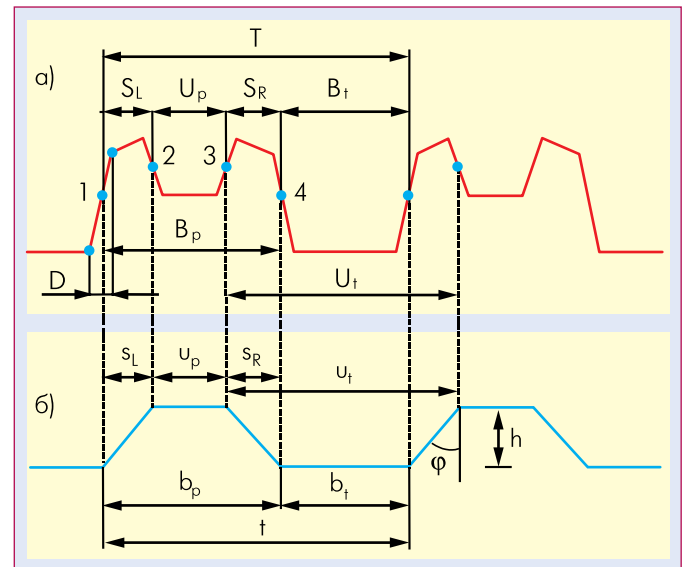


**Рис.9** Схема формирования контрольных точек сигнала АСМ (а) при сканировании трапециевидных выступов с большими углами наклона боковых стенок и схемы сигнала АСМ  $V(X)$ , его первой производной  $dV/dX$  и связи особенностей сигнала и его первой производной (б)

Однако не все параметры АСМ удобно измерять на самом сигнале  $V(X)$ . Размер верхнего основания выступа лучше измерять на производной сигнала  $dV/dX$ . На рис.9а приведена схема формирования сигнала острием кантилевера. Положения острия 1–6 характеризуют границы прямых линий, из которых состоит сигнал. На рис.9б показана связь положений этих границ с особенностями первой производной сигнала АСМ. Из этой связи можно получить

$$L_{34} = u_p/m, \quad L_{23} = L_{45} = r \cos\phi/m_x, \quad (3)$$

где  $L_{ij}$  – расстояние между проекциями точек  $i$  и  $j$  на сигнале и его первой производной (рис.9б) на направление сканирования.



**Рис.10** Схемы сигнала высоковольтного (>15 кВ) РЭМ (а), получаемого при сканировании шаговой структуры (б) с трапециевидным профилем и большим наклоном боковых стенок, и обозначения параметров элементов структуры и сигнала

Таким образом, на АСМ можно определить прямым методом параметры структуры: шаг  $t$ , размеры  $s_L$  и  $s_R$  проекций боковых наклонных стенок и размер  $u_p$  верхнего основания трапециевидного выступа, а также эффективный радиус  $r$  острия кантилевера.

### Метод прямых измерений на РЭМ

Передача размера от эталона сравнения к находящемуся у потребителя РЭМ осуществляется с помощью метода прямых измерений [5].

Рис.10 поясняет формирование сигнала РЭМ при сканировании электронным зондом шаговой структуры с большими углами наклона боковых стенок. На рис.10а приведена схема сигнала, получаемого при сканировании шаговой структуры на высоковольтном РЭМ, а на рис.10б – схема самой структуры с большими углами наклона боковых стенок и параметры сигнала (см. рис.10а) и структуры (см. рис.10б). При выполнении условий

$$s_{L,R} = h \operatorname{tg}\phi \gg d, \quad b_{p,t} \gg d, \quad u_{p,t} \gg d \quad (4)$$

параметры сигнала (см. рис.10а), шаговой структуры (см. рис.10б) и РЭМ (размер пикселя  $m$  и эффективный диаметр зонда  $d$ ) [6] связаны друг с другом выражениями [5]:

$$t = mT, \quad d = mD, \quad s_L = mS_L, \quad s_R = mS_R, \quad (5)$$

$$u_p = mU_p, \quad b_p = mB_p, \quad u_t = mU_t, \quad b_t = mB_t. \quad (6)$$

Поэтому, используя любой параметр тест-объекта (выражения (5) и (6)), можно калибровать РЭМ (определять размер пикселя и эффективный диаметр электронного зонда [6]).

### Реализация нанoshкалы у потребителя

В практике измерения в нанометровой области проводятся с помощью имеющихся у потребителя РЭМ и АСМ. Для обеспечения единства измерений необходимо проводить калибровку этих сложных измерительных устройств с помощью эталонов сравнения – линейных мер, выполненных в виде рельефных шаговых структур с заданными шириной, высотой (глубиной) и формой профиля. В России в качестве таких мер используются тест-объекты с трапециевидным профилем и большими углами наклона боковых стенок (МШПС-2.0К или аналогичные), а сама калибровка микроскопов осуществляется с помощью методов прямых измерений на АСМ [4] или РЭМ [5]. Такая калибровка позволяет проводить измерения линейных размеров элементов наноструктур в диапазоне  $L = 10 \text{ нм} - 100 \text{ мкм}$  с погрешностью  $\Delta L = 1 - 100 \text{ нм}$ .

### Российские национальные стандарты

Для нормативного обеспечения нанометрологии в России разработаны семь национальных стандартов, регламентирующих создание и применение эталонов сравнения – линейных мер для калибровки РЭМ и АСМ:

**ГОСТ Р 8.628-2007.** Меры рельефные нанометрового диапазона из монокристаллического кремния. Требования к

геометрическим формам, линейным размерам и выбору материала для изготовления.

**ГОСТ Р 8.629-2007.** Меры рельефные нанометрового диапазона с трапециевидальным профилем элементов. Методика поверки.

**ГОСТ Р 8.630-2007.** Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые измерительные. Методика поверки.

**ГОСТ Р 8.631-2007.** Микроскопы электронные растровые измерительные. Методика поверки.

**ГОСТ Р 8.635-2007.** Микроскопы сканирующие зондовые атомно-силовые. Методика калибровки.

**ГОСТ Р 8.636-2007.** Микроскопы электронные растровые. Методика калибровки.

**ГОСТ Р 8.644-2008.** Меры рельефные нанометрового диапазона с трапециевидальным профилем элементов. Методика калибровки.

Стандарты введены в действие в 2008–2009 гг.

Созданная в России система линейных измерений в нанодиапазоне реализована в организациях Агентства по техническому регулированию и метрологии России, Центрах коллективного пользования уникальным оборудованием, Научно-образовательных центрах подготовки кадров для нанотехнологии и Сертификационных центрах продукции наноиндустрии.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Kalendin V.V., Chernyakov V.N., Todua P.A., Zhelkovaev Zh. Etalon interferometric comparator for 3D measurements of surface topography, based on the scanning tunnel and atomic force microscopes. – Proc. of the 9-th International Precision Engineering Seminar. Germany, 1997, p. 138–139.
2. Дарзбек С.А., Желкобаев Ж., Календин В.В., Новиков Ю.А. Лазерный интерферометрический измеритель наноперемещений. – Труды ИОФАН, 2006, т. 62, с. 14–35.
3. Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Озерин Ю.В., Плотников Ю.И., Прохоров А.М., Раков А.В. Линейная мера микронного, субмикронного и нанометрового диапазона для измерений размеров элементов СБИС на растровых электронных и атомно-силовых микроскопах. – Микроэлектроника, 2002, т. 31, № 4, с. 243–262.
4. Novikov Yu.A., Filippov M.N., Lysov I.D., Rakov A.V., Sharonov V.A., Todua P.A. Direct measurement of the linewidth of relief element on AFM in nanometer range. – Proc. of SPIE, 2008, v. 7025, p. 702510-1 – 702510-10.
5. Novikov Yu.A., Gavrilenko V.P., Rakov A.V., Todua P.A. Test objects with right-angled and trapezoidal profiles of the relief elements. – Proc. of SPIE, 2008, v. 7042, p. 704208-1 – 704208-12.
6. Волк Ч.П., Горнев Е.С., Новиков Ю.А., Плотников Ю.И., Раков А.В., Тодуа П.А. Проблемы измерения геометрических характеристик электронного зонда растрового электронного микроскопа. – Труды ИОФАН, 2006, т. 62, с. 77–120.

## НОВЫЕ КНИГИ

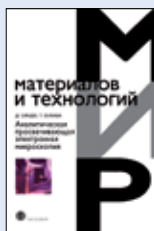
Д. Синдо, Т. Оикава

### Аналитическая просвечивающая электронная микроскопия

Монография посвящена особенностям конструкции современных просвечивающих электронных микроскопов (ПЭМ), спектроскопии потерь энергии электронов (СПЭЭ), энергодисперсионной электронно-зондовой рентгеновской спектроскопии (ЭДС), а также цифровым системам регистрации изображений, в том числе на основе цифровых ПЗС-камер и системам на основе электронно-стимулированной фотолюминесценции (IP-системам), устанавливаемым на современные ПЭМ. Дано подробное описание аналитических методик и интерпретации полученных результатов.

В книге представлено описание новейшего метода трехмерной томографии с помощью ПЭМ и метода ALCHEMI для анализа дефектов замещения в кристаллах. Также изложены прикладные методы для анализа магнитных материалов, метод электронной голографии.

Переводное издание. 2006. – 256 с., ISBN 5-94836-064-4



### Как заказать наши книги?

По почте: 125319 Москва, а/я 91

По тел./факсу: (495) 956-3346, 234-0110

E-mail: knigi@technosphera.ru; sales@technosphera.ru