



# Измерения ультрамалых размеров в микроэлектронике

С. Максимов

## Российский метод

Недавно на страницах нашего журнала (№3–4/97) была опубликована статья С. Максимова, посвященная проблемам метрологии в микроэлектронике, в частности методологии, принятой в США. Сегодня мы вновь возвращаемся к этой теме, но теперь уже для того, чтобы рассказать об альтернативном методе измерений субмикронных размеров, разработанном в России. Возможности этого метода впечатляют, а вот перспективы применения пока волнуют только создателей метода и их частных инвесторов. У государственных же структур, видимо, хватает забот поважнее, хотя в данном случае речь идет о национальном приоритете в одной из ключевых технологий микроэлектроники.

Как известно, контроль — это неотъемлемая часть любого технологического процесса. Без него невозможны ни дальнейшее развитие технологии, ни ее применение в производстве. Важнейшая разновидность контроля — измерение размеров. Наиболее остро проблема высокоточных и воспроизводимых измерений размеров стоит в микроэлектронике, где к 2010 году ожидается уменьшение критических размеров элементов (КР) до 0,07 мкм [1]. Подобные измерения необходимы также в медицине, фармацевтике, прецизионном машиностроении, и особенно в геномной инженерии.

Сегодня наиболее перспективным инструментом для субмикронных измерений признана растровая электронная микроскопия (РЭМ) [2,3]. Однако РЭМ-изображение воспроизводит объект не точно. Так, из-за ограниченного разрешения прибора четкие края объекта на РЭМ-изображении всегда размыты. Точная локализация края объекта — главная проблема РЭМ-метрологии [2–5].

Основное отличие российского метода от американского подхода к измерениям ультрамалых размеров состоит в том, что в нашей стране основной упор был сделан на локализацию точного положения краев на РЭМ-микрофотографиях [5, 6]. В США, а вслед за ними и во всем остальном мире, эту задачу считают пока неразрешимой [2].

### Теоретические и экспериментальные предпосылки российского подхода в метрологии ультрамалых размеров

На микроскопических изображениях можно выделить точки, в которых пересекаются профили интенсивности для изображений с различной фокусировкой. В световой [7] или в просвечивающей электронной микроскопии [8] данные точки с точностью до ошибок, обусловленных абберрациями, локали-

зованы на краях наблюдаемого объекта. В отечественной литературе эти точки получили название “инвариантных” [4].

Российский подход в метрологии ультрамалых размеров основан на концепции универсальности свойств инвариантных точек для различных микроскопических методов. Возможность использования связи между положением инвариантных точек РЭМ-изображений с краями объекта в метрологии отмечалась и в американской литературе, где эти точки называют изофокальными [9]. Однако в США идея не получила развития, что, по-видимому, обусловлено двумя факторами. Во-первых, при экспериментальных исследованиях выявление и позиционирование инвариантных точек затруднено абберрациями [10]. Во-вторых, при теоретическом изучении РЭМ-изображений в США используют компьютерное моделирование на основе метода Монте-Карло. Расчеты по этому методу требуют значительных вычислительных ресурсов. Необходимая точность при относительно небольших затратах машинного времени достигается только на суперсовременных ЭВМ типа “Крей” [11]. Это делает подобные расчеты труднодоступными даже для американских специалистов, что не позволило им развить идею. Проблема моделирования РЭМ-изображений остается одной из ключевых в американской метрологии ультрамалых размеров. Не случайно развитие вычислительных методов — одно из важных требований Roadmap [1].

В России для анализа закономерностей РЭМ-изображений развито приближение, основанное на использовании транспортного уравнения Больцмана [12,13]. Согласно этому приближению видеосигнал в плоскости изображения может быть выражен как свертка функции объекта с функцией, описывающей распределение плотности

электронов в пучке электронов на поверхности образца:

$$S(u) \cong \int_{-\infty}^{\infty} K(u') \times \exp[-(u-u')^2 / \sigma^2] du',$$

где  $u$  — координата в плоскости изображения вдоль линии сканирования,  $u'$  — координата вдоль той же линии, но в плоскости объекта,  $K(u')$  — функция объекта, т.е. его точечный ответ на единичный электрон пробы;  $\sigma$  — гауссовский радиус пробы.

Если функция объекта известна, то моделирование видеосигналов не вызывает трудностей и может выполняться на персональном компьютере [4,5]. При таком подходе определение функции объекта — ключевой момент всей процедуры математического моделирования видеосигнала. Российские исследователи определили функции объекта для многих практически важных случаев. Сопоставление расчетных видеосигналов с экспериментальными демонстрирует хорошее совпадение таких важных характеристик, как наличие экстремумов, их формы и местоположения, а также формы восходящей и нисходящей ветвей видеосигнала, зависимости видеосигнала от ускоряющего напряжения и размеров пробы, влияние наклона образца и пр. (рис.1). Анализ

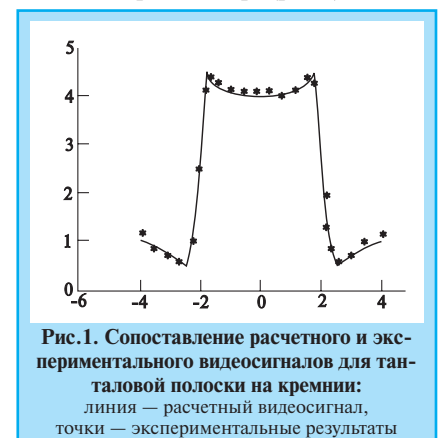


Рис.1. Сопоставление расчетного и экспериментального видеосигналов для танталовой полоски на кремнии: линия — расчетный видеосигнал, точки — экспериментальные результаты

многих тысяч расчетных видеосигналов, соответствовавших различным экспериментальным условиям (ускоряющему напряжению, плотности тока, диаметру пробы на поверхности объекта, материалу объекта, параметрам рельефа), подтвердил, что положение о связи между инвариантными точками и краями объекта выполняется с хорошей точностью для обратнорассеянных электронов (backscattered electrons, BSE) [4]. Это экспериментально подтверждено для различных типов объектов, в частности для элементов СБИС (рис. 2, 3).

Исследование расчетных и экспериментальных изображений показывает, что локализация инвариантных точек на краях объекта тем лучше, чем меньше размеры наблюдаемых объектов (конечно, если эти размеры превышают разрешение микроскопа). Данное правило наиболее строго соблюдается для объектов с рельефом прямоугольной формы или для безрельефных объектов, контраст на РЭМ-изображениях которых обусловлен вариациями состава объектов.

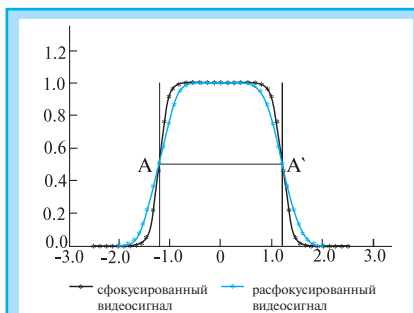
Сказанное справедливо и для изображений в проходящих электронах [9]. Наблюдения во вторичных электронах (secondary electrons, SE) дают увеличенное изображение объекта [10]. Измерения по этой технологии требуют корректировок.

### Практическая реализация измерений

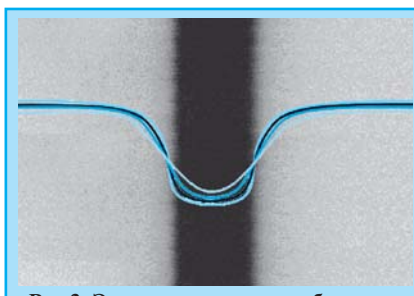
Измерения можно проводить на РЭМ, имеющих повышенную стабильность всех рабочих систем, особенно катодной и детекторной (на уровне не хуже  $10^{-6}$ ). Изображение регистрируется в числовой форме с помощью не менее чем 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя. Недопустимы искажения сигнала типа ступенек, возникающих при пушпульном усилении и больших увеличениях. Допустимая нелинейность систем регистрации и обработки сигнала — не выше 10 дБ. Столик объекта должен перемещаться вдоль оси микроскопа (z-контроль).

Сейчас методика ориентирована на обратнорассеянные (BSE) электроны. Однако измерения с использованием изображений в проходящих электронах (что особенно важно для медицины, фармакологии, генной инженерии и т.п.), по-видимому, не потребуют существенной коррекции метода. Переход же к вторичным (SE) электронам (рекомендуется при измерениях размеров элементов СБИС) [3, 14] вызовет необходимость его модификации.

Детекторные системы для регистрации видеосигналов различаются диаграммами направленности. Это приво-



**Рис.2. Расчетные видеосигналы, соответствующие BSE электронам и различным фокусировкам:**  
вертикальные линии отмечают положение краев объекта; точки пересечения видеосигналов лежат на краях объекта



**Рис.3. Экспериментальное изображение щелевого объекта [13,17] с наложенными на него видеосигналами:**  
видеосигналы различаются фокусировкой и пересекаются в одних и тех же точках, лежащих на краях объекта

дит к искажениям видеосигналов, зависящим от пространственной ориентации объектов. Еще более существенные искажения связаны с нелинейностями систем усиления видеосигналов ряда детекторов. Однако подобные искажения можно выявить экспериментально и учесть в алгоритмах обработки видеосигналов.

Русский метод измерений формализован как пакет программ обработки и набор инструкций по получению изображений, обеспечивающих необходимую точность измерений. В пакет входит программа для калибровки увеличения. Она работает как в диалоговом режиме, так и без вмешательства оператора. Протокол измерений (рис. 4, табл.2) содержит среднее значение измеренного размера (в нанометрах), среднеквадратичную ошибку и другую необ-

ходимую информацию. Пакет программ может встраиваться в программное обеспечение современных растровых электронных микроскопов, представляющих изображение в оцифрованном виде.

В отличие от США, где увеличение микроскопа калибруется по изображениям отдельных линий с известной шириной [2], в отечественной методике калибровку выполняют по среднему периоду голографической дифракционной решетки. Период решетки усредняют по результатам 2–5 тыс. индивидуальных измерений [15]. Дифракционная решетка калибруется на прецизионном оптическом дифрактометре, что позволяет аттестовать ее период с точностью  $5 \cdot 10^{-4}$ . В результате ошибка при калибровке увеличения не превышает 0,2 %.

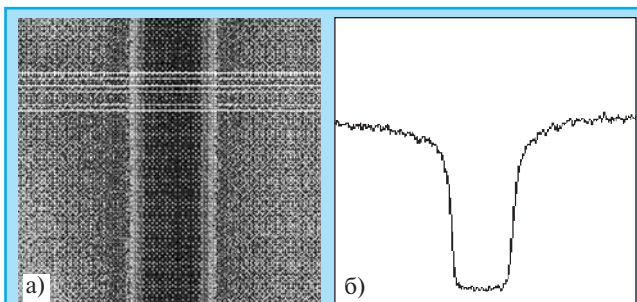
### Характеристики метода

Испытания метода проводились с помощью специальных щелевых тестов, разработанных профессором Института общей физики РАН А.В.Раковым [16]. Результаты проверки отражены в табл. 1. Метод также проверялся посредством измерений одних и тех же объектов, проводившихся в России и в Ньютоновской национальной физической лаборатории (Великобритания, д-р Дж.В.Нанн). Для объектов с размерами от 0,6 до 10 мкм расхождение результатов измерений в России и Великобритании не превышало 0,5%. Даже если рассматривать эти расхождения как ошибку метода (по наилучшей оценке), то и в этом случае общая ошибка измерений, включающая случайную и систематическую, описывается выражением  $L = \pm (5 + 0,005L)$  нм, где  $L$  — номинальный размер объекта.

Однако такая оценка метода занижает его реальные характеристики по точности и воспроизводимости. Исследования, при которых РЭМ-изображения моделировались расчетным путем, а затем использовались для определения размеров соответствующих объектов, показали, что ошибка измерений, как правило, не превышает 1 нм, а для большинства модельных объектов равна 0,3–0,5 нм. Подтвердить на практике теоретические воз-

Таблица 1  
**Характеристики русского метода измерений**

Характеристика	Экспериментально проверенное значение	Теоретическое значение
Область измеряемых размеров	> 100,0 нм	> 3 $\delta$ , где $\delta$ — разрешение
Точность в области 50–500 нм	< 5,0 нм	$\approx 1,0$ нм
Воспроизводимость ( $3\sigma$ ) усредненная по 512 измерениям	< 1,0 нм	< 1,0 нм
Время обработки видеосигнала	5 сек, с Pentium 166	зависит от используемого оборудования



**Рис. 4. Фрагмент протокола измерений ширины щели записывающей видеоголовки** (общее число линий сканирования — 512): а — экспериментальное изображение с нанесенными на него следами семи линий сканирования. б — типичный видеосигнал, соответствующий одной из линий сканирования

возможности метода не удалось из-за отсутствия объектов, размеры которых аттестованы с необходимой точностью. Поэтому в табл. 1 приводятся как экспериментально проверенные характеристики метода в предположении наилучшего случая, так и полученные в результате теоретических исследований.

Важно отметить, что метод не требует от персонала высокой квалификации и может быть полностью автоматизирован. Он применим для работы с металлами, полупроводниками, диэлектрическими пленками, биологическими объектами. Допускаются измерения как безрельфных, так и рельефных образцов большинства типов, в том числе объектов микроэлектроники.

### Преимущества метода

Российский метод позволяет решить проблему высокоточных и воспроизводимых измерений для важнейших типов объектов, превратив растровый электронный микроскоп из средства наблюдения в измерительный прибор для субмикронного диапазона. Но поскольку

изображений” не позволяет проводить абсолютные измерения, что особенно важно на стадиях разработки СБИС [1]. С другой — она уже сегодня не обеспечивает воспроизводимости измерений на уровне 2,5–3,5 нм, соответствующем требованиям Roadmap. А с переходом к КР в 0,13 мкм (рубеж 2001–2004 годов) она станет полностью непригодной [3,6].

Российский подход к измерениям малых размеров — огромный шаг вперед по сравнению с американским, поскольку уже сейчас обладает воспроизводимостью на уровне требований 2010 года (табл.3). Кроме того, он позволяет осуществлять абсолютные измерения, а не сравнительные, варьирующиеся вокруг неизвестной величины. Высочайшие метрологические характеристики метода не ограничивают

метод создавался в первую очередь для решения конкретных задач микроэлектроники, его возможности целесообразно сопоставить с требованиями этой отрасли промышленности, зафиксированными в Roadmap [1, Tab. 18].

С одной стороны, американская метрологическая стратегия “опорных

его производительность (непрерывное требование к измерительным методам в микроэлектронном производстве [3,6,14]); время обработки сигнала, составляющее менее пяти секунд при использовании стандартных персональных компьютеров (Pentium 166), с переходом к специализированным вычислительным средствам может быть уменьшено до долей секунды.

Какие же факторы препятствуют внедрению российской методики в мировую микроэлектронику, и можно ли в обозримом будущем их преодолеть?

### Нерешенные проблемы и перспективы

Многие метрологические проблемы в микроэлектронике вызваны необходимостью измерений на диэлектрических объектах: фоторезистивных масках, слоях оксидов и нитридов и т.д. РЭМ-изображения диэлектрических элементов искажаются вследствие накопления заряда диэлектриками. Особенно чувствительны к зарядовым эффектам изображения в низкоэнергетических SE-электронах. Так, изображения полоски фоторезиста с номинальной шириной 4 мкм при изменении ускоряющего напряжения в диапазоне от 0,9 до 2,5 кВ претерпевают кардинальные изменения: контраст меняется от темного к светлому и обратно к темному, на изображениях краев возникают и исчезают осцилляции интенсивности, видимая ширина изображения варьируется от 3,3 до 5,6 мкм [17].

Современная американская (и мировая) стратегия контроля СБИС, ориентированная на отбраковку структур, отличающихся от эталонных, не позволяет контролировать размеры отдельных элементов. Однако сегодня при работе с РЭМ-изображениями диэлектрических объектов в SE-электронах этот принципиальный недостаток пре-

Средний размер: 0,3706				СКО: 0,00036			
№ п/п	№ линии	Размер	Отклон. от ср.	№ п/п	№ линии	Размер	Отклон. от ср.
1	40	0,3711	0,0005	5	160	0,3720	0,0014
2	70	0,3690	-0,0016	6	190	0,3699	-0,0007
3	100	0,3708	0,0002	7	220	0,3693	-0,0013
4	130	0,3708	0,0002	8	250	0,3717	0,0011
Max: 0,3720				Min: 0,3690			

*№ п/п – порядковый номер измерения, № линии – номер линии сканирования, средний размер запроотоколированной серии измерений – 0,3703 мкм, разброс результатов измерений составляет 0,4 % от среднего, среднеквадратичная ошибка (СКО) – 0,00036 мкм или 0,1 % от измеренного значения. Все величины указаны в микрометрах*

Таблица 3  
Сопоставление характеристик российского метода измерений с требованиями Roadmap

Показатели	Изменение критических размеров элементов по годам (нм)	1995 0,35	1998 0,25	2001 0,18	2004 0,13	2007 0,10	2010 0,07
Требования	Допуски на КР (нм)	35	25	18	13	10	7
Roadmap	Требования Roadmap к воспроизводимости измерений 3 σ (нм)	3,5	2,5	1,8	Переход к “in line” и “in situ” измерениям		
Характеристики российского метода	Ошибка метода по наилучшей оценке (нм)	5,0		В результате дальнейших испытаний может только уменьшиться			
	Теоретическая ошибка метода (нм)	< 1,0		Возможно некоторое уменьшение			
	Экспериментальная воспроизводимость 3 σ (нм)	< 1 нм; (≈ 3 атома)		Возможно некоторое уменьшение			

вращается в достоинство. В самом деле, необходимо, чтобы полученные в идентичных условиях видеосигналы контролируемого и эталонного объектов были в достаточной мере близки, а степень искажений этих видеосигналов значення не имеет. Видеосигнал превращается в универсальную характеристику, благодаря которой отбраковка осуществляется независимо от конкретных особенностей, которыми данная СБИС отличается от эталонной. Метод “опорных изображений” позволяет выявлять различия не только в размерах элементов, но и в форме склонов, физико-химических свойствах материалов, формирующих объект, и т.п.

В отечественном методе при измерениях используются изображения в BSE-электронах с энергиями свыше 2 кэВ, которые практически не чувствительны к потенциалам в несколько десятков вольт, создаваемым зарядами в диэлектрических пленочных объектах [18]. Применение изображений, сформированных высокоэнергетичными BSE-электронами, предопределяет режим работы РЭМ и, в частности, необходимость ускоряющих напряжений свыше 5 кВ [10]. Однако облучение МОП-структур высокоэнергетичными электронами ведет к неконтролируемым изменениям их электрофизических параметров [3,6,14]. Поэтому измерения в микроэлектронике проводятся при ускоряющих напряжениях, меньших 2 кВ. Наметила тенденция к их ограничению десятками вольт. Столь низкий допустимый уровень ускоряющих напряжений вынуждает использовать изображения во вторичных SE-электронах, поскольку их выход гораздо выше выхода BSE. Современные измерительные РЭМ для микроэлектроники ориентированы на низковольтные режимы работы [14]. Следовательно, российский подход станет конкурентоспособным, если также будет переориентирован на измерения в SE-электронах.

В отечественном методе протяженность объекта измеряется в плоскости, делящей его высоту пополам. Однако для микроэлектроники более важны размеры “подошв” элементов [3,14]. В зарубежной стратегии контроль размеров “по подошвам” осуществляется на основе того же подобия сигналов, которое позволяет пренебречь искажениями, связанными с зарядкой диэлектрических элементов. При переходе к отечественной стратегии измерений контроль “по подошвам” требует модификации метода, пути которой еще предстоит найти.

Высочайшие метрологические характеристики отечественного метода в

значительной мере обеспечивает уникальная методика калибровки увеличения. Она предполагает, что измеряемый объект и эталон периода, с помощью которого калибруется увеличение, лежат в одной плоскости. Совпадение плоскостей достигается путем перемещений образца вдоль оси, параллельной оси микроскопа (z-контроль). Однако для современных измерительных РЭМ характерна тенденция к отказу от z-контроля, поскольку он усложняет процедуру измерений и снижает производительность. Значит, необходимо либо модифицировать метод либо вносить конструктивные изменения в РЭМ.

Можно назвать и другие недостатки российской методологии, например необходимость адаптации к современным типам детекторных систем (некоторые из них, в частности микроканальные, в нашей стране полностью отсутствуют). Но в сравнении с названными выше эти недостатки гораздо менее существенны, поскольку способы их устранения очевидны.

Зарубежные специалисты признают несовершенство и ограниченность своей стратегии контроля, ее неприменимость при переходе к КР, меньшим 0,18 мкм [3]. Однако существующий за рубежом метод контроля и микроэлектронная технология взаимно адаптированы, и переориентация на принципиально другую технологию контроля потребует многомиллионных затрат. Но это не исключает возможности использования российского метода для решения частных вопросов, например при разработке новых поколений СБИС или для аттестации эталонов. Такой путь стал бы существенным шагом в деле внедрения отечественной методики, поскольку по сути означал переход к двухступенчатой системе контроля, в которой первая ступень была бы российской.

Чтобы отечественный метод стал действительной альтернативой принятому за рубежом, американская стратегия измерений должна полностью исчерпать свои возможности. Roadmap предсказывает, что кризис наступит между 2001 и 2004 годами. Однако и в этом случае переход на российский метод измерений весьма проблематичен. Очевидно, что широкое внедрение в мировую микроэлектронику потребует его существенного усовершенствования, в частности обеспечения адекватных измерений диэлектрических объектов и измерения в плоскости “подошв”, переориентации на измерения в SE-электронах, согласования технологии измерений с конструктивными особенностями современных РЭМ и др.

Автор не видит непреодолимых препятствий для решения перечисленных

проблем, хотя усовершенствование метода потребует немалых затрат, а возможность получения успешных результатов всегда проблематична. Однако контроль в сфере измерений — это контроль над одной из ключевых технологий микроэлектроники, а значит, и определенное влияние на отрасль в целом. Поэтому риск вложений в методику измерений вполне оправдан.

## ЛИТЕРАТУРА

1. National Technology Roadmap for Semiconductors, SIA, 1995.
2. Postek M.T. — J.Res. of NIST, 1994, №9, Sept.–Oct, p.641.
3. Monahan K., Askary F., Elliot R. et al. — Proc.SPIE, 1997, (in press).
4. Аммосов Р.М., Козлитин А.И., Никитин А.В. — Измерительная Техника, 1994, №6, с.24.
5. Козлитин А.И., Никитин А.В. — Измерительная Техника, 1995, №2, с. 21.
6. Максимов С.К. — Электроника: Наука, Технология, Бизнес, 1997, № 3–4, с. 65.
7. Никитин А.В., Никитина М.А. Точное измерение микроразмеров. — Авт. свид. №1001 757, приоритет от 02.11.82.
8. Безрядин С.Н., Безрядина М.Г., Максимов С.К. — ДАН СССР, 1981, 260, № 2, с.339.
9. Postek M.T., Larrabee R.D., Keery W.J., Marx E. — Proceedings SPIE, 1464, 35.
10. Newbery D.E., Joy D.C., Echin P., Fiory C.E., Goldstein J.I. — Advanced Scanning Electron Microscopy and Microanalysis, 1987, Plenum Press, N.Y., L., p.454.
11. Hasegawa S., Iida Y. — J.Vac. Sci. and Technol. “B”, 1987, 38, № 1, p. 142.
12. Козлитин А.И., Никитин А.В. — Измерительная техника, 1995, 38, № 2, с. 160.
13. Bethe H.E., Rose M.E., Smith L.P. — Proc.Amer.Philos.Soc., 1938, 78, № 4, p. 142.
14. Fully Automated High-Throughput In-Line KP SEM, — KLA Instrument Corp., MPD801, REV 1.01.97, p. 1–17.
15. Козлитин А.И., Никитин А.В. — Известия РАН, сер.физич., 1993, 57, № 9, с. 1502.
16. Новиков Ю.А., Пошехонов С.В., Стрижков И.В. — Труды Института общей физики Российской Академии Наук”. Проблемы линейных измерений микро-объектов в нанометровой и субмикронной областях. /Под ред. Ракова А.В. 1995, 49, с. 20.
17. Postek T. — Proc. SPIE, 1984, 480, p. 109.
18. Козлитин А.И., Никитин А.И., Сретенский В.Н. — Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника, 1991, № 2, с.59.
19. Максимов С.К. — Банки и технология, 1996, №3, с. 55.
20. Pyin M.I., Kozlitiin A.I., Maksimov S.K., Nikitiin A.V. Scanning, 1997, 19, 3, p.224.
21. Pyin M.I., Kozlitiin A.I., Maksimov S.K., Nikitiin A.V. Preprint of the report. Precision and Accuracy Measurements of Linear Dimensions of Sub-0,25 Micron and Nanometer Objects in Scanning Electron Microscopy, — MIET, 1997, p. 1–21, / information papers of Scanning–97, FAMS, 1997.
22. Аммосов Р.М., Козлитин А.И., Никитин А.В. — Измерительная техника, 1994, 37, № 11, с. 1246.