



## ПРОБЛЕМЫ ИЗМЕРЕНИЙ СУБМИКРОННЫХ РАЗМЕРОВ

С. Максимов

### В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ США

*Проблема метрологического контроля в микроэлектронике стоит сегодня как никогда остро. Размеры отдельных элементов СБИС становятся меньше длины волны видимого света, величины допусков сопоставимы с атомными. А между тем задача точных измерений до сих пор не решена. Два подхода к ее разрешению - американский и российский - будут рассмотрены в серии из двух статей, первую из которых, посвященную метрологии США, мы предлагаем вашему вниманию. О российском методе измерений читайте в ближайших выпусках.*

**П**роблема измерений субмикронных и нанометровых размеров имеет особо существенное значение для микроэлектроники. При критических размерах (КР) элементов сверхбольших интегральных схем (СБИС), равных 0,25 мкм, изменение ширины затвора на 1,0 нм меняет рабочую частоту КМОП транзистора на 1 МГц. С уменьшением этой ширины связано уменьшение пробивных напряжений. Поэтому суммарные ошибки при измерениях КР не должны превышать 1% (максимум 2%) [1].

Национальная программа развития микроэлектроники США на 1995–2010 годы (The National Technology Roadmap for Semiconductors (далее “Roadmap”) [2, с. 81–92]) относит проблему измерений КР к двум, наряду с совмещением, важнейшим проблемам, без решения которых невозможно развитие ключевой стадии технологического процесса СБИС – стадии фотолитографии. Измерения КР безусловно необходимы и на других этапах производства СБИС: при разработке новых изделий и технологий, аттестации оборудования, репродуцировании производственных процессов, выходном контроле и т. д. Однако стадия фотолитографии выдвигает наиболее жесткие требования к методу измерений: они должны выполняться на различных материалах, в том числе на диэлектрических слоях, “in situ” (т.е. непосредственно в технологических линиях) и “in line” (в темпе всего технологического процесса), на фоторезистивных масках для объектов с отношением высота/протяженность рельефа 3,0 – 3,5 и т.д.

В соответствии с Roadmap, к 2010 году планируется уменьшение КР с 0,35 до 0,07 мкм. Таким образом, к 2010 году суммарная ошибка измерений должна составлять ~0,7 нм. Создание адекватной метрологической базы – ключевое условие развития микроэлектроники в целом [2].

Такое же внимание уделяется проблеме измерений в “Стратегическом пла-

не” [3] консорциума Sematech. Приведенные в нем данные позволяют оценить некоторые экономические аспекты проблемы измерений в микроэлектронике. Так, суммарные мировые расходы на измерения на стадии фотолитографии в 1992 году составляли 150 млн. долл. Однако даже эта цифра сегодня представляется заниженной. Кроме того, неизвестно, какая доля расходов относилась в 1992 году к производству ИС с минимальными КР (в то время – 0,5 мкм). Следует учитывать, что измерения осуществлялись преимущественно методом световой микроскопии. По мере уменьшения КР доля расходов на стадии фотолитографии в суммарных производственных затратах возрастает. Например, при изменении КР с 1,2 мкм (характерных для 1986 года) до 0,35 мкм (уровень 1995 года) доля фотолитографии в общей себестоимости пластины возросла с 24 до 35 % [3]. По данным Roadmap, на 1992 год расходы на измерительные операции при формировании рисунка составляли приблизительно 5 % от суммарных расходов на этапах фотолитографии. Поэтому, даже если доля контрольных операций в суммарных расходах не изменится (а растущие сложность и число измерительных операций должны вызывать ее увеличение), к 2010 году затраты на измерения размеров в процессе фотолитографии составят сотни миллионов долларов.

Экономический аспект измерений можно рассмотреть и с точки зрения снижения производственных затрат, обусловленных результатами контрольных операций. Если вследствие измерений удастся скорректировать технологию хотя бы для 3–5 % пластин, то при стоимости продукции микроэлектроники в 1994 году 82 млрд. долл. экономический эффект составит сотни миллионов долларов. Однако межоперационный контроль – не единственный и, возможно, далеко не основной путь снижения производственных расходов. В сово-

купности производственных затрат на протяжении всего жизненного цикла изделия микроэлектроники на долю стадии НИОКР приходится до 85% [4]. Очевидно, что снижение расходов на НИОКР и сокращение их продолжительности может обеспечить миллиардную экономию.

Измерения должны выполняться для пластин с диаметром 200 мм (до 400 мм в ближайшем будущем) с высочайшей производительностью (требования к производительности будут рассмотрены далее), быть неразрушающими и т. д. Возможно, в будущем часть измерительных задач возьмут на себя такие методы, как атомно-силовая микроскопия [3,4], но пока основной метод измерения КР в микроэлектронике – растровая электронная микроскопия (РЭМ) [5].

Для получения видеосигнала в РЭМ используются проходящие и обратно-рассеянные электроны [5,6]. Последние разделяются по энергиям ( $E$ ) на вторичные ( $SE$ ,  $E < 50$  эВ), обратнорассеянные ( $BSE$ ,  $E > 50$  эВ) и упругорассеянные ( $EE$ , с энергией первичного пучка) [5]. На формирование видеосигнала влияют факторы, связанные как с микроскопом (ускоряющее напряжение, типы используемых датчиков, режимы работы системы регистрации видеосигнала, абберрации оптической системы, фокусировка) [5,6], так и с образцом (материал объекта, характеристики рельефа). Проблема заключается в том, что из-за воздействия этих факторов на видеосигнале невозможно указать точки, соответствующие краям объекта [5–8]. Размер объекта – это расстояние между его краями. Поэтому измерения размеров с помощью РЭМ связаны с систематической ошибкой, методы учета которой пока неизвестны. Роль систематической ошибки возрастает с уменьшением размеров объекта и при размерах, меньших 0,5 мкм, становится роковой, поскольку неточность в определении размера оказывается соизмеримой с его номинальным

значением. Ситуация осложняется тем, что многие из указанных факторов — абберации, фокусировка, режим работы усилительного тракта — задаются на основе субъективных ощущений оператора [5,6], а потому случайны и не поддаются корректному учету. К тому же целый ряд измерений необходимо производить на диэлектриках (пленки SiO<sub>2</sub>, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, фоторезистивные маски). Заряд, накапливаемый в диэлектрике при электронном облучении, искажает изображения, особенно во вторичных электронах (SE) [9,10,11]. В итоге, современные РЭМ не позволяют производить точные измерения размеров, меньших 0,5 мкм [5–8].

Существуют два пути решения проблемы точных измерений в микроэлектронике: американский [1,11–13] и российский [7,8,14,15]. Американский вызван необходимостью контролировать КР уже сегодня при отсутствии достаточной метрологической базы. Это паллиатив, но он обеспечивает межоперационный контроль в настоящее время и в ближайшем будущем. Российский отличается лучшей теоретической проработкой и фундаментальностью, но уступает американскому в решении ряда частных вопросов. Рассмотрим далее подход к КР-метрологии, принятый в США.

В США за решение проблемы измерений линейных размеров в целом отвечает Национальный институт стандартов и технологии (the National Institute of Standards and Technology — NIST). К концу 1994 году многолетние исследования привели специалистов института к заключению, что проблема точных измерений с помощью РЭМ в диапазоне размеров, меньших 0,5 мкм пока неразрешима [5]. Эта точка зрения стала господствующей не только в американской микроэлектронике, ее разделяют и специалисты других стран. Она нашла отражение в ряде документов, в частности при формулировании требований к метрологическому обеспечению в Roadmap [2].

В этом документе ничего не говорится об абсолютной ошибке (точности) измерений. Единственная метрологическая характеристика, табулируемая Roadmap — воспроизводимость. Однако даже для воспроизводимости требования Roadmap доведены только до 2001 года, а графики, соответствующие 2004 — 2010 годам, остались пустыми (табл. 1).

На первый взгляд, нормативы Roadmap парадоксальны. Отсутствие требований к точности измерений и табуляция воспроизводимости как единственной регламентируемой характеристики означают, что лимитируется разброс результатов измерений вокруг некоторой величины, в то время как близость этой величины к номиналу не контролируется, а потому сама эта величина остается случайной! Неумение американцев производить точные измерения открытым текстом подтвердил руководитель проектов консорциума Sematech по измерениям на пластинах Арнольд В. Яноф во время встречи автора статьи с руководителями метрологических служб ряда американских производителей СБИС, организованной Sematech 21 апреля 1997 года. Этот парадокс отражает сегодняшнюю американскую стратегию в КР-измерениях. Roadmap закрепляет ее действие в США по крайней мере до перехода к КР ~130 нм (рубеж 2001–2004 годов).

В рамках этой стратегии [1,12] с помощью измерительного РЭМ контролируются ключевые этапы производства СБИС. По результатам выходного контроля выбирается СБИС с наилучшими электрофизическими параметрами. Видеосигналы, полученные в процессе производства данной СБИС, принимаются за эталонные при производстве однотипных с нею изделий.

Инструментом реализации этой концепции является измерительный

комплекс, важнейшая часть которого — полностью автоматизированный РЭМ KLA 81002 (производство KLA Instruments Corporation) [12]. В соответствии с общей концепцией измерений, для KLA 8100 основной гарантируемой рабочей характеристикой является динамическая воспроизводимость (табл. 2).

Приведенные цифры могут варьироваться в зависимости от типа объекта. Непосредственная воспроизводимость обусловлена шумами и характеризует разброс результатов измерений, выполняемых непрерывно; долговременная отражает неизбежные изменения параметров РЭМ, характеризуя разброс результатов измерений, разделенных промежутком в две недели.

KLA 8100 имеет электростатическое сканирование, которое исключает гистерезисные эффекты, обеспечивает повышенную линейность и дает возможность сканирования в любом направлении от 0 до 360°, что обеспечивает воспроизводимость измерений, не зависящую от ориентации элементов ИС.

Для проведения измерений KLA 8100 не требует получения полноэкранный изображения с большим увеличением. В нем используется сканирование при сверхвысоком разрешении и постоянном размере пиксела в 1 нм для объе-

**Таблица 2**  
Динамическая воспроизводимость KLA 81004

Показатели	Непосредственная (3σ)	Долговременная (3σ)
Линии и площади	5 нм	10 нм
Контакты и точки	8 нм	13 нм

ктов менее 1,5 мкм. Поэтому увеличение не влияет на воспроизводимость измерений. В результате время для нахождения точки измерений сокращается, так как нет необходимости сканировать и интегрировать полномасштабное изображение, а распознавание рисунка выполняется при любом увеличении и не влияет на измерения. Поскольку пучок не сканируется по всему изображению, эффект зарядки образца существенно уменьшается. Скорость сканирования KLA 8100 в четыре раза превышает скорость телевизионной развертки (4TV). В результате сокращается время сканирования и возрастает производительность, уменьшается влияние низкочастотных шумов, минимизируется наведенный заряд [12].

В KLA 8100 создаются

**Таблица 1**  
Требования к критическому уровню метрологии на пластинах [Roadmap, Table 18]

Показатели	1995г.	1998г.	2001г.	2004г.	2007г.	2010г.
	0,35 мкм	0,25 мкм	0,18 мкм	0,13 мкм	0,10 мкм	0,07 мкм
Допуск на КР затвора, нм	35	25	18	13	10	7
Воспроизводимость 3σ, нм	3,5	2,5	1,8	Переход к “in line” и “in situ” измерениям		
Допуск на совмещение, нм	100	75	50	40	30	20
Воспроизводимость 3σ допуска на совмещение, нм	10	7,5	5	4	3	2

изображения во вторичных (*SE*), обратно рассеянных электронах (*BSE*) и комбинированное (*SE+BSE*), что позволяет использовать преимущества как *SE*, так и *BSE* электронов. Высокостабильное *BSE*-изображение приме-

няется для распознавания рисунка, в то время как высокоразрешающий *SE*-сигнал служит для измерений. Для специальных применений соотношение между *SE* и *BSE* сигналами непрерывно меняется. Это обеспечивает сочетание высокой чувствительности к краевым деталям в *SE*-режиме с композиционным *BSE*-контрастом.

Второй важнейший параметр РЭМ, определяющий возможность реализации выбранной стратегии – его производительность. Для KLA 8100 табулируются две характеристики производительности: число пластин, обрабатываемых за час в непрерывном режиме при измерении в одной точке для каждой пластины (wafers per hour – WPH), и время проведения одного измерения на пластине, загруженной в рабочую камеру РЭМ (move–acquire–measure, MAM). Для этого прибора достигнута величина MAM – 9 с.

Табл. 3 характеризует минимальный цикл обработки одной пластины (minimum per wafer – MPW), данные относятся к типичной тестовой структуре. Для KLA 8100 MPW составляет 1,4 мин. Реальное время может изменяться в зависимости от природы измеряемого объекта, числа тестируемых позиций и тд.

Однако KLA 8100 – только часть измерительной системы, которая включает: измерительные микроскопы в чистых комнатах; центральный процессор, аккумулирующий результаты измерений и содержащий программы для анализа экспериментального материала; периферийные станции анализа и обработки данных; внешнюю сеть.

Для обработки результатов и изображений, произведенных извне, система 8100 обеспечивает связь через Ethernet. Данные и программы обработки от всех производственных терминалов могут храниться в центральном сервере для обслуживания всех пользователей. Рекордно широкая си-

Таблица 3  
MPW и WPH при различном числе измеряемых позиций

Число пластин в очереди	Число измеряемых позиций на пластине									
	5		9		15		20		100	
	MPW, мин	WPH	MPW, мин	WPH	MPW, мин	WPH	MPW, мин	WPH	MPW, мин	WPH
1	2,0	30	2,6	23	3,5	17	4,3	14	16,2	3,7
2	1,7	36	2,2	27	3,2	19	4,0	15	15,9	3,8
3	1,5	39	2,1	28	3,0	20	3,8	16	15,9	3,8
Непрерывная очередь	1,4	41	2,0	30	2,9	21	3,5	17	15,9	3,8

стема сопоставления обеспечивает “однотипность обработки”: одни и те же программы дают идентичные результаты независимо от терминала, на котором получены исходные данные.

Предлагаются два режима использования системы: автономный и централизованный. При автономном режиме пользователь работает на основе собственной библиотеки видеосигналов. При централизованном он интегрирован с центральным сервером KLA, и для обработки результатов используются программы и данные единой системы, охватывающей многих пользователей. Централизованный режим обеспечивает большую корректность результатов, однако защита производственных секретов и достижений перестает быть внутренним делом пользователя.

Дальнейшее развитие микроэлектроники выдвигает перед этой стратегией новые проблемы. Так, при измерениях на отдельно расположенных линиях линейность изменений видеосигнала продемонстрирована вплоть до КР в 0,125 мкм. Однако для групповых линейных структур измерения осложняются вследствие затруднений со сбором *SE*, рассеянных материалом канавок. Предполагается, что эта проблема будет решена в результате применения двухмодовых (*SE+BSE*) изображений и снижения ускоряющего напряжения до 300–800 В. Считается, что с помощью этих приемов удалось получить адекватные изображения “подошв” фоторезистивной маски для КР в 180 нм. Исследования в этом направлении продолжают.

С уменьшением КР возрастают требования к однородности размеров по площади чипа. Отсюда необходимость проводить многие измерения в пределах одного поля зрения. Значительно возрастают также требования к однородности масштаба при

измерениях в X и Y направлениях. Специалисты США считают, что проблема XY искажений окончательно не решена, однако пути ее решения связаны с применением для измерений *BSE* или (*SE+BSE*) изображений [1].

Подобная стратегия измерений линейных размеров (далее – “стратегия опорных изображений”) имеет ряд недостатков.

**Первое.** В основе этой стратегии лежит положение: “одинаковым видеосигналам, полученным в идентичных условиях, соответствуют одинаковые объекты”. Однако РЭМ-изображение зависит от многих факторов, и их различные комбинации могут приводить к близким результатам [5–8]. Сложности, возникающие при использовании РЭМ-видеосигналов в измерениях, наиболее наглядны при метрике таких типичных элементов КР-контроля, как диэлектрические объекты. Обычно для измерений на этих объектах используются *SE* видеосигналы при энергии первичного пучка < 2 кэВ. Однако *SE* крайне чувствительны к зарядовым эффектам, и результирующий видеосигнал зависит от трех величин: ускоряющего напряжения (в работе [9] при изменении ускоряющего напряжения с 0,9 до 2,5 кэВ на изображении полоски фоторезиста шириной 4 мкм инвертировался знак контраста, на краях изображения возникали и исчезали осцилляции интенсивности, а видимая ширина изображения варьировалась от 3,3 до 5,6 мкм), и тока электронного зонда и наклона объекта относительно направления пучка электронов [11]. Если учесть, что зарядовые эффекты зависят также от толщины диэлектрика и его диэлектрической прочности, становится очевидным, что получение близких видеосигналов от неидентичных объектов (особенно на протяжении многих месяцев и даже лет) весьма вероятно.

**Второе.** Необходимость сочетания высокой воспроизводимости и производительности создает трудноразрешимые проблемы. Для достижения удовлетворительной воспроизводимости необходимо улучшать соотношение сигнал/шум. На практике это достигается увеличением времени накопления сигнала до некоего оптимального, при котором осредняются высокочастотные шумы, а низкочастотные, связанные с дрейфом измерительной системы, еще не влияют на процесс измерений. Между тем для обеспечения производительности необходимо максимально сокращать продолжительность всех операций, в частности время накопления сигнала. Поэтому стратегия опорных изображений основана на компромиссе между воспроизводимостью и производительностью. В США принято, что при КР  $\sim 0,35\text{--}0,25$  мкм можно ограничиться воспроизводимостью в 5,0 нм (на практике это означает допустимость разброса рабочих частот для КМОП-транзисторов в 10 МГц!). Такая воспроизводимость, в принципе, достижима для РЭМ KLA 8100 [12]. Переход к КР  $\sim 0,18$  мкм потребует воспроизводимости не более 2,0 нм [1,2], что, по мнению специалистов KLA, может быть обеспечено применением для измерений "двухмодовых" SE+BSE изображений при небольшом ухудшении МАР (с 9 до  $\sim 10$  с). Однако при переходе к КР  $\sim 0,13$  нм эта стратегия, по-видимому, невозможна, поскольку потребуются уменьшить воспроизводимость до  $\sim 1,0$  нм [1, 2], что повлечет многократное снижение производительности. Кроме того, переход к фазосдвигающим шаблонам потребует проведения многих систематических измерений в пределах одного поля зрения [1], что еще более ограничит эту характеристику.

**Третье.** Как уже указывалось, параметры РЭМ самопроизвольно, неизбежно и непрерывно изменяются в процессе его эксплуатации [6,12], что приводит к катастрофическому ухудшению долговременной воспроизводимости. В силу этого срок службы опорных изображений ограничен, и их необходимо регулярно возобновлять. А это налагает дополнительные требования к стабильности работы всего технологического обо-

рудования, задействованного в производстве данного изделия.

**Четвертое.** Стратегия опорных изображений не может эффективно использоваться для аттестации технологического оборудования. Отсутствие независимых методов его аттестации в совокупности с изменениями параметров РЭМ ограничивает возможности маневра оборудованием, поскольку каждая перенастройка установок под повторное производство СБИС превращается в НИР, в ходе которых вновь решаются многие проблемы, уже преодоленные при первичном освоении.

**Пятое.** В силу причин, уже отмеченных в третьем и четвертом пунктах, репродуцирование отлаженной технологии превращается в ее повторную разработку.

**Шестое.** Доля НИОКР в суммарных расходах на производство СБИС на протяжении ее жизненного цикла достигает 85 %. Однако стратегия эталонных изображений неприменима на этой стадии.

**Седьмое.** Даже краткосрочная воспроизводимость сегодня при КР в 0,35 мкм составляет  $\sim 1,5\%$ , что хуже, чем требования метрологических норм.

Неудовлетворенность достигнутым метрологическим уровнем вызвала необходимость разработки Национальной программы метрологического обеспечения микроэлектроники, которая стала дополнением к Roadmap и выполняется, по-видимому, в те же сроки. Государство ассигнует на программу до 25 млн. долл. в год, а общие многолетние расходы приближаются к 400 млн. долл. В рамках этой программы в NIST создается в единичном экземпляре РЭМ со встроенным в него атомно-силовым микроскопом [16]. Данный комплекс предполагается использовать для измерений в абсолютной шкале и с его помощью получать опорные изображения с известными абсолютными размерами. Очевидно, что комплекс сам по себе проблемы не решит, поскольку достичь компромисса между производительностью и воспроизводимостью с его помощью невозможно.

Несомненно также, что значительные расходы на метрику предусмотрены бюджетом Sematech и расходными статьями отдельных корпораций. Отражением этого являются многочислен-

ные публикации по проблемам СБИС-метрологии, регулярно появляющиеся в специальных журналах (например, [1]). Однако в ближайшие пять—семь лет в американской микроэлектронике будет доминировать КР-метрика, основанная на эталонных изображениях, поскольку к ней адаптирован весь технологический цикл и в ее создание вложены значительные материальные ресурсы. Кроме того, эта стратегия в основном удовлетворяет требованиям микроэлектроники на нынешней стадии ее развития, особенно в сфере межоперационного контроля. Временной рубеж, когда развитие микроэлектроники войдет в противоречие с данной стратегией, отодвигается к 2004 году (до перехода к технологиям с КР  $\sim 0,13$  мкм). Не следует забывать, что переход к иной метрологической базе связан со значительными издержками. Немаловажно и то, что образование единого метрологического центра на базе корпорации KLA создает определенные предпосылки для закрепления лидирующих позиций американской микроэлектроники в мире.

## Литература

1. Monahan K., Askary F., Elliot R. et al. Proc. SPIE, 1997 (in press).
2. National Technology Roadmap for Semiconductors. SIA, 1995.
3. Sematech Strategic Plan 1996—2001. Sematech, 1995.
4. Сретенский В. Н., Юдинцев В. А. Зарубежная радиоэлектроника, 1996, № 3, стр. 69.
5. Postek M. T. J. Res. of NIST, 1994, 99, Sept.—Oct, p. 641.
6. 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.
7. Аммосов Р. М., Козлитин А. И., Никитин А. В. Измер. Техн., 1994, № 6, с. 24.
8. Козлитин А. И., Никитин А. В. Измер. Техн., 1995, № 2, стр. 21.
9. Postek M. T. Proc. SPIE, 1984, 480, p. 109.
10. Козлитин А. И., Никитин А. В., Сретенский В. Н. Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. 1991, № 2, с. 59.
11. Monahan K. H., Benschop J. P. H. Harris, T. A. Proc. SPIE, 1991, 1464, p. 1.
12. Fully Automated High-Throughput In-Line CD SEM. KLA Instrument Corp., MPD801, Rev 1.0 1/97.
13. Hordon L. S., Boyer B. B., Pease R. F. J. Vac. Sci. Technol., B, 1995, 13(3), p. 825.
14. Максимов С. К. Банки и технология, 1996, № 3, с. 55.
15. Цын М. И., Козлитин А. И., Marsimov S. K., Nikitin A. V. Scanning, 1997, 19, 3, p. 224.
16. National Semiconductor Metrology Programme /Project Port—Folio 96, NIST, 1996.

## Представляем автора статьи

**МАКСИМОВ Сергей Кириллович**, доктор физико-математических наук, профессор, руководитель Центра фундаментальных проблем микроэлектроники РАН и Комитета по высшему образованию РФ. Основные направления научно-исследовательской деятельности: теория дифракции рентгеновских лучей и электронов, теория электронно-микроскопических изображений, дефекты кристаллической структуры, фазовые превращения в металлах и полупроводниках, электронно-микроскопические исследования металлов и полупроводников, генерация дефектов в полупроводниковых материалах в результате технологических воздействий при производстве изделий микроэлектроники.