

## Проблемы измерений размеров в микроэлектронной технологии

**А. В. НИКИТИН**

*Институт искусств и информационных технологий, филиал, С.-Петербург, Россия,  
e-mail: svetste47@yandex.ru*

*Проанализированы состояние и проблемы измерений размеров в технологии изготовления микроэлектронных изделий с проектными нормами в сотни или десятки нанометров в условиях промышленного производства. Приведены аргументы о недостаточности относительных измерений и необходимости перехода к измерениям в абсолютной шкале размеров, обеспечивающим не только воспроизводимость, но и абсолютную точность результатов, что особенно актуально при освоении изделий с нанометровыми проектными нормами.*

**Ключевые слова:** алгоритмы, нелинейность, калибровка увеличения, воспроизводимость и точность результатов.

*In this paper the status of the size measurement methods used in process control of productions in micro-electron FAB with NODES of the nanometer range is analyzed and relevant problems are discussed. We made the conclusion on insufficiency of relative measurements and the need to use the measurements in absolute scale of sizes — ensuring not only the reproducibility but also the absolute accuracy of results which is especially important at producing the items with nanometer design rules.*

**Key words:** algorithms, non-linearity, magnification calibration, reproducibility and accuracy of results.

**Место метрологии линейных размеров в технологии современных интегральных схем.** По общему признанию ключевыми операциями изготовления современной микроэлектронной продукции являются литографические процессы. Многолетние наблюдения свидетельствуют, что в общем объеме затрат на выпуск интегральных схем около 35 % приходится на долю операций фотолитографии. Неотъемлемой частью этих операций считаются контрольные процедуры проверки качества литографии и отбраковки пластин и модулей, не соответствующих техническим требованиям. На контрольные операции приходится до 5 % стоимости самих литографических процессов, т. е. 1,5 — 1,7 % совокупных расходов микроэлектронного производства. Обычно контрольно-измерительные операции после литографических процедур проводятся для отбраковки изделий при проверке дефектности литографического рисунка, совмещаемости технологических слоев, размеров реализованных элементов схем. Таким образом, доля измерений и контроля размеров составляет около 0,3 — 0,5% всех затрат производства. Какова эта часть затрат в абсолютных цифрах?

Годовой оборот совокупного мирового производства интегральных схем достигает 100 млрд долл. [1], т. е. по осторожным оценкам около 250—300 млн долл. затрачивается ежегодно в развитых странах на проведение операций измерения размеров. На крупных предприятиях с массовым выпуском продукции круглосуточно работают десятки и даже сотни (например, TSMC, Тайвань) специализированных измерительных электронных микроскопов, занятых исключительно на операциях измерения размеров, стоимостью около 50 млн долл. каждый.

Понятно, что целесообразность столь значительных затрат на метрологическое сопровождение производства интегральных схем зависит от того, насколько достоверны могут быть результаты измерений и решения о забраковании (либо

признании годными) изделий, принятые на основе таких измерений.

**Особенности измерений размеров в нанометровом диапазоне.** Основной особенностью является предельная малость измеряемых размеров и связанная с этим необходимость использования микроскопа (по большей части сканирующего электронного — SEM) в качестве инструмента сравнения. В этих случаях измеряется фактически не физический объект — элемент интегральной схемы, а лишь его увеличенное изображение. Такие измерения относят к косвенным. Их часто проводят на практике, но достоверность результатов обеспечивается только тогда, когда надежно установлены законы, связывающие непосредственно измеряемое свойство со свойством, измеряемым косвенным путем. Например, измерить силу тока в электрической цепи можно без ее разрыва, измерив падение напряжения на калиброванном резисторе, а затем вычислить искомую величину по закону Ома.

В современной микроэлектронной технологии измерительным устройством служит почти исключительно сканирующий электронный микроскоп (SEM). В практике косвенных SEM-измерений место закона Ома должен был бы занять закон, связывающий физический объект и его SEM-изображение, который, к сожалению, не установлен. Подобная ситуация является особенностью не только сканирующей электронной микроскопии. В равной мере она свойственна и всем разновидностям оптической, просвечивающей электронной, сканирующей туннельной и атомно-силовой микроскопии. Что касается SEM-методов, то, несмотря на кажущиеся очевидность и наглядность SEM-изображений, они не передают истинной геометрии объекта. Картинка, т. е. распределение яркости на экране (снимке), соответствует (и то с большими оговорками) распределению точечного коэффициента вторичной электронной эмиссии по поверхности объекта. Конечно, этот коэффициент зависит от состава и геометрии объекта сканирования и в какой-то мере отобра-



Рис. 1. Схема проведения измерений критических размеров

жает его геометрические и физические свойства, но это отображение управляется куда более сложными (и пока что не установленными) законами, чем закон Ома. Это и составляет фундаментальное препятствие развитию метрологического обеспечения SEM-измерений в нанометровом диапазоне.

**Проблемы измерений малых размеров в микро- и нанoeлектронике.** Динамика развития микроэлектронной технологии такова, что согласно [2] уже в настоящее время промышленностью осваиваются сверхбольшие интегральные схемы (СБИС) с проектными нормами 32 нм или менее. Точность измерений подобных изделий в процессе их изготовления (межоперационные измерения) должна быть экстремально высокой, а допустимая погрешность оценивается в 0,30 — 0,15 нм, ( $3\sigma$ , где  $\sigma$  — среднее квадратическое отклонение) [2]. Заметим, что проблема заключается не в возможности измерения столь малых объектов, а в достижении при этом требуемой точности. Для ее решения проанализируем источники погрешностей существующих методов измерений. Общепринятая схема процесса измерений с применением SEM-методов представлена на рис. 1. Предполагается, что размер  $L$  любого объекта может быть вычислен как произведение двух величин: а) размера  $L_p$  этого объекта, выраженного в пикселах и найденного согласно левой ветви рис. 1, и б) расстояния между пикселями  $PL$

(«длины» пиксела — pixel length), выражаемого в абсолютных единицах и вычисляемого в соответствии с правой ветвью рис. 1 по формуле

$$L = L_p PL. \quad (1)$$

Таким образом понятно, что существует два основных источника погрешностей результата измерений: во-первых, собственно процесс измерений размера (в пикселах) по SEM-изображению, погрешность при этом связана, в основном, с нерешенностью проблемы локализации краев измеряемого объекта (см. рис. 1, левая ветвь); во-вторых, неточность операции калибровки увеличения SEM-измерителя, т. е. погрешности цены пиксела —  $PL$  (см. рис. 1 правая ветвь). Указанные погрешности в конечном счете лимитируют итоговую точность результатов. Проведенный анализ свидетельствует, что эти погрешности, как и полная погрешность измерений в целом, в значительной мере зависят от условий измерений.

Так, при построчных измерениях только одна, обусловленная шумами видеосигнала погрешность может достигать 2 нм ( $3\sigma$ ). Соотношение сигнал—шум на практике редко превышает 5. Лишь статистическое усреднение индивидуальных результатов позволяет снизить погрешность среднего до приемлемых значений. Представление об источниках погрешностей и их взаимодействии дает рис. 2.

**Источники погрешностей. Использование упрощающих идеализаций или допущений.**

**Погрешности калибровки увеличения.** В общем бюджете погрешностей на долю операций калибровки увеличения резонно положить не менее трети допуска на размеры. В частности, чтобы обеспечить требуемую точность измерений элементов СБИС с проектными нормами 65 нм ( $\pm 0,3$  нм, или 0,7 % по критерию  $3\sigma$  [2]), необходимо снизить погрешность увеличения SEM до уровня  $\pm (0,2 — 0,3)$  % ( $3\sigma$ ). Достигнутая в настоящее время погрешность калибровки измеряется единицами процентов для указанного диапазона размеров. Только одна эта погрешность «съедает» весь ресурс погрешностей измерений, допустимый согласно [2].

**Традиционная постановка задачи калибровки увеличения.** Обычно такой задачей является как можно более точное определение увеличения  $M$ . В некоторых моделях измерительных SEM в качестве калибруемой величины служит размер  $G$  поля зрения микроскопа. Использование масштаба  $M$  либо размера поля зрения  $G$  как калибруемых величин нельзя признать удачным, так как при этом по умолчанию предполагается, что равным участкам изображения отвечают равные участки объекта. Это предположение в принципе ошибочно, поскольку в любом реальном микроскопе системы сканирования всегда в той или иной мере несовершенны, в частности, нелинейны. Представление о линейности разверток SEM, так же как следующие из него выводы, касающиеся увеличения  $M$  либо размеров поля зрения  $G$ , являются упрощающей идеализацией, не имеющей под собой реальных оснований. Нелинейность разверток SEM проявляется в том, что увеличение микроскопа оказывается непостоянным; оно и меняется по полю зрения вдоль направления сканирования. Возникает необходимость введения понятия локального увеличения и соответственно локального значения длины пиксела. Теперь константу  $PL$  заменяет функция  $PL(i)$ , где  $i$  — номер пиксела в строке. Поэтому любое расстояние, измеренное по SEM-изображению, на-

пример, между первым и вторым пикселями, т. е.  $L_{i2-i1}$ , уже нельзя вычислить по формуле (1), которая теперь примет вид

$$L_{i2-i1} = \sum_{i1}^{i2} PL(i).$$

Автору неизвестны конкретные модели или экземпляры измерительных SEM, которые обеспечивали бы вполне линейное сканирование при различных амплитудах (увеличениях) и скоростях разверток. Все применяемые измерительные микроскопы в той или иной мере нелинейны, но даже не аттестуются по этому параметру. Некоторые из них характеризуются нелинейностью в несколько процентов. Эксперименты показали, что погрешность калибровки увеличения может достигать 0,6 — 0,8 %, если нелинейность оказывается на уровне 5 %.

**Стандарт для калибровки увеличения.** Еще один источник погрешности калибровки увеличения связан со свойствами эталона (стандарта), используемого для этих целей. Выбор типа такого стандарта далеко не безразличен. Существуют по крайней мере два типа стандартов длины: стандарты «ширины линий» и периода. По общему признанию для калибровки предпочтительнее последний, из-за того, что калибровочным размером в данном случае служит период решетки, который удается определять различными способами без необходимости решать главную проблему локализации края объекта на его увеличенном и неизбежно искаженном SEM-изображении. Более того, аттестовывать стандарт такого типа — дифракционную решетку (ДР) — можно независимым оптико-гонометрическим способом с высокой точностью и в абсолютной шкале размеров. Если бы все штрихи ДР были одинаковыми, а расстояния между ними строго постоянными, то на пути применения подобных стандартов никаких препятствий не было бы. К сожалению, все выпускаемые изделия такого рода не отвечают этим требованиям. Проведенные тщательные измерения различных решеточных ДР-стандартов, например, хранящихся в NIST(USA), HITACHI(Япония) и др., показали, что неоднородность периода обычно составляет 1,0 — 1,5 % ( $3\sigma$ ). Поэтому широко распространенное представление об однородности периода ДР является еще одной упрощающей идеализацией и также не соответствует действительности. Таким образом, погрешности, обусловленные остаточной нелинейностью разверток микроскопа, складываются с погрешностями вследствие неоднородности периода ДР и влияния других факторов (например, неизбежных шумов видеосигнала) и препятствуют проведению прецизионной калибровки увеличения SEM.

**Погрешности, обусловленные несовершенством измерительных процедур** (левая ветвь рис. 1).

**Специфика измерений в микроэлектронной технологии.** Их особенностью является то, что по ряду существенных причин целесообразнее измерять размеры элементов схем на стадии формирования фоторезистивной маски. Поэтому типичными и наиболее важными объектами контроля ока-

$$3\sigma = \sqrt{(3\sigma_1)^2 + (3\sigma_2)^2} \leq 0,4 \text{ нм}$$

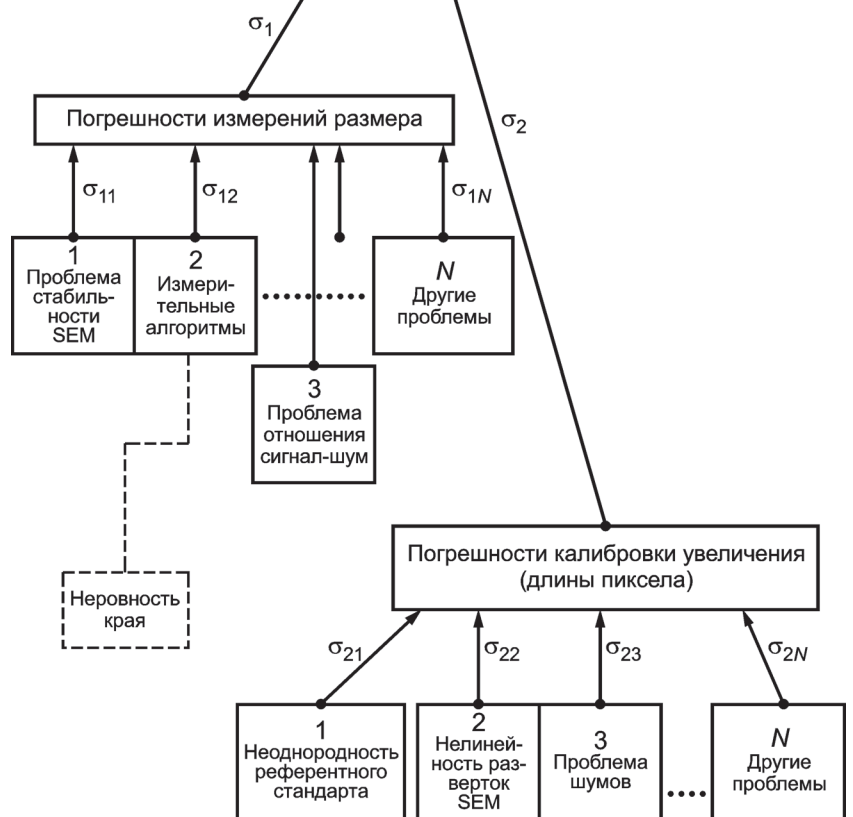


Рис. 2. Баланс погрешностей измерений

зываются рельефные детали маски — полосы (линии) и контактные окна, сформированные в слое фоторезиста методами литографии и имеющие в сечении трапецеидальную либо (в идеале) прямоугольную форму. Типичный вид рельефной полосы с трапецеидальным сечением и соответствующий ему SEM-видеосигнал  $S(x)$  (одна строка) представлены на рис. 3. Наиболее существенными являются размеры, измеренные по нижнему срезу трапецеидального сечения. Важно подчеркнуть, что нижним краям трапеции соответствуют точки на внешних склонах максимумов видеосигнала, что и создает трудности локализации края при проведении измерений. Так как размер любого объекта по определению есть расстояние между его краями, то локализация краев объекта на его изображениях остается центральной проблемой измерений в любом виде микроскопии.

Для устранения влияния оператора на результаты измерений в современных SEM-измерителях (Hitachi сер. 7000, 8000, 9000, JEOL, KLA, AMAT, LEO и др.) используются автоматизированные алгоритмы. Тем самым исключается главный источник невоспроизводимости — влияние оператора. Однако среди известных и широко распространенных алгоритмов — Threshold (T), Linear approximation(LA), Curvature (CU), Derivative (DE), Fermi-Dirac(FD) — нет таких, в основе которых лежат физически обоснованные представления о механизмах формирования видеосигнала в SEM. Поэтому не существует методов обнаружения точек на видеосигнале,

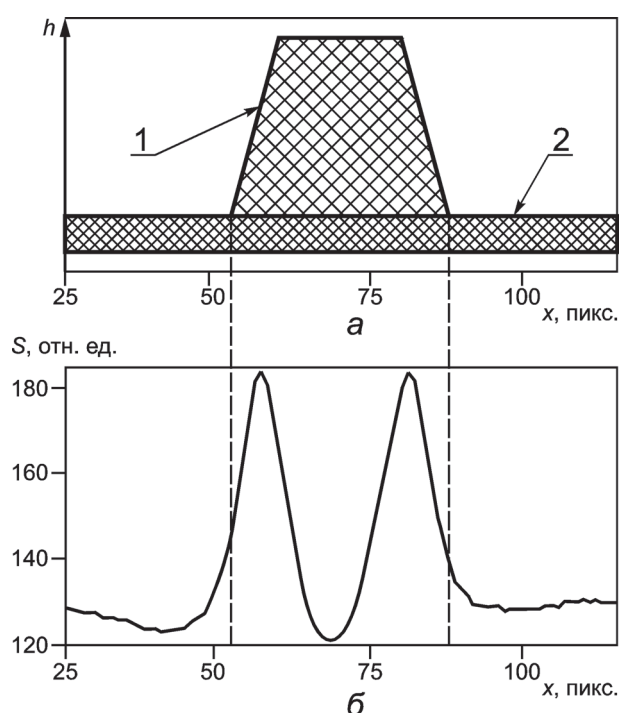


Рис. 3. Объект измерения и его SEM-изображение:

*a* — поперечное сечение фоторезистивной полоски; *б* — типичная форма видеосигнала (одна строка кадра); 1 — фоторезистор; 2 — подложка

отвечающих краям измеряемых элементов. Кроме того, программные реализации известных алгоритмов содержат свободные параметры (степени свободы), устанавливаемые пользователем — оператором, полевым инженером либо администратором — по его собственному усмотрению, образуясь лишь с опытом и интуицией. Подчеркнем, что правила выбора значений свободных параметров при проведении измерений не установлены. Таким образом, в процедуру измерения размеров вновь получил доступ пресловутый человеческий фактор.

Ниже представлены результаты анализа возможностей распространенных алгоритмов *T* и *LA*, в программной реализации которых имеются несколько свободных параметров. Все выводы, следующие из этого анализа, кроме числовых оценок, можно распространить и на другие упомянутые выше алгоритмы, также содержащие свободные параметры.

**Сравнительный анализ алгоритмов измерений.** При его проведении во всех случаях объектом измерений служило одно и то же исходное SEM-изображение (кадр), полученное с применением микроскопа Hitachi 4700 при ускоряющем напряжении 1,0 кВ, увеличении 100000, отношении сигнал — шум 4; 400 строк кадра усредняли до одной строки (см. рис. 3); номинальный размер измеряемой полоски по нижнему срезу ее сечения 84,3 нм.

**Алгоритм Threshold.** Этот алгоритм имеет два свободных параметра: сглаживание *S* (smoothing) и уровень отсечки видеосигнала *T* (threshold). Результаты измерений *L* по одному и тому же видеосигналу (см. рис. 3) отображены на рис. 4 в виде поверхности  $L = f(S, T)$ , передающей зависимость измеренного размера *L* от значений свободных параметров *S*, *T*. Из рис. 4 следует, что результаты измерений

одного и того же объекта действительно изменяются в широком диапазоне в зависимости от значений указанных параметров. Ширина коридора возможных результатов для алгоритма *T* достигает 50 нм и более.

**Алгоритм Linear approximation.** Измерения размеров проводили по тому же исходному изображению. Особенностью *LA* является то, что в его реализации предусмотрены четыре свободных параметра. Это обстоятельство не позволяет представить результаты измерений в виде столь же наглядной диаграммы, как на рис. 4. Анализ множества числовых данных, полученных в ходе измерений, позволяет заключить, что коридор возможных результатов и в этом случае простирается на многие десятки нанометров (около 80 нм при умеренных вариациях свободных параметров).

**Обсуждение результатов.** Существует несколько причин столь низкой достоверности измерительных результатов. Проблема свободных параметров очерчена выше. Можно перечислить еще 5 — 6 причин, приводящих к столь недостоверным результатам: влияние шумов видеосигнала; остаточная нелинейность разверток, проявляющаяся в ходе собственно измерений, а не только при калибровке увеличения; так называемые скрытые свободные параметры. Их объединяет то, что даже сейчас видны решения, позволяющие существенно снизить влияние этих источников погрешностей.

Примером скрытого свободного параметра является номинальное увеличение микроскопа. Дело в том, что параметр *S* алгоритма *T* и некоторые параметры алгоритма *LA* задаются оператором в виде числа пикселей, а размер пиксела прямо зависит от увеличения. Так, заданное оператором сглаживание *S* в форме постоянного числа пикселей оказывает фактически различающее воздействие на видеосигнал, если увеличения вообще различаются.

Однако существуют и иные, глубокие причины низкой достоверности измерений, например, недостаточно разработанная теория формирования видеосигнала в SEM. В частности, не найдены решения проблемы локализации края объекта на его SEM-изображении. Но практические нужды промышленности не могут ждать, индустрия требует решений сегодня, сейчас, пусть и не слишком бесспорных. Итогом такого вынужденного компромисса стало появление на рынке множества моделей измерительных микроскопов, оснащенных метрологически несостоятельными алгоритмами и программами измерений. Фактически при использовании известных алгоритмов измеряется не размер физического объекта, а лишь расстояние между специальными точками на видеосигнале, фиксируемыми по тем или иным формальным математическим признакам, но вне какой бы то ни было связи с действительным размером объекта. Таков главный вывод о нынешнем состоянии метрологического обеспечения микроэлектронных измерений. Можно ли удивляться тому, что в ходе сопоставительных измерений одного и того же объекта на разных микроскопах различными операторами обнаруживаются недопустимо большие расхождения, достигающие нескольких десятков нанометров?

**Проблема сопоставительных измерений (процедуры Matching).** Расхождения результатов измерений, полученных с применением разных микроскопов, принято корректировать системой поправок, вычисляемых в ходе сопоставительных измерений (процедуры *Matching*). Практически эти процедуры включают выбор одного из имеющихся микро-

скопов и объявление его эталонным — «золотым». Далее, специальная служба организует сопоставительные измерения некоего «золотого» объекта на эталонном и остальных микроскопах. По результатам таких сопоставительных измерений формируются таблицы коэффициентов перехода от результатов каждого микроскопа к результатам «золотого». Строятся и анализируются графики соответствия (зависимости коэффициентов перехода от номинального размера), находятся точки пересечения этих графиков с осью  $Y$ , что определяет так называемое смещение (offset), изучаются отклонения градуировочных графиков от линейных зависимостей и вводится коэффициент нелинейности для каждого экземпляра микроскопа. Все таблицы соответствия и графики приходится периодически обновлять из-за процессов старения приборов и дрейфа их характеристик. Для этих процедур на предприятиях создаются специальные службы, которые выполняют подобную работу независимо от других. Таким образом, у каждой крупной микроэлектронной фирмы образуется своя собственная система единиц, где нет места, говоря условно, парижскому метру.

При этом многие специалисты понимают, что если бы в ходе измерений получали бы действительные размеры физических объектов, то результаты измерений совпадали бы автоматически, независимо от модели микроскопа, его характеристик и предпочтений оператора, а процедура Matching не потребовалась бы вовсе. Поэтому признание необходимости этой процедуры — фактически всегда признание несостоятельности используемых алгоритмов измерения. В том виде, как это практикуется сегодня, процедура Matching представляется деятельностью, при которой один неверный результат сложной системой поправок приводится к другому, столь же ошибочному. В ходе проведения этой процедуры не обеспечивается краеугольный принцип метрологии — единство измерений; он заменяется другим принципом — единства измерительных ошибок, и то только в пределах одного предприятия либо цеха (участка).

**Воспроизводимость результатов измерений и их точность.** До последнего времени в практике метрологического обеспечения измерений размеров в микроэлектронике понятие абсолютной точности встречалось крайне редко. Это обстоятельство находится в русле общепринятой, устоявшейся «методологии» измерений, согласно которой достаточно обеспечить воспроизводимость измерительных результатов, чтобы удовлетворить практические нужды микроэлектронной технологии. При этом считается, что возможное наличие систематических погрешностей, свойственных индивидуальным измерительным SEM или алгоритмам, вполне компенсируется процедурами Matching. Адепты такой «методологии» обычно используют следующие аргументы.

Что плохого, если при измерениях, например объекта  $A$  размером 50 нм, постоянно будем получать иное значение, скажем, 53 нм? Важно, чтобы это — пусть ошибочное — значение обеспечивалось при любых повторных измерениях, а разброс измерительных результатов был бы минимальным. Если эти условия выполняются, то, получив при измерении неизвестного объекта  $B$  результат, скажем, 55 нм, можно быть уверенным, что размер объекта  $B$  на 2 нм больше, чем размер  $A$ . Таким образом, систематическая погрешность измерений (недостаточная абсолютная точность) не препятствует проведению достоверных сопоставительных измерений.

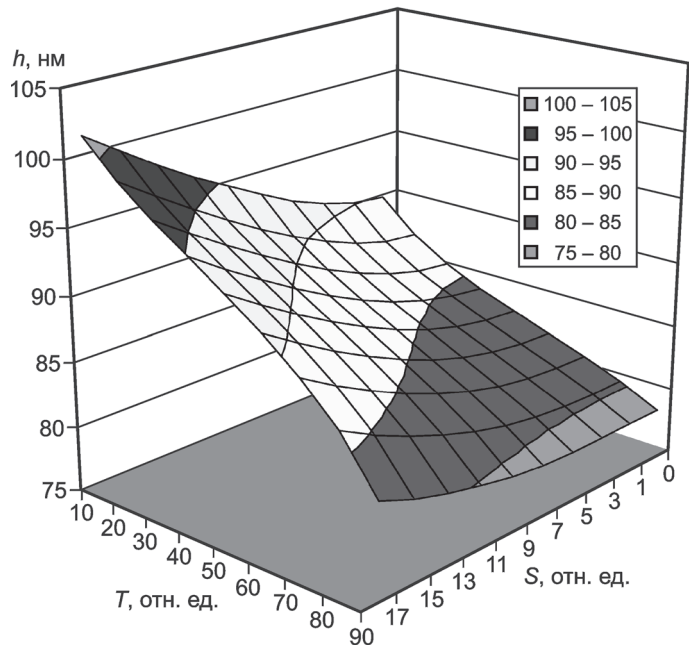


Рис. 4. Зависимость измеренного размера от свободных параметров  $S$ ,  $T$ , полученная по алгоритму Threshold

Является ли такая «методология» бесспорной? Уточним, что основной целью измерения размеров в микроэлектронной технологии на промежуточных операциях по ходу изготовления конечного продукта является получение информации, позволяющей признать контролируемую пластину годной либо подлежащей списанию в брак. Каждое проведенное измерение на пластине склоняет чашу весов в ту или иную сторону в зависимости от того, находится ли результат этого измерения внутри или вне заранее установленных пределов. Как правило, в качестве полуширины коридора приемлемых размеров (допуска) выбирается доля (10 %) номинального размера или проектной нормы NODE.

Так, в соответствии с [2] для микросхем с NODE 65 нм установлен допуск на размеры  $B = 6,6$  нм. Это означает, что если измеренный размер заключен между пограничными значениями 58,4 и 71,6 нм, то этот факт служит аргументом в пользу признания изделия годным. Ниже для краткости такие результаты назовем позитивными. Если же результат измерения лежит вне указанного диапазона, тогда он является аргументом для забракования пластины (негативные результаты). Баланс позитивных и негативных результатов измерений определяет, в конечном счете, дальнейшую судьбу контролируемой пластины: продолжит ли она движение по маршруту изготовления продукции либо будет отправлена в корзину для брака. Совершенно очевидно, что обоснованность решений о забраковании напрямую зависит от достоверности результатов измерений. Необоснованное решение этого вопроса чревато существенными финансовыми потерями из-за снижения выхода годных изделий.

Проведенный в [3] анализ показал, что в идеализированном случае при отсутствии систематической погрешности измерений (при  $\Delta = 0$ ), номинальном размере  $L_0 = 65$  нм, допуске на размер  $B = 6,6$  нм и среднем квадратическом отклонении результатов  $\sigma = 1,7$  нм доля позитивных результатов составит 99,99 %, а негативных 0,01 %, что вполне приемлемо. При тех же значениях  $L_0$ ,  $B$  и  $\sigma$ , но при системати-

ческой погрешности  $\Delta = 3$  нм доля позитивных результатов снизится до 96,6 %, а доля негативных возрастет до 3,4 %, т. е. в 340 раз! Такое возрастание непременно скажется на выходе годных изделий. Это и есть та плата, которую нынешняя промышленность вносит за пренебрежение абсолютными измерениями.

Проведены расчеты и для других значений проектных норм: 45 и 32 нм, откуда следует, что по мере уменьшения номинальных размеров и, соответственно, допусков  $B$  влияние погрешностей  $\Delta$  резко увеличивается (таблица).

**Влияние систематической погрешности  $\Delta$  на долю негативных результатов**

Проектная норма, нм	Доля, %, негативных результатов при $\Delta$ , нм	
	0	3
65	0,01	1,71
45	0,01	7,31
32	0,01	36,2

Если предположить, что с течением времени проектные нормы уменьшатся настолько, что соответствующие значения допусков  $B$  станут соизмеримыми с систематической погрешностью  $\Delta$ , то это приведет к потере половины позитивных результатов измерений в целом. Другими словами, доля результатов, свидетельствующих в пользу забракования изделия, достигнет 50 %. Понятно, что в подобных условиях забраковка изделий на «годные» и «брак» теряет всякий смысл. Таким образом, заключения о целесообразности признать изделие годным или браком, сделанные на основе относительных измерений, всегда приводят к неоправданному снижению выхода годных. Это становится решающим фактором, определяющим потери от брака, особенно для изделий с уменьшающимися проектными нормами 45; 32 нм и менее.

**Заключение.** Проведенный анализ состояния метрологических проблем микро- и нано- технологий уже к настоящему времени позволил выработать ряд технических решений, повышающих точность и достоверность результатов измерений. Эти решения касаются методов аттестации микроскопов по остаточной нелинейности разверток [4], а калибровочных решетчатых стандартов — по однородности их периода [5]. На основе анализа предложены способы прецизионной калибровки увеличения. В частности, влияние шумов видеосигнала при проведении операций калибровки удалось снизить благодаря использованию некоторых интегральных характеристик SEM-изображений ДР-стандартов. К их числу относится отказ от использования каких-либо изолированных точек SEM-изображения в качестве «индикаторов» положения штрихов и использование вместо этого «центров масс» фрагментов штрихов этих решеток [6]. В том

же ряду стоят способы считывания периода решеток не по видеосигналу, а по его специальным интегральным характеристикам — «самосверткам» [7], либо модифицированным «самосверткам» [8].

Значительные усилия затрачены на разработку алгоритмов и методов измерений, не содержащих свободных параметров — основного источника погрешностей. Успехи в этом направлении основаны на широком применении современных компьютерных программ для имитационного моделирования видеосигнала в SEM. Первые результаты отражены в [9]. Недавно разработано новое поколение имитационных моделей [10], способных существенно ускорить создание новых алгоритмов и программ, не подверженных влиянию многих из описанных выше источников погрешностей: идеализаций, свободных параметров и пр. Эти новые алгоритмы и методы измерений сделают, наконец, ненужными и столь распространенные сейчас процедуры Matching.

На основании изложенного можно сделать вывод, что упрощающие идеализации, свободные параметры в компьютерных программах, отказ от абсолютных измерений и другие рассмотренные здесь проблемы измерений размеров в микроэлектронике имеют решения, а погрешности, связанные с ними, могут быть устранены в результате совместных усилий ученых-метрологов и инженеров-практиков.

### Л и т е р а т у р а

1. **Макушин М.** Мировой рынок микроэлектроники после кризиса: Новые реалии и старые проблемы // Электроника НТБ. 2010. Вып. 2.
2. **International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS), SIA.**
3. **Nikitin A. V., Yeregin D. Y., Sandy M.** The importance of accuracy in SEM metrology // Proc. SPIE. 2008. V. 6922. N 154.
4. **Пат.** 6.978.215 США. Dec. 20, 2005.
5. **Пат.** 6.969.852 США. Nov. 29, 2005.
6. **Пат.** 6.807.314. США. Oct. 19, 2004.
7. **Пат.** 6.664.532 США. Dec. 16, 2003.
8. **Пат.** 6.573.500 США. Jun. 03, 2003.
9. **Пат.** 6.878.935. США. Apr. 12, 2005.
10. **Пат.** 6.563.116 США. May 13, 2003.
11. **Никитин А. В.** Использование математического моделирования для измерений наноразмеров в микроэлектронике // Измерительная техника. 2011. № 12. С. 25—29; **Nikitin A. V.** Use of mathematical modeling for measurements of nanodimensions in microelectronics // Measurement Techniques. 2011. V. 54. N 12. P. 1346—1352.

*Дата принятия 26.09.2011 г.*