

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ НАНОРАЗМЕРОВ В МИКРОЭЛЕКТРОНИКЕ И СТРОЙМАТЕРИАЛАХ

Приводится обзор моделей для измерения наноразмеров в микроэлектронике и стройматериалах. Предлагаются «точная» и «упрощенная» математические модели, имитирующие видеосигнал в сканирующем электронном микроскопе. Показано, что «упрощенная» модель практически адекватна «точной», но требует существенно меньших затрат вычислительных ресурсов. Даны примеры использования этих моделей при разработке нового поколения практических алгоритмов высокоточных измерений наноразмерных элементов современных интегральных схем.

Ключевые слова: математическое моделирование, сканирующая электронная микроскопия, микроэлектроника, наноразмер.

Несколько десятилетий назад [1] было однозначно установлено, что измерения размеров элементов интегральных схем в процессе их изготовления (in process control) являются неотъемлемой частью технологии микроэлектроники. Современная микроэлектронная технология характеризуется изделиями, элементы которых имеют минимальные размеры порядка десятков или сотен нанометров [2]. Очевидно, что контроль размеров подобных элементов наиболее удобно проводить с использованием методов сканирующей электронной микроскопии (SEM). Принято считать, что точность таких измерений должна быть достаточно высокой, а допустимая погрешность не может превышать 1 % [2]. Таким образом, при измерениях элементов схем с минимальными размерами (проектными нормами, NODES) 45 нм допустимая погрешность результата должна быть не более 0,5 нм.

На многих ведущих предприятиях микроэлектроники используют десятки или сотни измерительных SEM, работающих в круглосуточном режиме и включенных в процесс изготовления продукции. Это и есть проявление упомянутой неотъемлемости контроля размеров в современной технологии.

Понятно, что «измерить размер любого объекта» фактически означает «найти расстояние между его краями». Таким образом, в рассматриваемом случае проблема распадается на две самостоятельные задачи: локализацию краев измеряемого элемента на его SEM - изображении и измерение расстояния между точками, соответствующими краям элемента. Последняя задача решается чисто инженерными методами и с достаточной точностью, так что она принципиальных затруднений не вызывает.

А вот задача локализации краев измеряемых элементов на SEM-изображениях до настоящего времени не имеет универсальных (или хотя бы приемлемых) решений и потому, по мнению специалистов, представляет собой основную проблему размерной SEM-метрологии [3]. Автор настоящей статьи убежден, что математическое моделирование процессов формирования SEM -

изображения позволяет если не решить эту проблему в целом, то хотя бы выработать новые алгоритмы и практические методы измерений, снижающие погрешности измерений до приемлемых значений.

Обзор существующих моделей. Первой моделью, имитирующей видеосигнал в SEM, по-видимому, можно считать модель Арчарда [4], которая была достаточно примитивной и обеспечивала лишь качественное согласие с экспериментом, фактически не противоречила эксперименту при соблюдении некоторых специальных условий.

Модель, рассмотренная в [5], была разработана специально для использования в измерительных процедурах. Причем объектами, потенциально пригодными для измерений, были выбраны некоторые типы рельефных образований, характерных для микроэлектронной технологии: ступенька, выступ и канавка с вертикальными или наклонными боковыми гранями. Сопоставление модельных видеосигналов с экспериментальными, в том числе полученными зарубежными специалистами, показало, что в этой модели отображаются многие черты экспериментальных видеосигналов: ассиметричные максимумы на краях рельефных структур, вялые минимумы на периферии, особые формы видеосигналов от углублений (канавок) и др. Вместе с тем в математических описаниях этих моделей использованы грубые упрощения, некоторые произвольные допущения, что иногда приводило к несовпадению с экспериментом числовых оценок, следующих из этих моделей.

Весьма распространено моделирование видеосигналов в SEM на основе расчетов траекторий отдельных электронов в твердом теле методом Монте-Карло [6—8]. Этот метод, представлявшийся простым по своей сути, оказался, тем не менее, весьма трудоемким. К настоящему времени создано несколько поколений программ для моделирования видеосигналов по методу Монте-Карло, но их широкому использованию препятствует необходимость значительных затрат вычислительных ресурсов для получения статистически достоверных результатов. В [9] рассмотрены пути использования моделей по методу Монте-Карло в микроэлектронной технологии и предложено создавать библиотеки модельных видеосигналов (*model-based library*), отвечающие различным условиям измерений. Пользователь должен сравнивать экспериментальный видеосигнал с сериями модельных, содержащихся в библиотеке, для выбора наиболее близкого к экспериментальному. Параметры, характеризующие модельный двойник экспериментального видеосигнала, в том числе размер элемента, приписывают реальному сканируемому объекту.

Описанный вариант использования моделей не бесспорен. Создание библиотеки модельных видеосигналов оказывается не слишком простой задачей. В число параметров, влияющих на форму видеосигнала, входят ускоряющее напряжение, при котором работает микроскоп; разрешающая способность фиксируемого SEM-изображения; физико-химические и геометрические характеристики объекта измерения – химический состав измеряемого «элемента» и окружающего его «поля» и связанное с этим соотношение коэффициентов вторичной эмиссии, а также рельеф объекта и его глубина, углы наклона боковых стенок, размер контролируемого элемента, наличие соседних рельефных образований и расстояния до них. При числе параметров 8 – 10 и необходимости расчетов серий видеосигналов, различающихся значениями каждого из параметров (при фиксированных остальных), – метод «частой сетки» – библиотека должна содержать не менее 10^{16} вариантов моделей видеосигнала. Рассчитать подобную библиотеку представляется едва ли выполнимой задачей, особенно при учете значительных вычислительных затрат на каждый вариант. По свидетельству

авторов [9] и других исследователей, для отображения структуры каждого края моделируемого объекта обычно требуется от одного до нескольких часов процессорного времени.

Не меньше трудностей вызывает и использование такой библиотеки, даже если она была бы создана. В частности, очевидно, что отыскание модельного видеосигнала, который лучше всего соответствует экспериментальному, представляет собой известную задачу о нахождении оптимума в пространстве многих переменных. Подобная задача имеет шансы на успех только в том случае, когда перечисленные выше параметры являются строго независимыми, а области их влияния на положение края не перекрывают друг друга. В рассматриваемом случае эти условия не выполняются: например, расширение сканирующего пучка электронов по своему влиянию на структуру края вполне схоже с малым отклонением угла наклона боковой стенки от прямого. Вот почему этот метод пока не нашел широкого применения на практике.

Для полноты изложения упомянем практический метод измерений размеров, созданный на основе ранее разработанных моделей [10]. Этот метод пригоден исключительно для измерений специальных объектов – так называемых безрельфных структур, обнаруживающих композиционный тип контраста в SEM.

Аналитические модели нового поколения. К ним относится аналитическая модель формирования видеосигнала в измерительном SEM, охватывающая рельефные объекты, типичные для микроэлектронной технологии: выступы и углубления различных высоты и (или) глубины, природы, с разными размерами в плане, углами наклона боковых стенок при наличии соседних рельефных образований произвольной геометрии и любых расстояний до них. Модель работоспособна не только при умеренно высоких энергиях первичных электронов, как предусмотрено в [5], но и при энергиях от сотен электрон-вольт до 3 кэВ, характерных для всех современных измерительных SEM. В этой модели не используется метод Монте-Карло. Видеосигнал вычисляется в соответствии с алгебраическими уравнениями, базирующимися на установленных закономерностях взаимодействия ускоренных электронов с твердым телом и условиях выхода вторичных электронов через рельефную поверхность. К параметрам модели, которые можно задавать по выбору пользователя, относятся характеристики измерительного микроскопа – ускоряющее напряжение, гауссов радиус пучка первичных электронов, увеличение, а также физические и геометрические характеристики объекта моделирования, т. е. все факторы, влияющие на форму видеосигнала.

При описании взаимодействия электронов с объектом и составлении расчетных математических соотношений учтены потери потока первичных электронов при его движении вглубь объекта, поглощение вторичных электронов на их пути к поверхности, отражение части вышедших электронов от стенок соседних рельефных образований и экранирующее действие этих стенок.

Рельефные элементы современных интегральных схем обычно ограничены участками (почти) плоских поверхностей. Поэтому при моделировании SEM-изображений таких элементов в качестве меры видеосигнала принята сумма всех потоков медленных вторичных электронов (МВЭ), покидающих объект измерения через все его плоские грани: боковые стенки, верхние плато и донные участки углублений.

Рассмотрим эту задачу в простейшем случае, когда на плоскую поверхность нормально к ней падает пучок первичных электронов. В объеме объекта образуется область возбуждения, каждая точка которой представляет собой элементарный источник МВЭ, «силой» wz . Здесь w – генера-

ционная способность материала на участке dz (z – глубина расположения источника), т. е. среднее число МВЭ, возникающих на этом участке при его возбуждении одним первичным электроном.

Распределение плотности потока МВЭ от элементарного источника $w dz$ имеет на плоскости объекта круговую симметрию с центром в точке проекции источника, и плотность спадает от центра к периферии по закону

$$I(r) = \frac{w dz}{4\pi} \frac{z}{\left(\sqrt{r^2 + z^2}\right)^3} e^{\left(-\sqrt{r^2 + z^2}/\lambda\right)}, \quad (1)$$

где r — расстояние от центра распределения до выбранной точки на плоскости; λ — длина, на которой поток МВЭ уменьшается в e раз, называемая для краткости длиной поглощения МВЭ в материале объекта. Значения λ для различных материалов и энергии электронов взяты из [11].

Полный поток МВЭ от единичного источника через бесконечную плоскость несложно вычислить, проинтегрировав (1) по плоскости бесконечных размеров. После преобразований получим

$$P = (w dz/2)(z/\lambda) E_2(z/\lambda), \quad (2)$$

где E_2 — интегральная показательная функция 2-го ранга от аргумента z/λ .

Объединив в (2) два последних сомножителя и записав полученную функцию в виде $E_3(z/\lambda)$, окончательно имеем

$$P = (w dz/2) E_3(z/\lambda).$$

Согласно [12] коэффициент K_0 вторичной электронной эмиссии связан с характеристиками материала соотношением $K_0 = w\lambda/4$, что дает возможность нормировать поток от единичного источника на табличное значение этого коэффициента: $P = 2 dz K_0/\lambda$.

При расчетах вкладов МВЭ, формирующих видеосигнал, приходится решать несколько иную, хотя и похожую задачу: вычисление потоков МВЭ через плоскость, ограниченную ширмой (ширмами) — границами боковых граней, верхнего плато, донной части, расположенными на расстоянии T от центра распределения, при этом T является параметром задачи.

Часть потока P_z , отсекаемая ширмой T , определяется

$$P_z(z, T) = \frac{w dz}{2} \frac{z}{\pi \lambda} \int_a^\infty \arctg \left[\frac{\lambda}{T} \sqrt{S^2 - (z/\lambda)^2 - (T/\lambda)^2} \right] \frac{\exp(-S)}{S^2} dS, \quad (3)$$

где $a = \sqrt{Y1^2 + T^2}/\lambda$; $Y1$ — глубина залегания элементарного источника от поверхности; S — переменная интегрирования.

Соотношение (3) позволяет выразить поток P от единичного источника через плоскость, ограниченную ширмой T , т. е. вычислить все компоненты МВЭ, формирующие видеосигнал: потоки, беспрепятственно покидающие образец, и потоки, которые эмиттируются в пространство в результате однократных или многократных отражений от деталей рельефа.

Полный поток МВЭ от объекта с выраженным рельефом, равный значению «функции образца» [12] в точке падения первичного электрона, можно получить путем интегрирования по z уравнений, аналогичных (3). Такое многократное вычисление двойного интеграла от «неудобной» функции

требует, естественно, значительных вычислительных затрат. Поэтому необходимо было разработать оптимизированную стратегию расчетов при составлении алгоритмов и программ. На начальном этапе расчетов по каждому варианту создавали массив функций образца и лишь на заключительной стадии вычисляли модельный видеосигнал как свертку функции образца с гауссовым радиусом пучка первичных электронов. Для нахождения интегралов использовали быстросходящуюся квадратуру Ромберга. Вычисления проводили в среде FORTRAN-95, допускающей работу с массивами значительных размеров. Такая стратегия расчетов позволила заметно уменьшить затраты времени при гарантированной точности результатов (погрешность не более одной единицы в пятом знаке мантиссы).

Результаты моделирования для сложной структуры с рельефными элементами произвольной геометрии приведены на рис. 1. Фрагмент рельефной структуры содержит три выступа, разделенных канавками. Общая длина фрагмента 1000 нм, шаг дискретизации видеосигнала 0,5 нм, число точек видеопрофиля 2000. Схематическое изображение моделируемой структуры представлено на рис. 1а, на рис. 1б – форма соответствующего модельного видеосигнала.

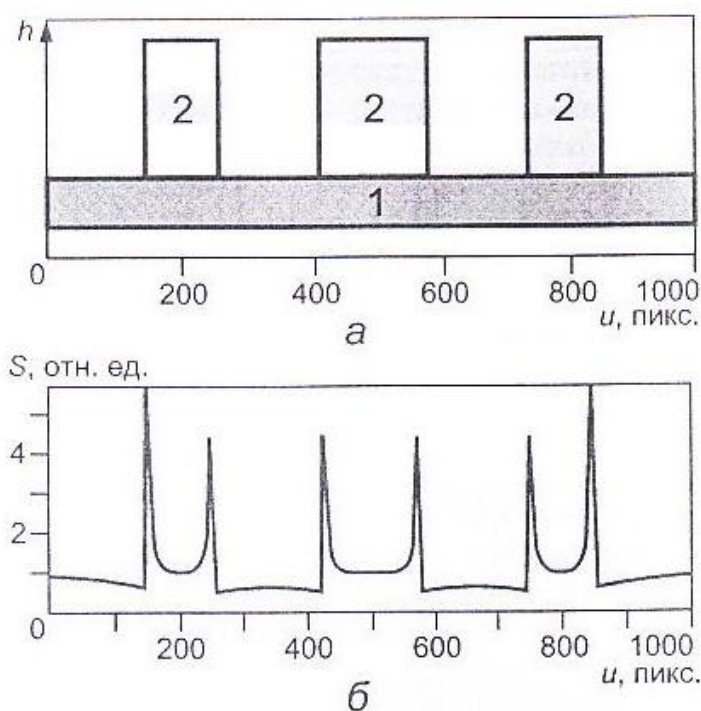


Рис. 1. Моделирование видеосигнала от рельефной структуры («точная» модель): моделируемая структура (а) и модельный видеосигнал S в зависимости от координаты u на экране или снимке (б); 1– подложка; 2 – рельефные выступы высотой 125 нм с вертикальными боковыми стенками; ускоряющее напряжение 2 кВ

Характерными особенностями видеосигнала от рельефных структур являются отчетливые пики по краям элементов – краевые максимумы. Причем внешние краевые максимумы периферийных выступов выглядят более интенсивными, чем максимумы, отвечающие внутренним краям структуры. Это вполне объяснимо: у внешнего края периферийной шины нет рельефного соседа, частично затеняющего потоки вторичных электронов, что и приводит к локальному превышению видеосигнала по сравнению с SEM-изображениями внутренних краев в системе физически одинаковых полос.

Данная особенность модели вполне согласуется с логикой физических процессов, лежащих в ее основе, и множественными наблюдениями. Автору неизвестны публикации о результатах моделирования по методу Монте-Карло, в которых были бы установлены подобные закономерности.

Рассмотренная модель, по-видимому, может с успехом заменить различные версии моделей по методу Монте-Карло. Но и в этом случае преимущества такой, условно называемой «точной» модели достигаются за счет существенных затрат вычислительных ресурсов, хотя эти затраты все же не столь значительны, как при использовании метода Монте-Карло. Для устранения указанного недостатка были выбраны подходящие алгебраические аппроксимации. Эти аппроксимации установлены в ходе длительных процедур их подбора, корректировки (либо замены), при этом «точная» модель служила в качестве эталона сравнения.

Приведем пример применения аппроксимаций при оценке вкладов многократных отражений (ВМО) в суммарный поток МВЭ из области канавки. Строгое решение этой задачи потребовало бы итерационной процедуры для вычисления суммарной «освещенности» потоками МВЭ всех участков составной поверхности канавки. Затем для каждого такого участка следовало бы рассчитать потоки отраженных МВЭ с учетом коэффициента отражения и диаграммы направленности и таким образом оценить вклад ВМО. Поэтому в модели расчет суммарных потоков, излучаемых в результате отражений канавкой известной геометрии, заменяется вычислением специально подобранной функции. В основу выбора такой функции легли следующие очевидные соображения. Поток P отраженных МВЭ из канавки тем больше, чем меньше ее глубина h и чем больше расстояние D между ее «берегами». Зависимость этого потока из канавки от параметра D/h заведомо нелинейная: $P \approx a \exp(bD/h)$. Параметры a , b подбирали экспериментально по наилучшему соответствию модельных и экспериментальных видеосигналов. При такой форме аппроксимирующей зависимости параметры a , b несут существенно ($<3\%$) изменяются при двукратных вариациях отношения D/h .

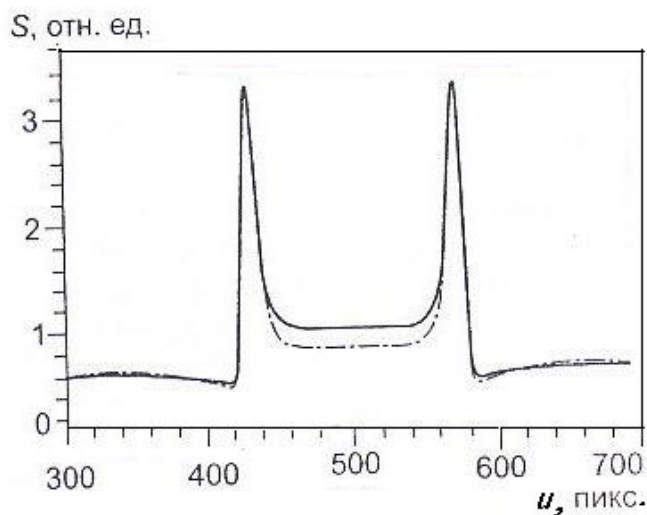


Рис.2. Сопоставление «точных» и «упрощенных» модельных видеосигналов— сплошная и штрихпунктирная кривые, соответственно

В итоге получено соответствие «точной» и «аппроксимационной» (иначе – «упрощенной») моделей, которое можно признать вполне удовлетворительным (рис. 2). Из рис. 2 следует, что несущественные расхождения между «точной» и «упрощенной» моделями заметны, в основном, на участках видеосигнала, отвечающих плато структуры, либо ее донной части. А самые ответственные

(для проведения измерений) зоны видеосигналов, локализованные по краям выступов, совпадают численно.

С применением проверенных аппроксимаций, составляющих основу «упрощенной» модели, на расчет видеосигнала в 1000 – 2000 точках затрачивается 10 – 20 мс процессорного времени (т. е. в 10^5 – 10^6 раз меньше, чем при моделировании по методу Монте-Карло!). Это позволяет использовать модельные расчеты совершенно иначе, в том числе в режиме реального времени, т. е. в процессе выполнения самих измерительных процедур, что открывает совершенно новые возможности для разработки следующего поколения методов измерений. Точность результатов при этом обеспечивается не только совершенством имеющейся «упрощенной» модели, но и возможностью в особо ответственных случаях проводить эпизодические проверки результатов сравнением с «точной» моделью. При помощи таких приемов можно корректировать «упрощенную» модель при необходимости ее дальнейшего совершенствования. Однако следует помнить, что адекватность любой математической модели реальному эксперименту не гарантирована и всегда должна быть предметом проверки.

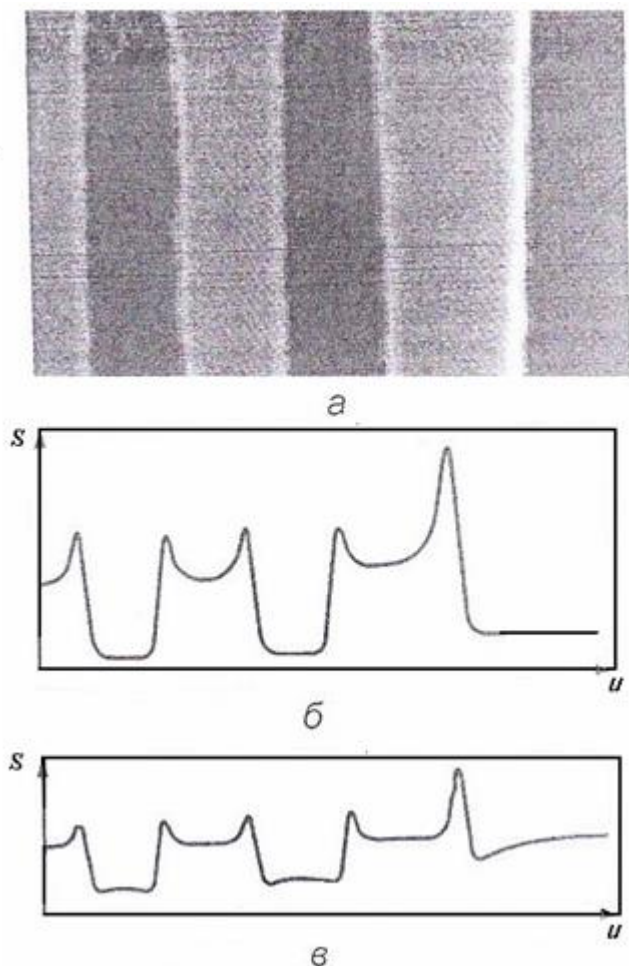


Рис. 3. Сопоставление модельного видеопрофиля с экспериментальным:
а – обычное SEM-изображение участка интегральной схемы с шинами разводки;
б – модельный видеосигнал, рассчитанный по «упрощенной» модели;
в – экспериментальный видеосигнал (одна усредненная строка)

На рис. 3 представлен SEM-снимок фрагмента интегральной схемы, содержащей шины разводки сигналов. Все шины выполнены одинаковыми, однако их SEM-изображения имеют

характерные особенности: внешний край самой крайней шины на снимке выглядит более ярким, чем остальные края соседних шин. Эта особенность прослеживается и на экспериментальном видеосигнале от этой схемы (рис. 3в), что естественно, и на модельном «упрощенном» видеосигнале (рис. 3), как, впрочем, и на «точном» его двойнике. Все экспериментальные результаты получены с использованием современного измерительного микроскопа Hitachi 7400.

Была осуществлена проверка моделей как инструментов для создания высокоточных алгоритмов практических измерений. Исходили из того, что опробование созданных методов измерений убедительнее всего может быть выполнено на стандартных объектах: тестовых образцах, стандартах или эталонах.

Был исследован эталонный образец фирмы VLSI Standard (США). При этом по условиям соглашения для выполнения «слепой» проверки паспортные данные образца с указанием аттестовочного значения номинального размера известны не были. Описание технологии изготовления и аттестации подобных стандартов можно найти в [13]. Результат измерений образца методом, основанном на «точной» модели, составил 70,3 нм. Затем от фирмы VLSI Standard получили копию паспорта на данный экземпляр стандарта, в котором указаны номинальный размер и погрешность аттестации стандарта ($70,1 \pm 0,7$) нм. Таким образом, расхождения результатов измерений с паспортными данными заметно меньше погрешности аттестации самого стандарта. Также была проведена «слепая» проверка результатов измерений стандарта фирмы TSMC (Тайвань). При этом исследовали не сам образец, а его SEM-снимки, опять-таки с заранее неизвестным номинальным размером. Найденный при проверке номинальный размер составил 45,0 нм, а расхождения – 0,3 нм.

В результате обеих «слепых» проверок были получены расхождения с номинальными значениями, меньшие погрешностей паспортных значений исследуемых эталонных образцов.

Таким образом, продемонстрированные выше характеристики разработанной системы из двух моделей – «точной» и «упрощенной» – представляют не только академический интерес, но и открывают пути создания нового поколения измерительных алгоритмов и практических методов «измерений для «in process» контроля размеров в условиях массового выпуска микроэлектронной продукции с проектными нормами нанометрового диапазона.

Ջ.Ա.Բաբայան

ՄԱԹԵՄԱՏԻԿԱԿԱՆ ՍՈՂԵԼԱՎՈՐՄԱՆ ՕԳՏԱԳՈՐԾՈՒՄԸ ՄԻԿՐՈԷԼԵԿՏՐՈՆԻԿԱՑՈՒՄ ԵՎ ՇԻՆԱՆՑՈՒԹԵՐԻ ՆԱՆՈՉԱՓԵՐԻ ՉԱՓՄԱՆ ՀԱՄԱՐ

Մշակված են տեսաձրող էլեկտրոնային մանրադիտակում տեսաազդանշանը նմանակող «ճշգրիտ» և «պարզեցված» մաթեմատիկական մոդելներ: Ցույց է տրված, որ «պարզեցված» մոդելը գործնականում նույնական է «ճշգրիտ» մոդելի հետ, բայց պահանջում է հաշվողական ռեսուրսների զգալիորեն քիչ ծախսեր: Բերված են այս մոդելների օգտագործման օրինակներ՝ ժամանակակից ինտեգրալային սխեմաների նանոչափական տարրերի բարձր ճշգրտության չափումների գործնական ալգորիթմների նոր սերնդի մշակման ժամանակ:

Առանցքային բառեր. *մաթեմատիկական մոդելավորում, տեսաձրող էլեկտրոնային մանրադիտակ, միկրոէլեկտրոնիկա, նանոչափ:*

THE USAGE OF MATHEMATICAL MODELING FOR NANOSCALE MEASUREMENT, MICROELECTRONICS AND CONSTRUCTION MATERIALS

The review of models for nanoscale measuring in microelectronics and building materials is given. The two new mathematical models – the "accurate" and the "simplified" - imitating the video signal in scanning electron microscope are offered. The "simplified" model is practically adequate to the "accurate", but requires considerably less computational resources. The examples of these models usage for the development of new generation of practical algorithms for high precision measurements of integrated circuits nanoscale elements are given.

Keywords: mathematical modeling, scanning electron microscopy, microelectronics, nanoscale.

Литература

1. Бродуай И., Мерей Дж. Физические основы микротехнологии/ Пер. с англ.; под ред. А. В. Шальнова. М.: Мир, 1985.
2. **International** Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). N.Y.: SIA, 2006.
3. **Postek M. T.** Critical issue in scanning electron microscope metrology // J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol. 1994. N 99. P.641.
4. **Archard G. D.** // J. Appl. Phys. 1961. N 32. P.1505.
5. **Аммосов Р. М., Кузнецова В. В., Никитин А. В.** Анализ видеосигнала от выступа в растровом электронном микроскопе // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1984. Вып. 3. С. 19-23.
6. **Lowney J. R.** Application of Monte Carlo to simulations to critical dimension metrology in a scanning electron microscope// Scanning Microscopy. 1996. N 10 (3). P. 667-678.
7. **Lowney J. R.** MONSEL II: Monte Carlo simulations of SEM signals for linewidth metrology //Microbeam Anal. 1995. N4. P. 131-136.
8. **Babin S., Borisov S., Ivanchikov A.** Monte Carlo modeling of SEM using CHARIOT software and opportunity for calibration of linewidth metrology // Scanning. 2007. V. 29, N 2. P. 80.
9. **Villarrubia J.S. et al.** Scanning electron microscope analog of scatterometry //Proc. SPIE. 2002. V.4689. P. 304.
10. **Пат. 2134864 РФ.** Способ измерения линейных размеров / М. Ю. Ильин и др. // Изобретения. 1999. № 23.
11. **Seach M. P., Dench W. A.** Quantitative electron spectroscopy of surfaces: a standard data base for electron unelastic mean free path in solids// Surface and Interface Anal. 1979. V.1, N 1. P. 2-11.
12. **Аммосов Р. М., Кузнецова В. В., Никитин А. В.** Характеристики потока вторичных электронов, формирующих видеосигнал в РЭМ // Электронная техника. Сер. 3. Микроэлектроника. 1982. Вып. 5-6. С. 43-49.
13. **Tortonese M. et al.** Sub 50-nm isolated line and trench width artifacts for CD metrology// Proc. SPIE. 2004. V. 5357. P. 647-656.

Բաբայան Զիզա Ասատուրի, տ.գ.թ. (ՀՀ, ք.Երևան)-Քար և սիլիկատների ինստիտուտ, Մետրոլոգիայի և ստանդարտների բաժնի վարիչ, հեռ.(010)582789, բջջ.(091) 950958

Бабаян Зиза Асатуровна, к.т.н. (РА, г.Ереван)-институт Камня и силикатов, заведующий отделом Метрологии и стандартов, тел.:(010)582789, моб.:(091)950958

Babayan Ziza Asatur, doctor of engineering (RA, Yerevan)-Institute of Stone and Silicate, head of department of Metrolgy and Standarts, phone:(010)582789, cell :(091)950958

Ներկայացվել է՝ 05.06.2012թ.

Ընդունվել է տպագրության՝ 04.10.2012թ.