

УДК 621.3

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ СУБПИКСЕЛЬНОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОМ КОНТРОЛЕ ОРИГИНАЛОВ ТОПОЛОГИИ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

Лауреат Государственной премии Республики Беларусь, канд. техн. наук АВАКОВ С. М.

*Научно-производственное республиканское унитарное предприятие
«КБТЭМ-ОМО» ГНПО «Планар»*

Технологический процесс формирования оригиналов топологии интегральных схем на фотошаблонах является основой кристалльного производства. Как известно, топология современной интегральной схемы – это сложная структура, состоящая из десятков и сотен миллионов геометрических фигур. Генерирование такой структуры на металлизированном фотошаблоне в точном соответствии с проектными данными за один цикл фотолитографии представляет собой неразрешимую задачу. Поэтому неотъемлемой частью технологического процесса изготовления фотошаблонов являются операция автоматического контроля топологии на соответствие проектным данным, а также операция устранения обнаруженных дефектов. Операция автоматического контроля топологии – одна из самых дорогостоящих во всем технологическом процессе изготовления интегральных схем. Единственная зарубежная компания, поставляющая оборудование для выполнения этой операции, – это KLA-Tencor (США). Установка для автоматического контроля топологии фотошаблонов в исполнении для технологического уровня 90 нм – TeraScanHR [1], например, стоит более 16 млн дол., для уровня 65 нм – 24 млн дол. Отечественная установка ЭМ-6329 уровня 250 нм стоит около 1 млн дол., установка ЭМ-6729 [2] уровня 65 нм – около 3 млн дол. Как видно, каждый новый уровень проектной нормы влечет за собой существенное удорожание оборудования. Получение субпиксельного разрешения позволяет улуч-

шить обнаружительную способность оборудования для автоматического контроля топологии без существенных материальных затрат практически путем доработки только внутреннего программного обеспечения установки.

Требования фотолитографии. Как известно, в соответствии с законом Мура, приведенная площадь кристалла интегральной схемы удваивается через каждые 18 мес. В соответствии с этой закономерностью имеет место постоянный процесс уменьшения топологических проектных норм, что, в свою очередь, достигается путем применения нового фотолитографического оборудования для проекционного переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину, оснащенного более высокоразрешающими оптическими системами. Стремление получения максимально возможного разрешения при заданной длине волны и апертуре объектива приводит к уменьшению значения коэффициента K_1 в формуле Рэля для разрешения оптической системы [3]. При значении этого коэффициента 0,5 и более фотолитографический процесс проекционного переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину может быть выполнен при помощи традиционных, так называемых бинарных фотошаблонов, имеющих только два вида изображения – темное и светлое. При уменьшении значения этого коэффициента требуемое качество изображения удастся получить только путем введения в топологию фотошаблона специальных вспомогательных фрагментов – элементов коррекции оптической

близости (OPC), обеспечивающих улучшение формы топологических фигур, а также фазосдвигающих элементов (PSM), обеспечивающих повышение контраста изображения. При значениях коэффициента $K_1 = 0,4$ и менее наличие элементов OPC и PSM является обязательным. Поэтому техника формирования на фотошаблонах элементов OPC и PSM получила название техники повышения разрешения (RET – Resolution Enhancement Technique) [3]. Фазосдвигающие элементы формируются либо при помощи так называемых полутоновых шаблонов, обеспечивающих постоянный фазовый сдвиг на границах элементов топологии [4], либо при помощи шаблонов с переменным фазовым сдвигом, который достигается путем выполнения второй фотолитографии с последующим травлением кварцевой подложки [5]. Введение фазосдвигающих элементов, особенно при изготовлении фотошаблонов с переменным фазовым сдвигом, существенно усложняет технологический процесс и соответственно удорожает его. Стоимость одного комплекта из 27 фотошаблонов для технологии 90 нм, например, может достигать 1,6 млн дол. [6]. Необходимость изготовления фазосдвигающих фотошаблонов, особенно с переменным фазовым сдвигом, накладывает определенные требования на технологическое оборудование. Так, генератор изображений должен быть оснащен системой совмещения, а установка автоматического контроля топологии – системой получения изображения в режиме фазового контраста. Введение элементов OPC и PSM приводит к необходимости формирования и соответственно контроля элементов изображения, меньших базового элемента топологии фотошаблона (проектной нормы, умноженной на кратность объектива степпера, используемого для проекционного переноса изображения на пластину). Например, для проектной нормы 0,13 мкм размер базового элемента на шаблоне при четырехкратном переносе составит 0,52 мкм, а требуемый размер элемента OPC, в частности серифа [3], может составлять 200–250 нм. При уменьшении проектной нормы размеры вспомогательных элементов уменьшаются сильнее размеров основного элемента и для нормы 65 нм это соотношение может составлять 1:3. Таким образом, для работы с проектными нор-

мами 65 нм обнаружительная способность установки автоматического контроля оригиналов топологии должна составлять около 90 нм. Указанное выше обстоятельство и является причиной опережающего уменьшения требуемой обнаружительной способности установки автоматического контроля топологии по сравнению с уменьшением топологической проектной нормы.

Создание универсальной системы получения субпиксельного разрешения. Одним из возможных путей решения задачи получения субпиксельного разрешения является использование алгоритмов, осуществляющих сканирование полутоновых моделей изображения, сформированных в памяти компьютера с целью получения оптимального совмещения сетки дискретизации установки и координатной системы фотошаблона (рис. 1), так называемых алгоритмов виртуального сканирования. Использование этих алгоритмов позволяет обнаруживать изолированные дефекты, меньшие по размеру, чем размер элемента разложения изображения (пикселя).

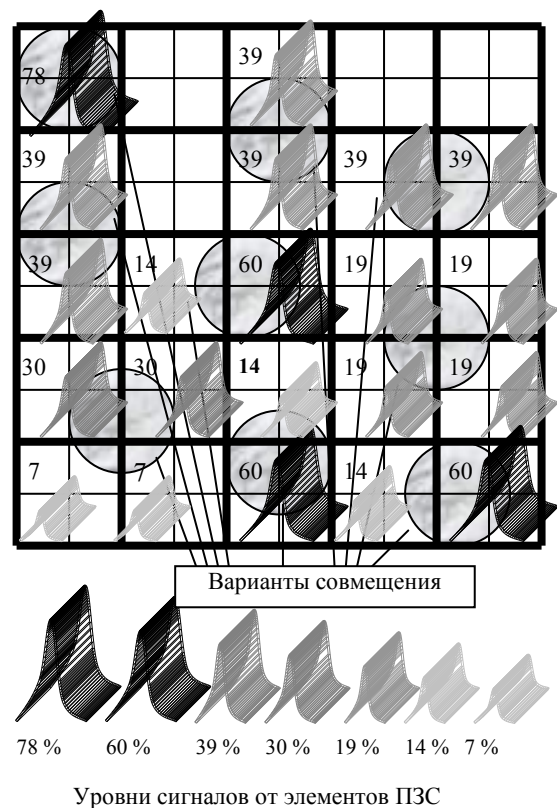


Рис. 1. Различные варианты расположения дефекта для построения алгоритма виртуального сканирования

Для достижения требуемого результата эти алгоритмы должны использоваться параллельно с подсистемой динамического автосовмещения (рис. 2), обеспечивающей точное совмещение оптического и эталонного изображений в процессе сравнения. Для обеспечения возможности эффективного встраивания этих алгоритмов в систему контроля была создана специальная двухуровневая динамическая модель оптического изображения. Эта модель позволяет выполнять, с одной стороны, точное совмещение оптического изображения с эталонным, а с другой – анализ оптического изображения для получения оптимального взаимного расположения сетки дискретизации установки контроля и позиции обнаруживаемых дефектов.

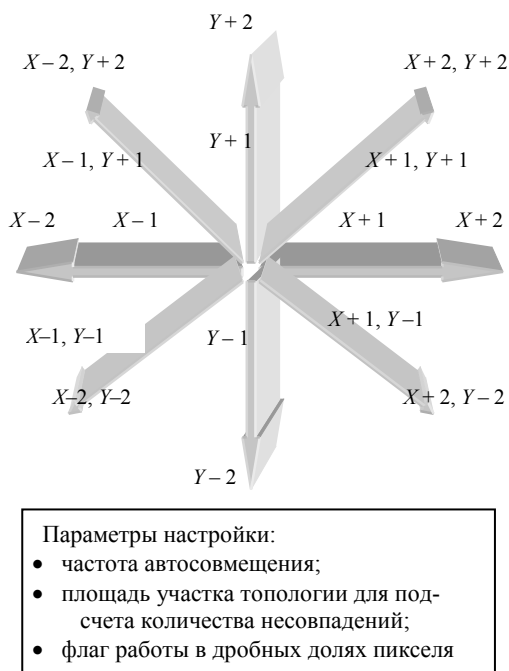


Рис. 2. Подсистема динамического автосовмещения изображений

Алгоритмы виртуального сканирования и второй уровень динамической модели оптического изображения в совокупности представляют собой систему виртуального сканирования (рис. 3). Субпиксельное разрешение при этом достигается за счет формирования динамической двухуровневой модели процесса автоматического контроля топологии. Первый уровень этой модели формируется подсистемой динамического автосовмещения, обеспечивающей совмещение эталонного и реального изображений.

Второй уровень модели формируется при помощи алгоритмов виртуального сканирования, обеспечивающих оптимальное совмещение сетки дискретизации установки контроля с пространственным расположением дефектов. Эта система используется в отечественных установках контроля топологии методом сравнения с проектными данными ЭМ-6029Б и ЭМ-6329. Совмещение оптического и эталонного изображений так же, как и совмещение сетки дискретизации установки контроля с топологией фотошаблона, производится при помощи двухуровневой модели, которая обновляется на каждом шаге сканирования. Первый уровень модели представляет собой совокупность совмещенных полутоновых моделей оптического и эталонного изображений, в которых каждому пикселю соответствует определенный код сигнала. Наиболее сложной проблемой при построении этого уровня модели является определение текущей точки оптического изображения, которая соответствует текущей точке эталонного изображения.

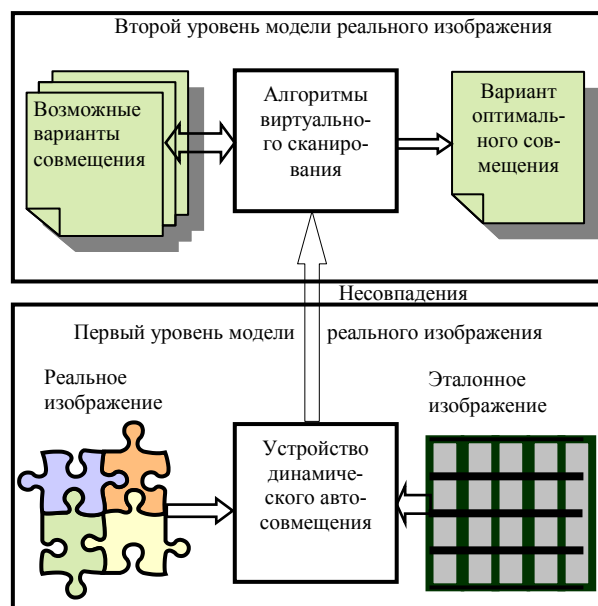


Рис. 3. Система виртуального сканирования

Эта проблема решается в процессе сканирования шаблона при помощи подсистемы динамического автосовмещения изображений. Данная подсистема (рис. 2) построена на базе многоканального компаратора, который на каждом шаге просчитывает число несовпадений опти-

ческого и эталонного изображений при шестнадцати возможных вариантах рассовмещения этих изображений. Далее по минимуму несовпадений определяется точка оптимального совмещения.

Второй уровень модели представляет собой полутоновую модель, полученную в результате сканирования модели первого уровня. Сканирование называется виртуальным, потому что не связано с перемещением реального и построением оптического изображений. Оно производится путем выполнения определенных преобразований кодов модели первого уровня, в результате чего формируется модель второго уровня, соответствующая некоторому изображению, реальное сканирование которого не производилось. Построение модели первого уровня производится с опережением относительно процесса компарирования оптического и эталонного изображений, что делает оба уровня модели независимыми.

Подсистема виртуального сканирования позволяет производить преобразование кодов полутоновой растровой модели изображения первого уровня, в результате чего формируется набор моделей второго уровня. Каждая из этого набора моделей соответствует определенному варианту совмещения сетки дискретизации установки с изображением дефекта (рис. 3). Путем проведения анализа амплитудного контраста каждой модели изображения из полученного набора моделей второго уровня выбирается та, которая соответствует оптимальному совмещению сетки дискретизации системы формирования изображения с текущим элементом изображения (который, в частности, может представлять собой дефект). Алгоритмы виртуального сканирования позволяют вводить коррекцию положения обнаруженных дефектов в долях пикселя на полутоновой модели топологии, изменяя одновременно полутоновые коды пикселей так, как они бы изменились, если бы аналогичное смещение имело место при реальном сканировании. При этом в памяти подсистемы анализа изображений строится полутоновая модель просканированного участка топологии. После этого производится поиск групп элементов, имеющих амплитуду сигнала выше порога шума, но ниже той, которая позволяет сделать заключение о наличии изобра-

жения. Далее производится градиентный анализ пространственного распределения сигналов, полученных в процессе фотометрирования топологии, который позволяет выявить компактные области аномалий сигналов. Этот анализ производится в ближайшей окрестности текущей точки совмещения реального и эталонного изображений в диапазоне работы устройства динамического автосовмещения. В случае обнаружения группы сигналов с монотонно изменяющимся уровнем производится интегрирование этой группы, после чего сформированное интегральное значение присваивается пикселю, соответствующему текущей точке. Это значение анализируется и в случае превышения порогового значения амплитуды сигнала регистрируется как дефект.

Такой подход позволяет производить оптимальное совмещение между сеткой дискретизации установки автоматического контроля топологии и топологией фотошаблона в диапазоне 1 пикселя по обеим координатам. Это, в свою очередь, всегда позволяет получать максимально возможный амплитудный контраст сигналов в цифровой модели изображения малых элементов на выходе используемых фотоприемников. Соответственно отпадает необходимость настраивать фотоэлектрическую систему с учетом возможности прохождения дефектов с околопиксельными размерами через соседние фоточувствительные элементы (рис. 3). Подсистема виртуального сканирования используется при компарировании как контрастных, так и полутоновых изображений.

Эта система хорошо сочетается с подсистемой динамического автосовмещения изображений (рис. 2), которая производит совмещение оптического и эталонного изображений в целых или в дробных долях пикселя, но работает с опережением. Алгоритмы виртуального сканирования производят модификацию кодов сигналов только на модели и не меняют реального взаимного положения оптического и эталонного изображений с точки зрения их глобального совмещения. Подсистема виртуального сканирования не меняет (не улучшает и не ухудшает) взаимного совмещения оптического и эталонного изображений, а только совмещает сетку дискретизации установки с реальным расположением дефекта. Эти две системы фор-

мируют двухуровневую модель изображения, позволяющую, с одной стороны, производить точное совмещение оптического и эталонного изображений на каждом шаге сканирования, а с другой – осуществлять оптимальное цифровое топологическое объектов.

Например, в подсистеме формирования изображения, имеющей амплитудное разрешение на уровне четырех единиц сигнала, дефект размером 1 пиксель с 40%-м оптическим контрастом, после фотометрирования может быть представлен четырьмя пикселями с амплитудным электрическим контрастом на уровне 10 %. Алгоритм виртуального сканирования, выполняя интегрирование соседних элементов, в этом случае преобразует его в однопиксельный элемент с амплитудным контрастом около 40 %. Выполнение такого преобразования позволит обнаружить такой дефект с высокой вероятностью.

Таким образом, система контроля, имеющая обнаружительную способность P без использования алгоритмов виртуального сканирования, должна быть рассчитана с учетом возможности разбиения дефектов с околопиксельными размерами на части при фотометрировании. Применение алгоритмов виртуального сканирования позволяет не учитывать этот случай и соответственно обеспечить лучшую обнаружительную способность $P - \Delta P$. При этом необходимо, конечно, учитывать реальную разрешающую способность оптической подсистемы установки.

Реальные объективы установок разрешают элементы изображения, существенно меньшие размера пикселя, с удовлетворительным контрастом. Так, для элементов с размером 0,12 мкм получаем оптический контраст на уровне 0,5 и 0,3 для объективов с апертурой 0,75 и 0,5 соответственно. При контроле методом сравнения двух оптических изображений или методом сравнения с проектными данными на каждом шаге сканирования изображения имеется возможность достоверно предсказать, какая топология должна появиться. Особенно точно это можно определить в случае метода сравнения с проектными данными, потому что в этом случае эталонное изображение имеет идеальную форму, что существенно уменьшает сложность анализа и значительно повышает его достоверность. Это обстоятельство позволяет на каждом шаге сканирования при помощи до-

статочно простой, аппаратно реализованной логики иметь признак, определяющий тип контролируемой топологии. За счет этого можно выбирать соответствующий алгоритм виртуального сканирования для каждого типа дефектов в отдельности и распространять, таким образом, принципы формирования двухуровневой модели фотометрирования изображений на все типы дефектов.

Субпиксельное разрешение при таком подходе позволяет повысить обнаружительную способность установки контроля для изображений с высоким контрастом как минимум на 20 %. Соответственно коэффициент захвата изображения K_d [7] уменьшается при этом также примерно на 20 %

$$K_d = \text{Defect Size}/(\lambda/NA),$$

где Defect Size – размер дефекта; λ – длина волны; NA – числовая апертура.

При таком подходе величина субпиксельной обнаружительной способности составляет 0,20 мкм при размере пикселя 0,25 мкм, 0,40 мкм – при размере пикселя 0,5 мкм. При меньших размерах пикселя эти значения могут быть различными в зависимости от конкретных реализаций системы формирования изображения и используемых алгоритмов. Расчетное значение субпиксельной обнаружительной способности при размере пикселя 0,15 мкм составляет 0,12 мкм.

Создание объектно-ориентированной системы получения субпиксельного разрешения. Результатом применения объектно-ориентированного подхода к проблеме автоматического контроля топологии явилось создание нового метода сравнения параметризованных моделей топологии [8]. В соответствии с этим методом контролируемое изображение разбивается на участки топологии, каждый из которых характеризуется набором параметров. Сформированные таким образом параметризованные модели реальной топологии сравниваются с соответствующими моделями эталонной топологии. Точность вычисления параметров моделей может быть при этом значительно меньше, чем размер пикселя. При использовании полутонового представления значения некоторых параметров моделей могут быть в несколько десятков раз точнее, чем размер пикселя. Так, для топологии типа «контактные окна» при контроле традиционным методом сравне-

ния с проектными данными [9, 10] размер минимального обнаруживаемого дефекта не может быть меньше квадрата со стороной, равной размеру пикселя, а в случае применения метода сравнения параметризованных моделей минимальный размер обнаруживаемого дефекта может достигать 10 % размера пикселя и менее, что определяется соотношением сигнал/шум в канале ПЗС-камеры. Применение алгоритмов детектирования дефектов с быстродействием, превышающим быстродействие формирования модели топологического рисунка интегральной схемы, позволяет обрабатывать одну и ту же топологию по разным алгоритмам [11, 12] и получать субпиксельное разрешение для различных типов топологических объектов. Базовыми типами топологии при этом являются основные два типа структур, рассматриваемые в фотолитографии, – структуры типа «линия–промежуток» и структуры типа «контактное окно» [3].

ВЫВОДЫ

1. Предложены два метода получения субпиксельного разрешения, реализованные в отечественных установках автоматического контроля топологии ЭМ-6029Б, ЭМ-6329 и ЭМ-6729:

- метод, основанный на применении алгоритмов виртуального сканирования модели топологии;
- метод сравнения параметризованных моделей топологии.

2. Первый метод основан на использовании двухуровневой модели изображения совместно с алгоритмами виртуального сканирования, работающими параллельно с подсистемой динамического автосовмещения. Этот метод позволяет улучшить обнаружительную способность установки автоматического контроля топологии фотошаблонов при сравнении топологии фотошаблона с проектными данными на 20–30 % без изменения размера пикселя и соответственно без изменения параметров системы сканирования. Предложенный метод универсален и может быть использован при контроле топологии любого типа.

3. Применение второго метода (метода сравнения параметризованных моделей) позволяет получить субпиксельное разрешение на основных типах структур фотолитографии –

структурах типа «линия–промежуток» и «контактное окно» – менее 10 % размера пикселя установки автоматического контроля топологии, что для установки ЭМ-6329, например, составляет 25 нм. Этот метод эффективен при использовании специализированных алгоритмов для отдельных видов топологических структур.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Results** from a new die-to-database reticle inspection platform / W. Broadbent [et al.] // Metrology, Inspection, and Process Control for Microlithography XXI, Chas N. Archie, Ed., Proc. of SPIE, Vol. 6518. – P. 651821; 2007. – P. 1–14.
2. **A complete** set of the special process equipment for the defect-free production of reticles / S. Avakaw [et al.] // The 23rd European Mask and Lithography Conference EMLC-2007. January 22–25, 2007. – Grenoble, France. – P. 29–30.
3. **Alfred, Kwok-Kit Wong.** Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography / Alfred Kwok-Kit Wong // SPIE PRESS, USA 2001. – P. 1–213.
4. **Comparative** study of bi-layer attenuating phase-shifting masks for hyper-NA lithography / Masaki Yoshizawa [et al.] // Vacus News. – Vol. 22, Issue 8. – August 2006. – P. 1–11.
5. **Evaluation** of quartz dry etching profilr for the PSM lithography performance / K. Toro [et al.] // Vacus News. – Vol. 22, Issue 1. – January 2006. – P. 1–15.
6. **Uwe, Behringer.** Foreword of the 19th European Mask Conference on Mask Technology for Integrated Circuits and Micro-Components / Behringer Uwe // Lectures held at the GMM-Conference. January 13–15, 2003 in Sonthofen, Germany. – P. 1–2.
7. **Avakaw, S. M.** Semi-transparent Isolated defects detection by die-to-database mask Inspection using virtual scanning algorithms for sub-pixel resolution / S. M. Avakaw // EMC-2004, January 12–14, 2004, Dresden, Germany – GMM Fachbericht 43, VDE Verlag. – P. 43–52.
8. **Способ** контроля дефектов первичных шаблонов: пат. 8893, РБ № а 20040821, приоритет 31.08.2004 / А. И. Корнелюк, С. М. Аваков.
9. **Способ** контроля дефектов первичных шаблонов: пат. 9175, РБ № а 20040985, приоритет 26.10.2004 / А. И. Корнелюк, С. М. Аваков.
10. **Avakaw, S. M.** Method to determine a detection capability of the die-to-database mask inspection system in regard to pinhole and pindot defects / S. M. Avakaw // EMC-2003, January 13–15, 2003, Sonthofen, Germany – GMM Fachbericht 39, VDE Verlag. – P. 179–187.
11. **Multi-beam** high resolution die-to-database reticle inspection / W. W. Volk [et al.] // EMC-2002, January 15–16, 2002, Munich, Germany – GMM Fachbericht 36, VDE Verlag. – P. 163–173.
12. **Avakaw, S.** High productivity object-oriented defect detection algorithms for the new modular die-to-database reticle inspection platform / S. Avakaw // SPIE. – Vol. 5835. – P. 290–299, Jun 2005.

Поступила 8.08.2007