

3. Путем численного решения этих уравнений методом Рунге – Кутты с использованием разработанного программного кода в среде MathCad получены графические изображения траектории движения точки свободного конца стрелы при различных параметрах колебательной системы и условиях ее возбуждения.

4. На основании обобщенного анализа полученных траекторий показано, что с достаточной для инженерных расчетов точностью их форму оправдано аппроксимировать эллиптической. Установлено, что за счет изменения характеристик колебательной системы (жесткость упругого подвеса, величина и положение инерционной массы относительно оси качания стрелы, коэффициент демпфирования), а также условий возбуждения системы (амплитуда и частота вынужденных колебаний) можно целенаправленно влиять как на положение эллиптической траектории относительно горизонтальной оси, так и на величину главных полуосей эллипса, т. е. на геометрические параметры эллиптической траектории.

5. Показано, что при прочих равных условиях наиболее простым в осуществлении и эффективным в применении способом управления параметрами циркуляционного движения точки свободного конца стрелы является регулирование частоты вынужденных колебаний, сообщаемых оси ее качания. Установлено, что ее повышение приводит к увеличению угла наклона большой оси эллиптической траектории по отношению к горизонтали с одновременным увеличением размаха вертикальных перемещений стрелы, т. е. постепенному приближению формы траектории от эллиптической к круговой.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Епифанов, В. И.** Технология обработки алмазов в бриллианты: учеб. / В. И. Епифанов, А. Я. Песина, Л. В. Заков. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
2. **Пичугин, И. Г.** Технология полупроводниковых приборов / И. Г. Пичугин, Ю. М. Таиров. – М.: Высш. шк., 1984. – 288 с.
3. **Киселев, М. Г.** Влияние ультразвука на производительность механической обработки монокристаллов сверхтвердых материалов / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Г. А. Галенюк // Вестник Полоцкого государственного университета. – 4-е изд.: Фундаментальные науки. – Новополоцк, 2005. – С. 128–132.
4. **Патент.** Установка для обработки кристаллов алмаза: пат. 1 С1 ВУ, МПК В28Д 5/00 / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, А. С. Старовойтов, В. А. Зайцев. – № 8393; Опубл. 2006.08.30 // Афіцыйны бюл. – № 4 (51).
5. **Киселев, М. Г.** Влияние виброударного режима взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемой заготовки на условия формирования ее шероховатости при механическом распиливания хрупких и твердых материалов / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов // Инженерно-технический журнал. – 2005. – № 2. – С. 171–176.
6. **Киселев, М. Г.** Установка для распиливания монокристаллов алмаза при сообщении заготовке периодического циркуляционного движения / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2-е изд. – Гомель, 2011. – С. 4–9.
7. **Киселев, М. Г.** Установка для исследования процесса распиливания монокристаллов алмаза при сообщении заготовке вынужденных колебаний / М. Г. Киселев, А. В. Дроздов, Д. А. Ямная // Материалы 3-й Междунар. науч.-техн. конф. «Приборостроение 2010». – Минск, 2010. – С. 230–231.
8. **Быховский, И. И.** Основы вибрационной техники / И. И. Быховский. – М.: Машиностроение, 1968. – 362 с.
9. **Бабицкий, В. И.** Теория виброударных систем / В. И. Бабицкий. – М.: Наука, 1978. – 352 с.

Поступила 17.05.2013

УДК 621.3

## ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОШАБЛОНОВ, ОСНОВАННАЯ НА ОПЕРАТИВНОМ МОДЕЛИРОВАНИИ ПАРАМЕТРИЗОВАННЫХ ПРОЦЕССОВ ФОТОЛИТОГРАФИИ

Асп. РУСЕЦКИЙ В. А.

Научно-производственное республиканское унитарное предприятие «КБТЭМ-ОМО»

Современный процесс производства интегральных микросхем в целом и процесс производства оригиналов топологии на фотошаблонах в частности характеризуются неуклонным ростом сложности формируемых топологических структур, обусловленным как уменьшением проектных норм, используемых при создании полупроводниковых приборов, так и все более интенсивным применением техники RET (Resolution Enhancement Technique – техника повышения разрешения) [1]. Соответственно повышаются сложность технологии изготовления и стоимость фотошаблонов, которая для проектных норм субстананометрового диапазона может превосходить один миллион евро за комплект [2]. Поэтому большое значение имеет повышение процента выхода годных (при одновременном обеспечении 100%-й вероятности отсутствия дефектов в процессе использования) фотошаблонов в кристалльном производстве. Необходимо перейти от технологии «обнаруживать все дефекты – исправлять все дефекты» к технологии «обнаруживать все дефекты – исправлять только те, которые проработаются в процессе последующего проекционного переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину». Эта технология должна быть распространена и на групповые дефекты (каждый из которых в отдельности может не быть значимым), которые в совокупности могут давать критичный дефект.

Существуют два типа дефектов, степень критичности которых можно определить только при помощи комплексной оценки соответствующих фрагментов топологии – это групповые дефекты конструктивных элементов (рис. 1) и дефекты элементов OPC (Optical Proximity

Correction – коррекция оптической близости) (рис. 2) [3]. Таким образом, необходим подход, обеспечивающий возможность решения следующих задач:

- минимизации количества исправляемых дефектов;
- определения критичности групповых дефектов конструктивных элементов;
- определения критичности дефектов элементов OPC.

На современных кристалльных производствах оценка фотолитографической значимости (критичности) дефектов, необходимая для решения трех обозначенных выше задач, производится в процессе выполнения операции фотолитографии на полупроводниковой пластине при помощи установки совмещения и мультипликации, потому что 100%-е моделирование дефектов, обнаруженных в процессе контроля фотошаблонов, не представляется возможным. Это обусловлено, с одной стороны, тем, что существующие системы моделирования процессов фотолитографии являются громоздкими в силу своей универсальности, неоднозначными в настройке и обладают очень низким быстродействием. С другой стороны, эти системы слабо связаны с используемым контрольным оборудованием, что не позволяет проводить предварительную обработку дефектов топологии с целью минимизации количества моделируемых фрагментов топологии.

Учитывая изложенное выше, перспективным является новый подход к процессу производства фотошаблонов, обеспечивающий возможность оперативной оценки фотолитографической значимости дефектов топологии без выполнения операции проекционного переноса изображения на полупроводниковую пластину.

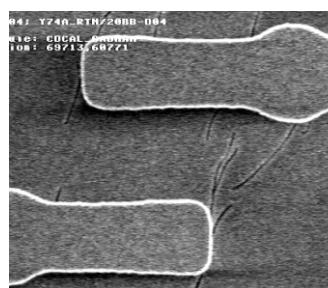
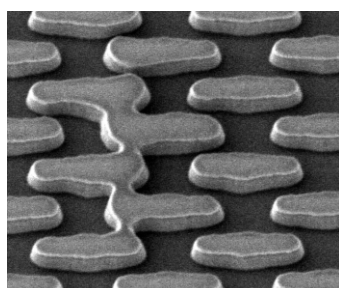


Рис. 1. Влияние групповых дефектов на процесс формирования топологии: а – топология пластины на электронном микроскопе; б – то же шаблона

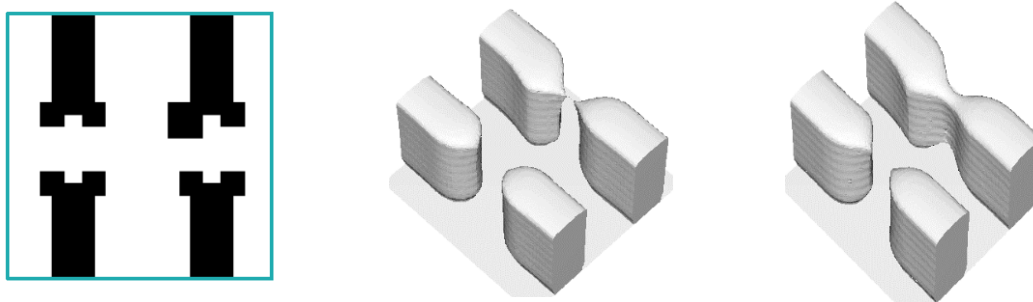


Рис. 2. Влияние дефектов структур OPC на форму конструктивных элементов: а – сериф, увеличенный на 175 нм; б – дефокус 0,2 мкм; в – то же 0,5 мкм

**Обобщенная модель традиционных технологических процессов.** Традиционная схема процесса изготовления оригиналов топологии на фотошаблонах (рис. 3) предполагает наличие следующих технологических операций [4]:

- подготовку данных;
- первичное формирование топологических структур на фотошаблонах (Front-end of line);
- заключительное формирование топологических структур на фотошаблонах (Back-end of line).

Подготовка данных включает в себя преобразование проектных данных из формата системы проектирования в форматы технологического оборудования, а также аугментацию и верификацию данных. Процесс аугментации имеет все большее значение при уменьшении технологической проектной нормы, так как позволяет вводить в проектные данные топологические структуры, обеспечивающие возможность повышения контраста изображения и корректировку формы элементов топологии, что в совокупности дает возможность улучшить фотолитографическое разрешение без уменьшения длины волны экспонирующего излучения или увеличения числовой апертуры

оптической системы. Это, в свою очередь, приводит к снижению значения коэффициента  $k_1$  в соотношении Рэлея для разрешения оптических систем (1) [5] за счет коррекции оптической близости, а также за счет введения фазосдвигающих элементов, обеспечивающих увеличение контраста критических элементов топологии [6]:

$$R = \frac{\lambda}{NA} k_1, \quad (1)$$

где  $R$  – разрешение оптической системы;  $\lambda$  – длина волны экспонирующего излучения;  $NA$  – числовая апертура оптической системы;  $k_1$  – коэффициент, определяющий технологический уровень компонентов системы.

К группе Front-end традиционно относятся операции генерирования изображений, процессы химической обработки (проявление фоторезиста, травление маскирующего покрытия), контроля критических размеров и совмещаемости комплектов фотошаблонов, т. е. те операции, которые относятся к части технологического процесса, связанной с первичным формированием топологического рисунка интегральной схемы на фотошаблоне.

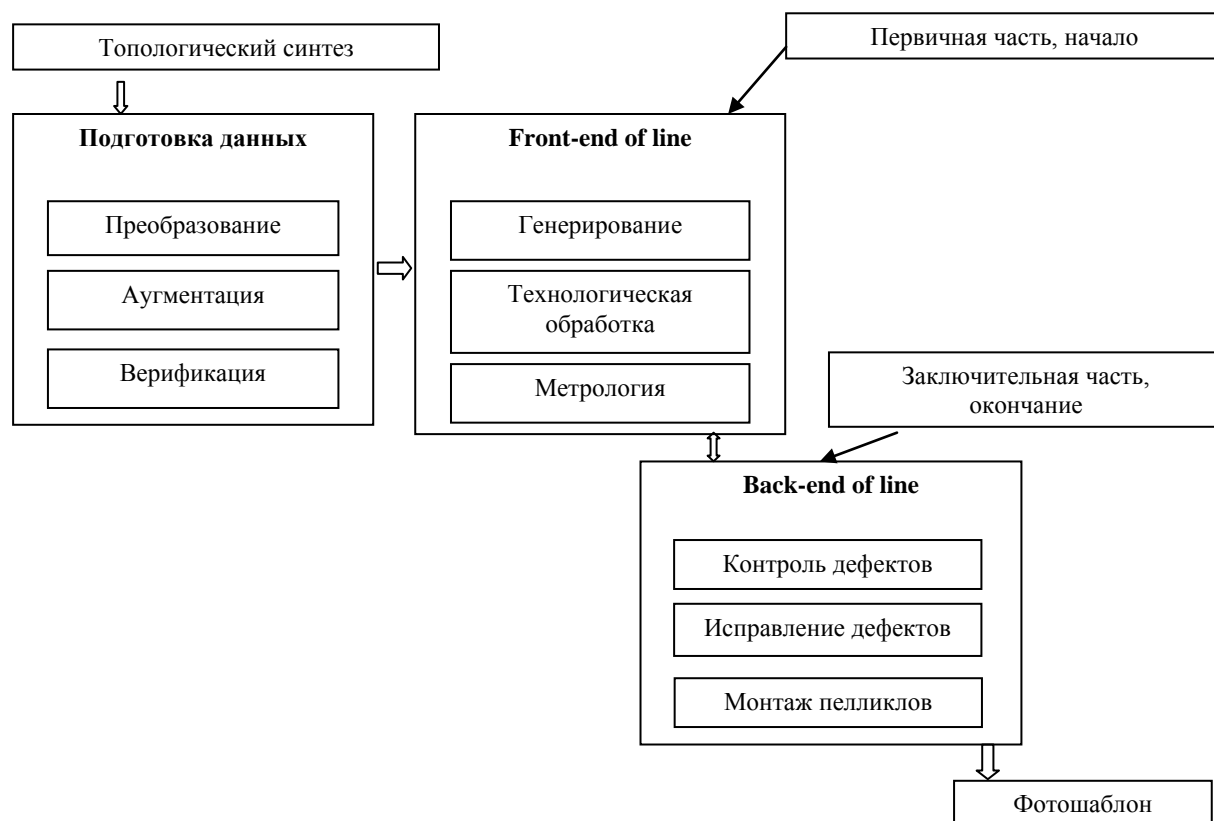


Рис. 3. Традиционная схема процесса изготовления оригиналов топологии на фотошаблонах

Операции контроля критических размеров и совмещаемости относятся к группе Front-end, так как используются при отработке технологии первичного формирования топологии и соответственно являются его составной частью.

К группе Back-end относятся процессы, связанные с заключительным формированием топологических структур и изделия в целом, – процессы автоматического контроля топологических структур на соответствие топологии, исправления дефектов топологических структур, финишной отмывки и нанесения пленочной защиты топологического рисунка.

Процесс исправления дефектов объединяет две технологии: технологию лазерно-стимулированного осаждения металлоорганического вещества из газообразной фазы, позволяющую исправлять прозрачные дефекты, а также технологию испарения участков металлизированного масочного покрытия при помощи короткоимпульсного лазерного излучения (с длительностью импульса от десятков наносекунд до сотен фемтосекунд), обеспечивающую исправление непрозрачных дефектов. Особенностью этих процессов является ухудшение

параметров стойкости исправляемых участков маски по сравнению с технологией генерирования изображений и, как следствие, уменьшение процента выхода годных, а также снижение надежности и долговечности фотошаблонов [7]. Наиболее существенными причинами этих негативных процессов являются:

- ухудшение адгезии маскирующего покрытия;
- увеличение толщины маскирующего покрытия, создающее локальные теневые зоны, которые повышают неравномерность освещенности при последующем проекционном переносе изображения с фотошаблона;
- рост вероятности появления так называемых мягких дефектов (soft defects), представляющих собой незафиксированные частицы маскирующего покрытия под пленочной защитой фотошаблона.

**Описание нового подхода.** Новый подход к организации производства оригиналов топологии полупроводниковых приборов на фотошаблонах основан на применении имитационных моделей процесса проекционного переноса топологических структур с фотошаблона на

полупроводниковую пластину. Данный подход позволяет определить степень влияния обнаруженного дефекта на технологический процесс проекционного переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину и существенно повысить процент выхода годных, что особенно важно при субстананометровых технологиях. Большая часть дефектов, обнаруживаемых на фотошаблонах, не прорабатывается на полупроводниковых пластинах, поэтому использование средств оперативного моделирования делает процесс изготовления фотошаблонов существенно более дешевым и надежным.

Оригинал топологии современной интегральной микросхемы, изготовленной по субстананометровой технологии, содержит сотни миллионов элементов топологии. Рисунок такой сложности изготавливается более чем за 1000 миллиардов вспышек, что даже при самой высокой надежности технологического процесса, которая может составлять  $10^{-10}$  операций на сбой, не оставляет сомнений в наличии дефектов, многие из которых могут оказаться критичными. С другой стороны, необходимость использования техники повышения разрешения делает фотошаблоны очень дорогими, что в случае наличия технологических проблем и соответственно при проценте выхода годных, ниже определенного порогового уровня, делает производственный процесс экономически нецелесообразным.

Предлагаемый подход основан на введении новой группы операций, обеспечивающих оперативное моделирование последующего процесса проекционного переноса изображений с фотошаблона на полупроводниковую пластину. Эти операции включают следующие действия:

- определение удельной плотности дефектов;
- вычисление расстояний между дефектами;
- пороговую обработку полученных значений с целью определения необходимости решения задачи моделирования;
- идентификацию типа контекстного изображения дефекта (структура типа «линия – промежутки» или типа «контактное окно») с соответствующим типом дефектов – 46 типов дефектов в соответствии с классификацией SEMI [8];
- моделирование процесса построения воздушного изображения проекционной оптиче-

ской системой установки совмещения и мультипликации при помощи соответствующей частной программы моделирования;

- моделирование процесса формирования скрытого изображения в фоторезисте.

Операция моделирования процесса построения воздушного изображения основана на моделировании процесса распространения волнового фронта от источника излучения через фотошаблон и объектив мультипликатора до плоскости изображения, расположенной на поверхности полупроводниковой пластины, покрытой тонким слоем фоторезиста. При этом используются специализированные программы, каждая из которых позволяет построить только ограниченный класс моделей, но при этом обладает существенно более высоким быстродействием.

Следующим этапом является моделирование процесса распространения изображения, построенного объективом мультипликатора, в фоторезисте. При этом решается объемная задача, причем глубина воздействия передаваемой энергии соответствует глубине резкости объектива и определяется по формуле

$$DoF = \frac{\lambda}{NA^2} k_2, \quad (2)$$

где  $DoF$  – глубина фокуса проекционной оптической системы;  $\lambda$  – длина волны экспонирующего излучения;  $NA$  – числовая апертура оптической системы;  $k_2$  – коэффициент, определяющий технологический уровень компонентов системы.

Оборудование для автоматического контроля топологии фотошаблонов очень дорогостоящее. Поэтому все процессы принятия решений оператором, а также все процедуры анализа дефектов топологии с участием человека выносятся за рамки режима реального времени и выполняются на специальных рабочих станциях, связанных с установкой автоматического контроля топологии каналом связи. В результате появляется необходимость реализации таких режимов работы, как:

- автоматический контроль топологии;
- предъявление дефектов оператору;
- анализ дефектов.

Режим автоматического контроля топологии фотошаблона предполагает обработку инфор-

мации в режиме реального времени. Темп обработки информации при этом может достигать десятков и сотен, а в ближайшей перспективе – сотен и тысяч мегабайт в секунду. Для решения задачи моделирования процесса фотолитографии при дальнейшем проекционном переносе изображения на полупроводниковую пластину производительность обработки может быть существенно меньше, так как моделирование необходимо производить только для тех участков топологии, которые уже признаны дефектными. Однако эти скорости будут достаточно высокими и потребуют, безусловно, обработки в реальном масштабе времени.

Режим предъявления дефектов оператору предполагает последовательный вывод изображений дефектов, обнаруженных в процессе автоматического контроля, оператору. При этом изображение дефекта в контексте топологии выводится на экран графического дисплея или микроскопа с большим увеличением. Оператор может наблюдать изображение как в проходящем, так и в отраженном свете. Обработка одного дефекта в этом режиме занимает в среднем 1–3 с, что позволяет выполнить более адекватное, чем в предыдущем случае, моделирование.

Режим анализа дефектов предполагает работу на автономной рабочей станции. При необходимости степень адекватности строящихся моделей может быть максимальной. В этом режиме не существует жестких требований к производительности моделирования. Требуемый темп обработки может задаваться оператором в зависимости от требуемой срочности решения задачи и требуемой точности моделирования. В этом режиме возможно достижение адекватности модели, близкой к 100 % [9].

В результате контроля топологии должна быть сформирована ведомость дефектов, содержащая как общую информацию о контролируемом объекте и настройках, при которых выполнялся контроль, так и частную информацию для каждого дефекта [8]. Кроме информации, представленной в ведомости дефектов, по каждому дефекту формируется файл с описанием топологии этого дефекта, содержащий полутоновую информацию о дефекте в контексте топологии. При этом каждый пиксел представляется однобайтным кодом. Размерность форми-

руемой модели является одним из параметров настройки системы распознавания дефектов.

В результате взаимодействия с системой моделирования определяются параметры «тип структуры» и «признак фотолитографической значимости дефекта». Параметр «тип структуры» указывает базовый тип структуры моделируемого участка топологии. При этом имеются два типа структур, различаемых при выполнении фотолитографии – одномерные структуры типа «линия – промежуток» и двумерные структуры типа «контактное окно».

Для настройки системы моделирования на конкретный тип установки совмещения и мультипликации используются следующие параметры оптической системы степпера и фоторезистивной маски:

- длина волны осветителя  $\lambda$ ;
- разрешение на структурах типа  $L/S$  (линия/промежуток);
- числовая апертура объектива  $NA$ ;
- глубина резкости объектива в режиме осевого  $\Delta Z$  и вне осевого  $\Delta Z$  в освещении;
- коэффициент когерентности  $\sigma$ ;
- тип фоторезиста;
- толщина маскирующего покрытия фоторезиста.

Результатом работы системы моделирования является параметр «фотолитографическая значимость дефекта». Он позволяет определить, проработается ли заданный топологический элемент (дефект) в процессе проекционного переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину.

## ВЫВОДЫ

Предложенный подход позволяет реализовать новую технологию изготовления оригиналов топологии интегральных схем на фотошаблонах, обеспечивающую возможность оперативной оценки фотолитографической значимости дефектов маски, обнаруженных в процессе контроля фотошаблонов на соответствие топологии, без выполнения операции проекционного переноса изображения с фотошаблона на полупроводниковую пластину. Это обеспечивает следующие преимущества:

- позволяет уменьшить количество операций исправления дефектов маски фотошаб-

лонов, за счет чего существенно повысить процент выхода годных и соответственно уменьшить стоимость процесса изготовления фотошаблонов;

- обеспечивает возможность детектирования групповых дефектов, каждый из которых не является критичным, но совокупность которых представляет собой критичный дефект;

- позволяет определять критичность дефектов структур OPC;

- обеспечивает возможность анализа процесса фотолитографии и определения оптимальных параметров окна технологического процесса.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Kwok, A.** Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography / A. Kwok, K. Wong // SPIE PRESS. – USA, 2001. – 213 p.
2. **Аваков, С. М.** Применение оборудования для автоматического контроля планарных структур в производстве оригиналов топологии интегральных схем на фотошаблонах / С. М. Аваков // Вестник БНТУ. – 2007. – № 6. – С. 64–70.
3. **Лазерная литография. Коррекция формы субмикронных элементов** / С. М. Аваков [и др.] // Электроника НТБ. – 2009. – № 8. – С. 82–85.
4. **Syed, A. Rizvi.** Handbook of Photomask Manufacturing Technology / A. Rizvi Syed // Taylor and Francis. – USA, 2005. – 862 p.
5. **Аваков, С. М.** Методы получения субпиксельного разрешения при автоматическом контроле оригиналов топологии интегральных схем / С. М. Аваков // Вестник БНТУ. – 2008. – № 1. – С. 44–49.
6. **Оптико-механические комплексы для бездефектного изготовления фотошаблонов 0,35 мкм и 90 нм** / С. М. Аваков [и др.] // Фотоника (приложение к журналу «Электроника НТБ»). – 2007. – № 6. – С. 35–39.
7. **Laser mask repair for advanced technologies** / A. Dinsdale [et al.] // VDE/VDI, GMM Fachbericht. – 2006. – № 49. – P. 247–262.
8. **Аваков, С. М.** Автоматический контроль топологии субмикронных планарных структур / С. М. Аваков. – Минск: ФУАинформ, 2007. – 168 с.
9. **Guo, E.** Simulation Based Mask Defect Printability Verification and Disposition, Part II / E. Guo, I. Shi, B. Gao // SPIE. – 2011. – Vol. 8166. – P. 21–28.

Поступила 05.03.2013