

УДК 621.382.8.049.77+681.5.017

АЛГОРИТМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОПТИЧЕСКОЙ ЛИТОГРАФИИ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ ТОПОЛОГИЙ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ МИКРОДИСПЛЕЕВ

С.Н. КУХАРЕНКО, С.В. ВОЛК, А.М. ЗАЯЦ, А.Г. СМИРНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь,**Поступила в редакцию 5 мая 2006*

Представлен алгоритм численного моделирования процесса литографии, применяющегося при производстве интегральных схем (ИС) микродисплеев. Он основан на использовании метода интегрирования по источнику для вычисления изображения, получающегося на подложке. Затем описан метод верификации топологий, использующий результаты такого численного моделирования. Предложенный метод верификации учитывает отклонения контуров изготовленных элементов от контуров, предсказанных моделью вследствие колебания параметров литографии, что позволяет значительно повысить качество верификации.

Ключевые слова: численное моделирование, изготовление СБИС, оптическая литография, верификация топологий.

Введение

Непрерывное уменьшение размеров микродисплеев и усложнение их функций приводит к тому, что для управления ими требуются все более сложные и миниатюрные микросхемы. В то же время размеры рабочих элементов самих микродисплеев также становятся все меньше, что усложняет их производство. Более того, на сегодняшний день скорость уменьшения размеров элементов сверхбольших интегральных схем (СБИС) значительно превышает темпы внедрения в производство новых технологических процессов, использующих излучение с меньшей длиной волны. В результате сложилась ситуация, когда производители СБИС вынуждены работать в так называемой субволновой области. Такая ситуация создает ряд проблем и самая главная из них — это отклонение контуров изготовленных элементов на подложке от идеальной формы. Контурные топологии маски и контурные напечатанных элементов больше не соответствуют друг другу, и поэтому методы разработки топологий и их верификации нуждаются в коренном пересмотре.

Данная статья представляет алгоритм для численного моделирования контуров, производимых методом оптической литографии, а также описывает применение этого метода к верификации топологий СБИС.

Алгоритм численного моделирования оптической литографии

При производстве современных микросхем СБИС посредством оптической субмикронной литографии действует целый ряд факторов, приводящих к искажениям формы топологических элементов на подложке: оптические факторы, процессы травления, особенности процессов легирования и имплантации [1, 2]. Основным фактором, вызывающим искажения, при исполь-

зовании субмикронной литографии, являются погрешности, вносимые оптической системой из-за конечных размеров диафрагмы проекционной системы и, как следствие, ограниченной разрешающей способности оптической системы в целом [3]. В первом приближении достаточно учесть только оптические факторы [2, 4], поэтому далее мы будем рассматривать только алгоритм расчета оптического изображения, формируемого проекционной оптической системой на поверхности фоторезиста.

В данном случае наиболее подходящим методом расчетов является использование математической модели из специального раздела оптики — Фурье-оптики [5, 6]. Особенность современной оптической фотолитографии — частично-когерентное освещение фотошаблона [2, 3], что отражено в алгоритме, описанном ниже.

Схема оптической системы установки для производства микросхем приведена на рис. 1:

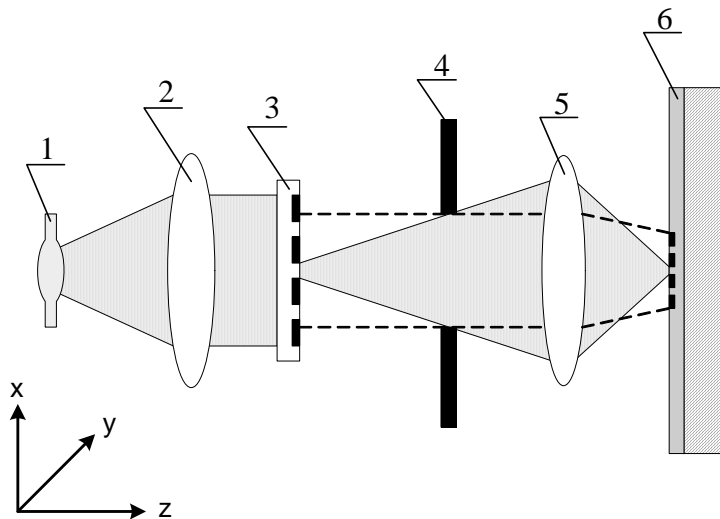


Рис. 1. Схема оптической системы: 1 — источник освещения, описывается функцией $S(x,y)$; 2 — линза-конденсор; 3 — фотошаблон, описывается функцией $O(x,y)$; 4 — диафрагма, описывается функцией $P(f,g)$; 5 — проекционная оптическая система; 6 — фоторезист на подложке, распределение интенсивности света на поверхности фоторезиста описывается функцией $I(x,y)$

Математическая модель оптической системы состоит из следующих элементов (далее x и y обозначают канонические пространственные координаты [3, 6], f и g — частотные координаты):

1. Источник освещения, который описывается двумерной вещественной функцией распределения яркости $S(x,y)$.

2. Фотошаблон, который описывается двумерной комплексной функцией пропускания $O(x,y)$. Функция пропускания характеризует амплитуду и фазу световых колебаний плоской волны в каждой точке непосредственно за плоскостью фотошаблона.

3. Диафрагма проекционной оптической системы при моделировании представляется комплексной функцией $P(f,g)$, которая описывает действие диафрагмы на спектр проходящей волны. С точки зрения

фурье-оптики, диафрагма осуществляет фильтрацию высокочастотных составляющих оптического изображения в спектре частот изображения [5, 6].

4. Физические параметры, описывающие литографическую установку: длина волны используемого излучения, численная апертура линз проекционной системы (NA), aberrации и др.

Алгоритм для расчета распределения интенсивности света $I(x,y)$ на поверхности фоторезиста базируется на методе интегрирования по источнику [6] и состоит из следующих шагов:

1. Расчет спектра пространственных волн в плоскости перед диафрагмой. Это делается при помощи аналитических формул, позволяющих вычислить комплексную матрицу $U(f,g)$, описывающую спектр изображения фотошаблона, на основании координат точек и углов при вершинах входных многоугольников, задающих функцию $O(x,y)$.

2. Расчет спектра пространственных волн в плоскости после диафрагмы. Этот шаг делается домножением матрицы спектра $U(f,g)$, полученного на первом этапе, на функцию $P(f,g)$, смещенную с учетом текущей рассчитываемой точки источника света.

3. Получение когерентного изображения обратным преобразованием фурье-матрицы, полученной на шаге 2. При расчетах на компьютере целесообразно воспользоваться алгоритмом быстрого преобразования Фурье (БПФ) [6].

4. Суммирование амплитуд комплексных изображений от отдельных точек источника освещения, получаемых повторением шагов 2–3, с весами, получаемыми на основании функ-

ции распределения яркости S , для получения распределения интенсивности света $I(x,y)$ на поверхности фоторезиста при частично-когерентном освещении.

Результат работы алгоритма — матрица вещественных чисел, описывающая распределение интенсивности света $I(x,y)$, может быть визуализирована, либо передана на вход какой-либо математической модели, позволяющей вычислить форму контуров наложке. Эти контуры могут быть выведены на экран САПР, а также использованы для верификации топологии.

Верификация топологий с использованием результатов моделирования

Численные методы моделирования литографии могут значительно усилить традиционные подходы к верификации топологий. Традиционные методы верификации основаны на проверке правил дизайна (DRC – design rules checking), которым должна удовлетворять топология. Эти правила выражены в геометрических терминах и применяются к фигурам, из которых состоит топология. Однако эти методы дают ответ только на уровне "да-нет" и не принимают во внимание изменения параметров технологического процесса и связанные с этим искажения контуров.

Нами разрабатывается метод, который мог бы дополнить традиционный метод проверки правил дизайна, устранив его главный недостаток – традиционный метод не может адекватно учесть искажения контуров, возникающие после изготовления с помощью технологии субмикронной литографии [4].

Идея метода заключается в замене правил DRC, опирающихся только на элементы топологии, гораздо более простыми правилами, но которые учитывают контуры элементов после изготовления. Эти контуры строятся при помощи численной модели литографии, описанной выше, на вход которой передаются параметры оптической системы и топология маски.

Верификация происходит путем формирования набора правил, которым должны удовлетворять смоделированные контуры, чтобы топология функционировала правильно. Например, среди них есть правило отсутствия замыканий соседних контуров и правило минимального допустимого расстояния между контурами. Затем для проверки каждого правила составляем алгоритм, выполняющий последовательность элементарных геометрических операций (пересечение, объединение, вычисление расстояния, увеличение и уменьшение размеров и т.д.). В результате работы алгоритм отмечает специальными маркерами те места на топологии, где соответствующее правило оказалось нарушенным (см. рис. 2). Такой метод называют методом проверки правил изготовления (MRC — manufacturing rules checking). Похожий подход описан в работе [7].

Однако здесь возникает проблема – алгоритм моделирования позволяет получить контуры будущих элементов только для одного набора входных параметров. Например, одним из основных параметров, влияющих на форму контуров после изготовления, является резкость литографической системы. Однако при изготовлении СБИС значение резкости может колебаться вокруг центрального значения. Иными словами, вместо точного значения резкости нам известен некоторый закон ее распределения. Но при использовании алгоритма моделирования на его вход передаются конкретные значения резкости. Поэтому один и тот же участок топологии приходится проверять несколько раз, меняя параметры моделирования. А поскольку выполнение моделирования занимает очень много времени, то многократные проверки оказываются слишком затратными. Возникает необходимость изменить метод MRC так, чтобы он учитывал эти отклонения технологических параметров, и при этом сводил повторное моделирование к минимуму.

Предлагаемый метод пытается избежать дополнительных циклов моделирования и старается извлечь как можно большее количество информации из каждого запуска модели. Это достигается путем определения максимальных ожидаемых искажений изготовленных контуров с определенной вероятностью и применения правил MRC к этим максимально искаженным контурам. Если и в этом случае никаких ошибок не обнаружено, это значит, что проект устойчив к изменениям технологических параметров с выбранной вероятностью.

Все виды искажений изготовленных контуров можно разделить на два типа – систематические и случайные. Искажения первого типа возникают вследствие отклонения параметров процессов изготовления СБИС от номинальных значений. Такие отклонения систематическим образом влияют на всю площадь СБИС. Кроме них на форму контуров оказывают влияние еще и случайные факторы. Искажения обоих типов возникают независимо и описываются некоторыми функциями распределения, которые характеризуют конкретную линию производства СБИС. Таким образом, глядя на результаты моделирования, мы не можем гарантировать, что контуры после изготовления будут иметь именно такую форму и расположение, но при этом нам нужно выполнить верификацию топологии. Для этого попытаемся учесть вероятностную составляющую в самих правилах MRC.

Проиллюстрируем наш подход на примере такого искажения как "отклонение размера контура от номинального". Его можно выразить в виде суммы систематических и случайных отклонений:

$$\Delta X = R_X + S_X,$$

где S_X — систематическое отклонение, а R_X — случайное. Эти отклонения возникают независимо.

Систематические отклонения возникают вследствие отклонения резкости или времени экспозиции от оптимальных значений. Зависимости эти в общем случае нелинейные и в неявном виде устанавливаются алгоритмом моделирования, но мы можем аппроксимировать их. Для этого на вход алгоритма моделирования подадим контрольную топологию, состоящую из одного большого квадрата. Поскольку на изображение элемента оказывают влияние только соседние элементы, которые расположены не далее пяти длин волн [8], то длину стороны квадрата возьмем не менее десяти длин волн. Теперь выполним моделирование с несколькими различными значениями резкости и измерим приращения положения контура точно посередине стороны квадрата. Мы будем рассматривать далее случай отклонения резкости, поэтому в результате получим зависимость вида $S_X = F(D)$, где S_X — систематическое отклонение положения контура, а D – резкость.

Поскольку нам известны закон распределения резкости и закон распределения случайных отклонений контура, а зависимость систематического отклонения от резкости мы вывели, то мы можем найти закон распределения общего отклонения путем композиции. Обычно оба исходных закона являются нормальными вида $N(m_D, \sigma_D)$ и $N(m_R, \sigma_R)$. Если при этом S_X аппроксимирована линейно как $S_X = aD + b$, то результирующая композиция будет тоже нормальным законом распределения вида

$$N(am_D + m_R + b, \sqrt{(a\sigma_D)^2 + \sigma_R^2}).$$

Зная закон распределения общего отклонения, мы можем определить коридор $[x_a, x_b]$, в котором будет лежать контур с заранее заданной вероятностью (например, 90%, 95% и 99%).

Теперь нам нужно смоделировать интересующую нас топологию, используя при этом номинальное значение резкости (т.е. $D = m_D$). Далее проверку правил MRC выполняем не один раз, а дважды – один раз увеличив смоделированные контуры на x_b , а второй раз – уменьшив на x_a . В результате мы можем обнаружить дефекты, которые не происходят при оптимальном зна-

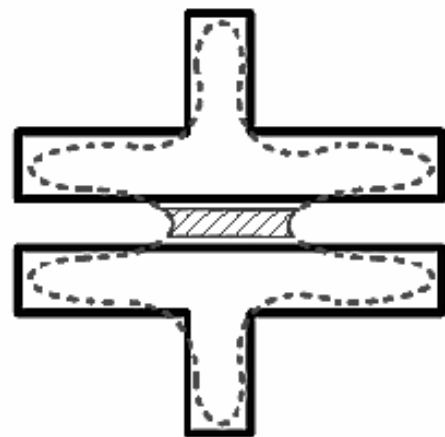


Рис. 2. Результат проверки правила "закрывание". Заштрихованный маркер ошибки обозначает место, где между двумя независимыми элементами образовалась перемычка. Сплошными линиями показаны элементы топологии, пунктирными линиями показаны смоделированные контуры

чении резкости и отсутствии случайных искажений, но вероятны в реальных условиях (см. рис. 3).

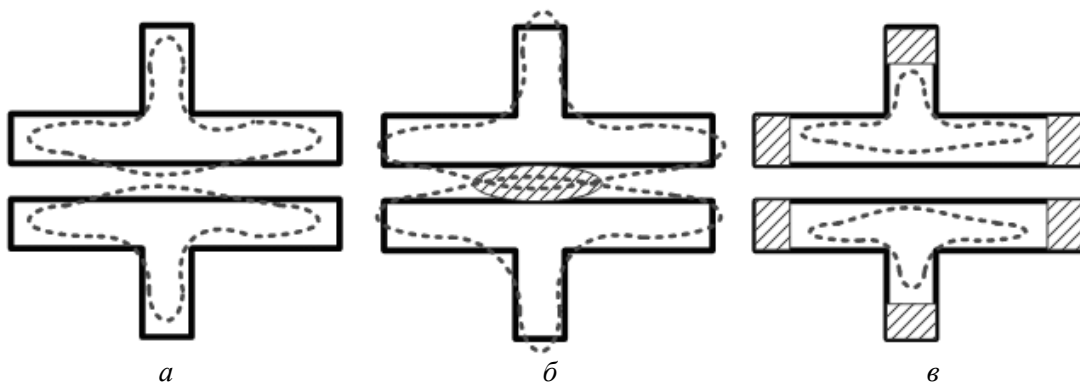


Рис. 3. Изменение размеров смоделированных контуров позволяет обнаружить скрытые ошибки проектирования: а) на исходных контурах ошибок нет; б) на увеличенных контурах обнаружено замыкание; в) на уменьшенных контурах обнаружено слишком большое укорачивание элементов. Сплошными линиями показаны элементы топологии, пунктирными линиями показаны смоделированные контуры, заштрихованные области обозначают маркеры ошибок

Если на топологии не появляются новые ошибки даже после увеличения и уменьшения контуров, это значит, что проект устойчив к искажениям данного типа с выбранной вероятностью. Очевидно, что чем ближе к 100% выбирается это значение, тем шире коридор $[x_a, x_b]$ и тем более консервативным должен быть проект.

Однако, даже проделав все эти действия, мы не можем гарантировать, что найдем все дефекты изготовления, поскольку разные участки топологии имеют разную чувствительность к изменению резкости. Мы можем влиять на чувствительность предложенного метода, путем выбора контрольной фигуры и мест для замера отклонения. Например, если мы будем измерять отклонения не на серединах сторон квадрата, а вдоль биссектрис его углов, то коридор получится шире, а значит, мы получим больше мест, где возможны нарушения при изготовлении. Поэтому перед использованием этого метода необходима его калибровка.

Изложенный метод также позволяет находить места с повышенной чувствительностью к изменению резкости. Для этого нам нужно сравнить контуры, полученные по вышеописанной схеме и контуры, полученные при непосредственном моделировании с параметром резкости, отличным от оптимального. Чем большее получилось несоответствие, тем выше чувствительность по отношению к ожидаемой средней величине чувствительности.

В завершение отметим, что описанный метод можно применять для учета влияния не только резкости, но и других параметров технологического процесса, например для величины экспозиции.

Заключение

В этой статье были описаны два основных элемента для реализации нового подхода к верификации топологий СБИС: алгоритм для численного моделирования литографических процессов и метод для верификации топологий с использованием полученных моделей. Применение этого подхода позволяет значительно улучшить качество верификации топологий, поскольку он учитывает различия между формами элементов маски и изготовленными контурами на подложке. В свою очередь, это позволяет изготавливать более сложные и миниатюрные микродисплеи с меньшими потерями при производстве.

A NUMERIC ALGORITHM OF OPTICAL LITHOGRAPHY MODELING AND ITS APPLICATION FOR LCOS LAYOUT PHYSICAL VERIFICATION

S.N. KOUKHARENKO, S.V. VOLK, A.M. ZAYATS, A.G. SMIRNOV

Abstract

An advanced approach to LCOS IC layout verification is presented. It is based on involving of results of optical lithography computational models into a verification process. The first section describes an algorithm for numerical modeling of optical lithography that uses a source integration method for computation of an aerial image. The second section dwells on an application of this algorithm for layout physical verification. A proposed physical verification method uses modeled contours of manufactured elements to check whether a given layout will be manufacturable. The proposed verification method also considers deviations of manufactured contours from their modeled shapes due to variation of manufacturing parameters to further improve verification quality. At the same time, the method is conservative in use of a time-consuming lithographical modeling.

Литература

1. *Clein D., Shimokura G.* CMOS IC Layout: Concepts, Methodologies and Tools. Elsevier Science & Technology Books, 2000.
2. *Levinson H.* Principles of lithography. SPIE Press, 2001.
3. *Wong A.* Resolution Enhancement Techniques in optical lithography. SPIE Press, 2001.
4. Handbook of Microlithography / P. Rai-Choudhury, editor. SPIE Press, 1997.
5. *Born M., Wolf E.* Principles of Optics: Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light. Cambridge University Press, 1997.
6. *Goodman J.* Introduction To Fourier Optics. McGraw-Hill, 1996
7. *Sahouria E., Granik Y., Cobb N., Toublan O.* // Technical proceedings of the 2000 International Conference on Modeling and Simulation of Microsystems. 2000. Ch. 2. P. 32–35.
8. *Wong A.* Resolution Enhancement Techniques in optical lithography. SPIE Press, 2001.