Разбиение изображений с использованием оптической инвариантности

Е.Е. Егоров

В данной работе рассматривается проблема построения симулятора оптических процессов при производстве микросхем методом фотолитографии. Используя регулярность и дискретность функции пропускания маски, а также предполагая линейность и пространственную инвариантность оптической передаточной функции, предлагается схема построения быстрого табличного симулятора.

Размеры мельчайших деталей интегральных микросхем постоянно уменьшаются. Из-за этого возникают разного рода ограничения и трудности в процессе изготовления микросхем, в частности, на этапе фотолитографии. Процесс фотолитографии включает в себя освещение участков кремниевой подложки, покрытой фоточувствительным слоем, далее следует химическая обработка этого слоя, иначе называемого фоторезистом, с целью защиты определенных участков поверхности кремния от растворения. Таким образом в слое кремния формируются впадины и выпуклости, составляющие собственно требуемую полупроводниковую структуру.

В фотолитографическом аппарате имеется так называемая маска с изображением одного из слоев изготавливаемой микросхемы. Маска — это пластинка из прозрачного стекла, покрытого на отдельных участках каким-либо непрозрачным материалом, например слоем хрома. Маска помещается между источником света и линзой. Свет от источника проходит через прозрачные участки маски и фокусируется линзой на слой фоторезиста. Таким образом картина прозрачных участков на маске переносится в картину уровня распределения интенсивности света на фоторезисте.

Если размеры мелких деталей изображения велики по сравнению с длиной волны света, испускаемого источником, перенесенное на резист изображение вполне подобно изображению на маске. Однако на современном уровне развития фотолитографии характерный минимальный размер деталей составляет 0.16 и даже 0.13 микрон, при длине волны 0.248 микрон. При прохождении света через такую маску появляются сильные дифракционные искажения картины на фоторезисте. Происходит скругление углов, изменение толщины линий, склеивание и даже полное исчезновение деталей.

Для решения проблемы разрабатывается техника коррекции маски, известная как *optical proximity correction* (OPC). Вместо маски с изображением M находят маску со скорректированным изображением M', таким, чтобы в результате литографического процесса на резисте образовалось изображение, возможно близкое к M. Алгоритм коррекции получает цифровое представление маски M и генерирует представление маски M', которая затем поступает на вход литографического аппарата.

Закодированная маска занимает огромный обьем памяти компьютера. Состоящие из сотен миллионов транзисторов, многослойные современные интегральные схемы изображаются, соответственно, сотнями миллионов прямоугольников. Выручает здесь то обстоятельство, что маска устроена достаточно регулярно, то есть, расстояния между прямоугольниками и размеры прямоугольников кратны некоторому типичному расстоянию, шагу сетки дизайна, и к тому же, на маске расставлено большое количество копий одинаковых, «библиотечных» фрагментов, соответствующих логическим функциональным элементам. Иерархическое описание маски позволяет значительно сократить ее закодированное представление.

Работа с иерархическим представлением обьектов требует специальных алгоритмов. Даже простое перечисление прямоугольников, из которых состоит маска, уже является довольно дорогостоящей операцией. Поэтому даже квадратичные по числу прямоугольников алгоритмы обработки маски являются совершенно неприемлемыми. Лучшие из программ коррекции затрачивают на обработку дизайна микросхемы средней величины десятки часов работы современных рабочих станций.

Один из подходов к построению алгоритма оптической коррекции описан в статье [1]. Используя пространственную инвариантность и ограниченность пространственного влияния оптической передаточной функции интенсивности, коррекция большой маски сводится к коррекции малых участков.

Алгоритм же коррекции малых участков маски можно построить, располагая программным симулятором дифракционных оптических процессов, определив функцию близости изображений и минимизируя ее итерационной процедурой. На каждом шаге определенным образом деформируя изображение маски, вычисляем с помощью симулятора изображение на резисте, вычисляем близость изображений, двигаемся в сторону убывания функции близости пока не получим приемлемое решение.

Здесь же мы покажем, как можно построить симулятор дифракционных процессов, основанный также на свойстве пространственной инвариантности и ограниченности пространственного влияния функции преобразования изображения на маске в распределение электрического поля на поверхности фоторезиста.

Итак, нас интересует дифракционное распределение интенсивности света в слое резиста. Это распределение будет несколько иным в глубине резиста, но пока для простоты ограничимся изучением интенсивности на поверхности. Отложим также и рассмотрение других физических процессов, вроде диффузии, внутренних отражений в слое резиста, и т.д., дополнительно влияющих на формирование изображения.

Экспериментально проверено, точнее, установка фотолитографии разработана и изготовлена так, что в нашей ситуации вполне подходит модель с некогерентным источником конечных размеров и оптической системой с линейной функцией отклика. Известно, см. [2], что в этом случае интенсивность света в плоскости изображения можно с достаточной точностью вычислить так:

$$I(Y, M) = \int |E(S, Y, M)|^2 \; dX.$$

Здесь X обозначает вектор координат в плоскости маски, Y — координаты в плоскости резиста, $M = M(X)$ — функция пропускания маски. Поле $E(S, Y)$ от точечного источника s вычисляется так:

$$E(S, Y, M) = \iint M(X) e^{i(XZ)} H(Z, S) e^{-i(XY)}\, dX\, dZ,$$

где функция $H(Z, S)$ является функцией от $(Z - S)^2$, то есть имеет вид $H(R)$, $R = (Z - S, Z - S)$.

Можно рассматривать этот интеграл как функционал $K_s : M(X) \mapsto E(Y)$, преобразующий функции пропускания в функции распределения полей. Очевидно, что функционал этот линейный.

Утверждение 1. $K_s(\lambda M_1 + \mu M_2) = \lambda K_s(M_1) + \mu K_s(M_2)$.

Покажем, что K_s обладает также свойствами пространственной инвариантности. Пусть g — движение плоскости, представленное в виде суммы ортогонального оператора и параллельного переноса $g(X) = \tilde{g}X + D$ и пусть также $K_s(M(X)) = E(S, Y)$, вычислим $K_s(gM)$.

Таким образом, справедливо

Утверждение 2. $E(S, Y, gM) = E(\tilde{g}^{-1}S, gY, M)$.

Предположим, что функция пропускания $M(X)$ является дискретной функцией, то есть принимает только конечное число значений. Это предположение согласуется с практикой, можно даже ограничиться случаем, когда значений всего два — 0 и 1. Все рассуждения легко модернизировать при наличии большего числа значений $M(X)$. Вместо задания функции $M(X)$ маску можно задавать описанием множеств $M^{-1}(1)$.

Говоря о регулярности маски, точнее ее функции пропускания, ограничимся следующим определением.

Определение 1. $M(X) = \sum\limits_i (g_i A_{j_i}(X))$ — сумма сдвинутых копий атомарных масок-примитивов. Здесь $A_j(X)$ — функция пропускания j-го примитива, равная 1, если X лежит внутри примитива, и 0 в противном случае.

Например, маска, состоящая из прямоугольников с целочисленными координатами и со сторонами, параллельными осям координат, всегда представима в виде такой суммы, причем с единственным атомарным примитивом $E = \{(x_1, x_2) \mid 0 \leqslant x_1 \leqslant 1,\ 0 \leqslant x_2 \leqslant 1\}$. Конечно, число примитивов можно и увеличить, чтобы количество слагаемых в сумме было меньше. Но и обьявлять примитивами все прямоугольники, как будет видно из дальнейшего, тоже не выгодно, надо исходить из располагаемого количества памяти.

Итак, для регулярной маски схема вычисления полей получается такой:

1. Заранее вычисляем и храним в памяти значения $E_s(A_j) = K_s(A_j)$. Каждая такая величина есть комплексное число, равное полю в точке начала координат, создаваемому s-м точечным источником, облучающим j-й атомарный примитив.

Важно то, что количество памяти, требуемое для хранения всех этих полей, можно ограничить, пренебрегая полями на больших расстояниях от примитива. Свойство уменьшения величины полей от далеких примитивов называется ограниченностью пространственного влияния.

2. Поле в некоторой точке плоскости резиста вычисляем, пользуясь фомулами из Утверждений 1 и 2, складывая заранее вычисленные поля от конечного числа точечных источников и атомарных масок.

$$E(S, Y, M) = E(S, Y, \sum_i g_i A_{j_i}) = \sum_i E(S, Y, g_i M_{j_i}) = \\ = \sum_i E(\tilde{g}^{-1} S, gY, M_{j_i}).$$

3. Для нахождения интенсивности интегрирование заменяем суммированием по точечным источникам.

Работа выполнена при поддержке LSI Logic corp. Автор благодарит профессора С.В. Алешина, под руководством которого выполнена работа, и доктора Р. Степановича за ценные советы и внимание к работе.

Список литературы

[1] Егоров Е.Е. Кластеризация на графах и задача оптической коррекции // Интеллектуальные системы. Т. 7. Вып. 1–4. 2002–2003. С. 55–61.

[2] Махвиладзе Т.М., Медведева М.Г., Валиев К.А. и др. Modeling and Simulation of the contemporary photolithography processes // Труды ФТИАН. 1996. Т. 11.