

Компьютерная реконструкция рельефа поверхности с интерполяцией функции глубины методом обращения свертки

© 2012 г. *Н.С. Будников¹, В.Е. Котомина¹, Т.В. Шаргавнина²*

¹ Научно-исследовательский физико-технический институт Нижегородского Государственного университета им. Н.И. Лобачевского (НИФТИ ННГУ)

² Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
homotania@yandex.ru

Предложен метод определения микрорельефа поверхности методами компьютерной реконструкции по данным оптической микроскопии. Метод основан на построении морфометрической карты профиля глубины по набору частично сфокусированных изображений с последующей интерполяцией функции глубины методом обращения свертки. Рассмотрены методы определения аппаратной функции оптического микроскопа.

Ключевые слова: оптическая микроскопия, компьютерная томография.

Задача измерения и визуализации микрорельефа поверхности является актуальной для различных областей науки, промышленности и техники. В частности, решение проблемы построения топологической карты поверхности микронной маски важно для контроля процесса фотолитографии при производстве полупроводниковых интегральных схем. Задача измерения микрорельефа решается сейчас разными методами. Большая часть методов анализа рельефа (растровая, атомно-силовая и зондовая микроскопия) хорошо работает только в случае мезоскопически плоских поверхностей. В случае сложного субмиллиметрового мезорельефа определение характеристик микроскопической (микронной) шероховатости весьма проблематична и требует специального оборудования и разработки отдельных методик. В работе предложен компьютерный метод реконструкции профиля глубины шероховатостей по набору частично сфокусированных изображений. Метод основан на построении морфометрической карты профиля с последующей интерполяцией функции глубины методом обращения свертки. Предложенный способ позволяет осуществлять реконструкцию рельефа по ограниченному набору исходных изображений в тех случаях, когда размеры шероховатостей поверхности не ниже дифракционного предела ~ 0.3 мкм.

Применение метода автоматически решает также задачу увеличения глубины резкости оптической системы микроскопа, что является актуальным при необходимости использования больших коэффициентов увеличения ~ 1000 .

Особенность метода оптической микроскопии состоит в том, что полученные изображения, как правило, являются нечеткими и содержат сфокусированные и расфокусированные участки. Это связано с тем, что из-за ограниченной глубины резкости оптической системы четкими оказываются только те участки поверхности, которые имеют диапазон высот рельефа, совпадающий с глубиной фокуса объектива микроскопа.

Для построения профиля глубины мы использовали следующий подход:

1) создается набор фотографий с различными известными фокусными расстояниями объектива микроскопа (рис.1,а);

2) на выбранной линии по вертикали строится зависимость значений степени резкости изображений от положения фокуса (рис.1,б);

3) для определения изображения, которому принадлежит точка профиля, а, следовательно, и её высота, выбирается самое большое значение резкости из всего множества значений, принадлежащих этой линии;

4) по фиксированному расстоянию по высоте между изображениями строится морфометрическая карта профиля глубины, которая показывает на какой высоте располагаются точки профиля глубины, принадлежащие конкретным изображениям (рис.1,в) (дискретность функции глубины равна количеству исходных изображений);

5) каждой точке карты присваивается значение, связанное с яркостью точки соответствующего изображения. Таким образом, для каждой точки линии профиля высоты получается искомый профиль (рис.1,г).

Для оценки степени резкости используется градиентный метод.

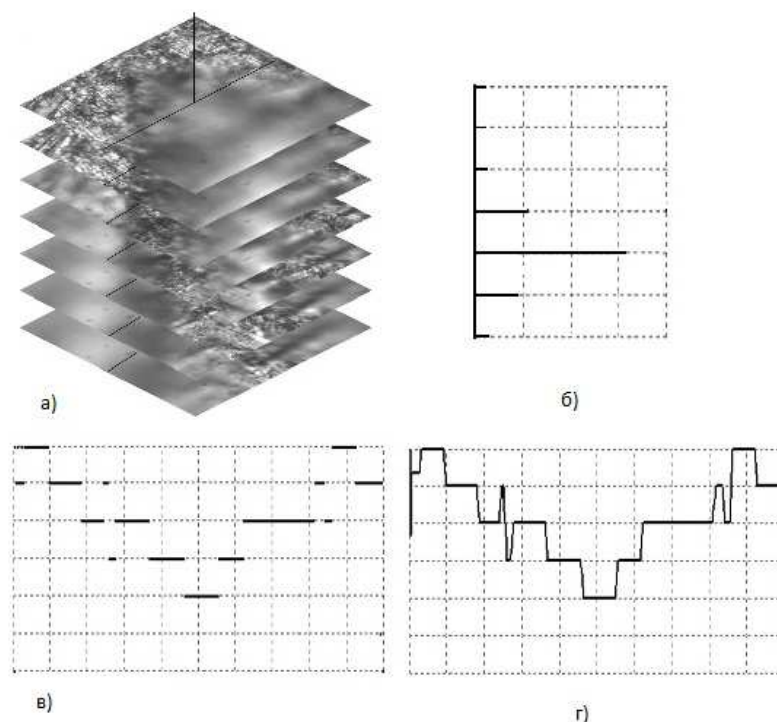


Рис. 1. Схема построения профиля глубины: а) – исходные данные (набор фотографий с различными положениями фокуса), б) - график резкости вдоль линии, в) – морфометрическая карта профиля глубины, г) – профиль глубины.

Правильность работы предложенного алгоритма подтверждено сравнением результатов восстановления с данными прямого экспериментального измерения профиля поверхности на растровом электронном микроскопе и методом зондовой микроскопии.

Описанный выше подход хорошо работает в том случае, когда имеется возможность получить достаточное количество исходных изображений с незначительной погрешностью фиксации положения фокуса оптической системы. На практике, однако, число исходных изображений поверхности часто ограничено тем, что для поверхностей с микронным размером шероховатости невозможно получить более 4-5 изображений сфокусированных на разных высотах профиля. В настоящей работе предлагается уточнять глубину расположения той или иной точки поверхности (проводить интерполяцию между сфокусированным изображением и ближайшим расфокусированным) с помощью операции обращения свертки [1].

Для реализации этого подхода необходимо предварительно промерить аппаратную функцию микроскопа, которая описывает распределение освещенности в создаваемом оптической системой изображении малого (точечного) источника излучения. Аппаратная функция $h(x, y, z)$ зависит от координат x, y на плоскости изображения и величины смещения фокуса по высоте z . Для измерения $h(x, y, z)$ используется тестовый образец с ровной поверхностью, содержащей малые неглубокие дефекты.

Другим методом определения аппаратной функции микроскопа является подбор ее параметров с использованием такой априорной информации как сферическая симметрия функции рассеяния точки и физических принципов расфокусировки. Производится свертка сфокусированного изображения с функцией, представляющей собой взвешенную сумму гауссовых куполов. Далее производится сравнение полученной модели расфокусированного изображения с дефокусированным снимком. При проведении анализа результатов свертки, т.е. при принятии решения о соответствии модели изображения с настоящим изображением используется корреляционный анализ [2]. Таким образом, можно подобрать параметры аппаратной функции для набора фотографий с различными известными фокусными расстояниями объектива микроскопа.

Разработанный метод реконструкции профиля был реализован в системе контроля качества обработки поверхностей для микроскопа LeicaDM4000 с программным обеспечением ImageScore.

Список литературы

1. Бейтс Р., Мак-Доннелл М. Восстановление и реконструкция изображений. М.: Мир, 1989. 540 с.
2. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных. М.: Мир, 1989. 560с.