

ИЗМЕРЕНИЕ РЕЛЬЕФА ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ОПТИЧЕСКОГО МИКРОСКОПА

Новый подход к проблеме реконструкции трехмерного рельефа поверхности лишен недостатков традиционных методов на основе оптических приборов. Проблема рассматривается как задача распознавания образов, решаемая с помощью морфологических методов анализа изображений. Используя предложенный принцип, можно построить измерительный прибор на основе оптического микроскопа для применения его в микроэлектронике с целью измерения трехмерного рельефа поверхности микросхем. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №05-01-00615-а.

Способы реконструкции трехмерного рельефа поверхности с помощью снимков, сделанных при различных положениях фокуса оптического микроскопа, широко исследуются в последние десятилетия. Так называемые активные методы реконструкции рельефа поверхности [1] базируются в основном на том, что изображение какой-либо части поля зрения обладает наибольшей четкостью, когда она находится "в фокусе". В связи с этим для определения "сфокусированности" части изображения используются методы пирамид [2] и Фурье-анализа. Строится характеристика "сфокусированности" и решается задача на поиск ее максимума. Основанный на этом принципе прибор позволяет обрабатывать видеоизображение со скоростью 20 кадр/с и за несколько секунд построить трехмерную сцену [1].

Однако при ответе на вопрос о погрешности такого прибора эксперименты могут показать только среднее отклонение найденного рельефа от реального и не указывают, чему равна погрешность определения рельефа поверхности в конкретной точке. Следовательно, такой прибор нельзя считать измерительным.

Автором предложен другой подход к проблеме реконструкции рельефа поверхности, позволяющий свести задачу определения его высоты к задаче распознавания образа так называемой кривой дисперсий, которая решается с применением морфологических методов.

МОДЕЛЬ ИЗОБРАЖЕНИЯ ОБЪЕКТА

Предположим, что в микроскопе наблюдается рельефный объект, отражающий падающий через объектив некогерентный свет [3]. Рельеф не обладает взаимными перекрытиями. В работе [4] показано, что хорошей характеристикой сфокусированности области объекта с центром в некоторой точке (x_0, y_0) является дисперсия яркости изображения этой области как функция от смещения этой области в вертикальной плоскости относительно фокальной плоскости

* Унимодальная функция имеет один локальный и глобальный максимум (моду).



А.Захарченко

микроскопа (z) . (Дисперсия яркости изображения в некоторой области – это сумма квадратов отклонений яркости изображения от ее среднего значения в этой области.) Если область объекта обладает текстурой (т.е. яркость в области отлична от константы), то дисперсия яркости изображения в этой области – унимодальная функция* (z) с максимумом при расположении области в фокусе (z_0) . Таким образом, задача реконструкции трехмерного рельефа поверхности сводится к определению максимума дисперсии в каждой точке рассматриваемого объекта. Для этого последовательно получают несколько изображений объекта при различных положениях фокуса (z) и для каждой точки изображения определяется кривая дисперсии яркости в зависимости от положения фокуса.

ОЦЕНКА ВЫСОТЫ РЕЛЬЕФА

На практике изображение объекта имеет высокий уровень шума и не всякий объект обладает ярко выраженной текстурой, что в совокупности приводит к довольно сильным искажениям кривой дисперсий. В этом случае положение максимума дисперсии может сильно отличаться от истинной высоты рельефа, что делает сомнительным саму возможность оценить высоту рельефа по предъявленной кривой дисперсий. Однако если представить кривую дисперсий как некое зашумленное изображение идеальной кривой дисперсий, то проблему можно свести к задаче распознавания образов, решить которую можно в рамках морфологических методов анализа изображений [5, 6].

Суть морфологических методов заключается в построении множества всевозможных изображений объекта, полученных при различных условиях регистрации. Это множество называется формой изображения. Зная форму изображения, можно решать задачи о принадлежности исследуемого изображения данной форме, оценивать параметры изображения и т.д. Причем исследуемое изображение может быть получено при любых условиях регистрации, которые учтены в форме. В нашем случае изображением является кривая дисперсий, а его формой – множество всех унимодальных функций положения фокуса z . Параметр формы изображения – это значение высоты фокуса, в которой кривая дисперсии яркости дос-

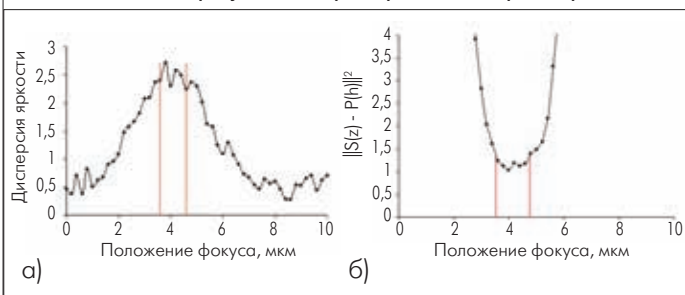


Рис. 1. Решение задачи (1): а) кривая дисперсий с найденным интервалом значений ее максимума; б) расстояние $\|S(z) - P(h)\|^2$ – отличие сигнала от унимодальной функции в зависимости от положения ее максимума

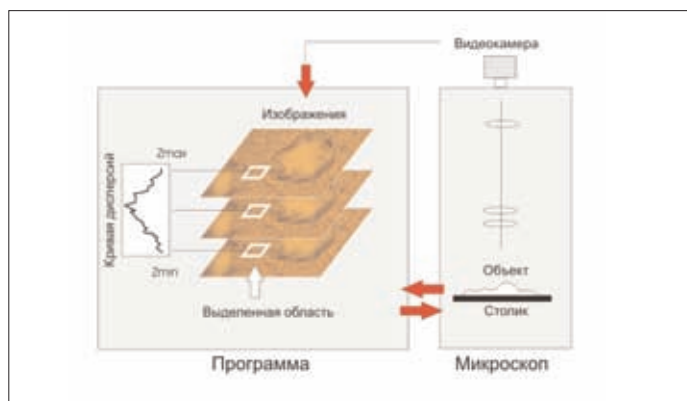


Рис.2. Общая схема измерений рельефа поверхности с помощью программируемого микроскопа

тигает максимума. По этому параметру и определяется высота рельефа в данной точке.

В поставленной задаче представим входной сигнал $S(z)$ (кривую дисперсий) как зашумленное изображение унимодальной функции: $S(z) = F(z) + N(z)$, где $F(z)$ – одна из возможных идеальных унимодальных кривых дисперсий для данной формы изображения, $N(z)$ – возможные значения шума. Задача сводится к выбору такой функции $F(z)$, которая как можно меньше отличалась бы от $S(z)$.

Определим H как множество возможных значений высоты рельефа h , для которых отклонение сигнала $S(z)$ от унимодальной функции $F(z)$ с максимумом в h может быть объяснено шумом $N(z)$. Тогда множество возможных значений h представляет собой интервал на числовой прямой. Наилучшая оценка высоты рельефа – середина этого интервала, а погрешность – его полуширина. Таким образом, определив множество допустимых значений высоты рельефа H , мы автоматически определим высоту рельефа поверхности с конкретной погрешностью.

Если множество $N(z)$ линейно ограничено параметром N_{max} , то нахождение множества H сводится к решению неравенства:

$$\|S(z) - P(h)\|^2 < N_{max} \quad (1),$$

относительно h . $P(h)$ – проекция входного сигнала $S(z)$ на множество унимодальных функций с максимумом в h .

Решение задачи (1) иллюстрируется на рис.1. Если же задача (1) не имеет решений, это означает, что предложенная нами модель не верна. На практике это означает либо отсутствие контрастной текстуры на изображении в выбранной области, либо попадание выбранной области на сильно наклонный рельеф, и такую область следует исключить из рассмотрения.

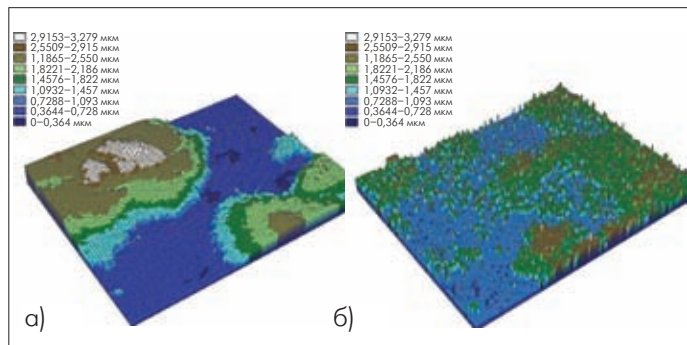


Рис.3. Реконструированные рельефы поверхности, покрытой золотом: а) виден гладкий рельеф поверхности высотой 3 мкм, на котором не заметно шероховатости золота; б) виден рельеф поверхности самого золота

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ

Автором статьи разработана программная реализация описанного алгоритма.

В качестве оптического прибора используется микроскоп Leica INM 300, который имеет встроенный программируемый процессор. Микроскоп управляется программно через SECS-интерфейс. Для реконструкции рельефа поверхности оператор выбирает объект и отмечает крайние положения z_{min} и z_{max} объекта по высоте. Это делается вручную изменением высоты предметного столика микроскопа и определением тех положений, в которых все части объекта становятся размытыми. Затем происходит последовательное изменение высоты столика, которое управляется программой, и захват изображений объекта (рис.2). Шаг изменения положения столика может составлять до 0,018 мкм, количество снятых изображений – 50–100. Полученные изображения делятся на прямоугольные области, и для каждой области строится кривая дисперсий. По кривой дисперсий определяется высота рельефа поверхности и погрешность ее измерения. Параметр задачи N_{max} зависит от режимов съемки и подбирается экспериментальным путем. В программе были использованы методы приближенного быстрого нахождения $\|S(z) - P(h)\|^2$, и решение задачи (1) имеет количество операций, пропорциональное количеству точек измерений. С помощью программы обрабатываются изображения размером 512x256 со скоростью 10 кадр/с на компьютере с процессором Intel Xeon 3400.

Описанный метод и программа находятся на стадии разработки, однако они уже применялись в НИИСИ РАН для измерений объектов микроэлектроники. Погрешность определения высоты рельефа зависит от конкретного объекта, шума и оптических свойств микроскопа и, как правило, составляет ~0,5 мкм при освещении в видимом диапазоне. К сожалению, досконального тестирования метода пока сделать не удалось в связи со сложностью точного определения высоты рельефа поверхности другими методами.

Программа применялась для реконструкции и измерения формы дефектов и определения шероховатости нанесенного на корпус микросхемы золота. На рис.3 представлены реконструированные рельефы поверхности, покрытой золотом с шероховатостью <0,5 мкм. Методика позволила выбрать оптимальный процесс нанесения золота на корпуса микросхем.

На рис.4 продемонстрировано применение программы к реконструкции формы дефекта линейным размером 40 мкм и высотой ~10 мкм в фоторезисте. При реконструкции использовалась информация о том, что дефект расположен на ровном поле зрения. Это позволило изба-

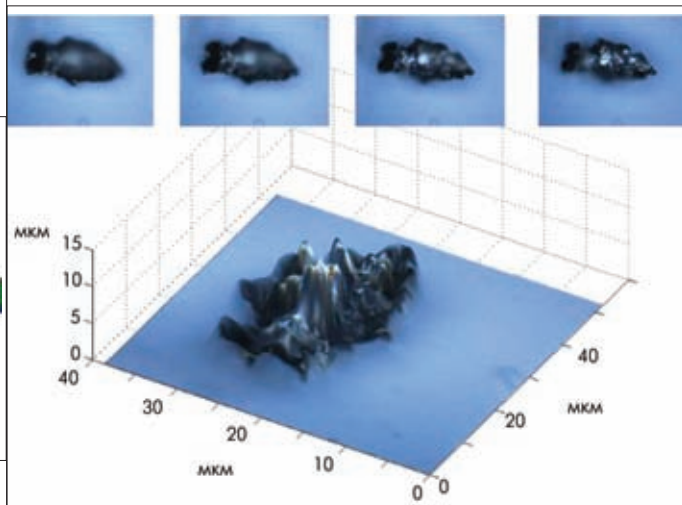


Рис.4. Реконструкция формы дефекта размером 40 мкм и высотой 10 мкм в фоторезисте. Сверху – несколько изображений дефекта, полученных при различных положениях фокуса

виться от сильного шума в значениях высоты поверхности на поле магия о том, что дефект расположен на ровном поле зрения. Это позволило избавиться от сильного шума в значениях высоты поверхности на поле вокруг дефекта, который возникает из-за отсутствия текстуры. Считалось, что область вокруг дефекта обладает нулевой высотой (на самом деле дефект как бы утоплен в прозрачном фоторезисте).

Основные недостатки описанных в работе методов – это высокая чувствительность к текстурам объектов. Например, если наблюдается дефект на ровном поле зрения, то о высоте окружающей дефект поверхности нельзя сказать ничего, так как на ней нет текстуры, и кривая дисперсий не зависит от положения фокуса. Однако решение проблемы возможно при так называемом активном освещении [1]. Если в осветительную систему микроскопа поместить шаблон с микротекстурой, то само освещение будет создавать текстуру на объекте. Тогда описанные методы смогут применяться практически к любым объектам в микроэлектронике и станет возможна трехмерная реконструкция микросхем с погрешностью, равной разрешающей силе микроскопа. В настоящее время автором решение этой проблемы разрабатывается.

ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА

Основными областями применения разработанного метода в микроэлектронике являются:

- **дефектоскопия.** С помощью разработанного метода возможно восстанавливать трехмерную форму обнаруженного дефекта, что облегчает задачу его классификации и выявления причины его возникновения;
- **оценка шероховатости поверхности.** Оценка шероховатости поверхности в пределах от 0,5 мкм и выше может быть применена, например, для контроля процессов осаждения металлов. С помо-

щью разработанного метода возможно определение шероховатости поверхности с достаточной точностью и скоростью;

- **определение мест нарушения контактов и других дефектов в микросхемах.** С помощью данного метода с применением активного освещения возможно восстановление трехмерной картины любого узла микросхемы, обладающего рельефом без взаимных перекрытий (относительно обзора сверху);
- **определение топологии микросхемы.** Современные методы определения топологии микросхемы используют лишь информацию о цвете различных слоев микросхемы. С помощью данной методики можно использовать еще и информацию о высоте слоев, что существенно облегчит задачу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Shree K. Nayar, Masahiro Watanabe, Minori Noguchi. Technical Report of Computer Science Columbia University CUCS-028-94.
2. J.M. Ogden, E.M. Adelson, J.R. Bergen et al. RCA Engineer, 1985, 30-5, -4.
3. Введенский С., Захарченко А., Троицкий В. Измерения субмикронных размеров. Оптический микроскоп с некогерентным освещением. – ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2005, №1.
4. Захарченко А.А. Морфологические методы анализа многофокусных изображений. – В кн.: Сб. докладов 12-й Всероссийской конференции "Математические методы распознавания образов". – М.: МАКС Пресс, 2005.
5. Пытьев Ю.П. Морфологический анализ изображений. – Докл. АН СССР, 1983. Т. 269.
6. Пытьев Ю.П. Задачи морфологического анализа изображений. – В кн.: Математические методы исследования природных ресурсов Земли из Космоса. – М.: Наука, 1984.