

УДК 004.932.2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ СУБПИКСЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ОБЪЕКТОВ В МИКРОСКОПИИ

А. А. ГУНДИН, В. Г. ДУДОРОВ

ОАО «Оптоэлектронные системы»

Минск, Беларусь

UDC 004.932.2

METHOD OF CONDUCTING SUB-PIXEL MEASUREMENTS OF OBJECTS IN MICROSCOPY

A. A. HUNDZIN, V. G. DUDOROV

Аннотация

В данной статье решается задача измерения линейных размеров с субпиксельной точностью для элементов полупроводниковых пластин в микроскопии. Рассмотрен метод измерения с помощью анализа профиля сечения изображения, содержащего края объекта с применением метода взвешенных сумм. Описан предлагаемый метод статистической оценки и удаления аномальных результатов для множества однотипных измерений с целью повышения устойчивости алгоритма.

Ключевые слова:

измерение, контроль линейных размеров, обработка изображений, микроскопия, субпиксельная точность.

Abstract

In this paper, the problem of measuring linear dimensions with sub-pixel accuracy for elements of semiconductor wafers in microscopy is solved. The method of measuring the cross section of an image containing the edges of an object using the weighted sum method is considered. A proposed method of statistical estimation and removal of anomalous results for a set of one-type measurements is described with the aim of increasing the stability of the algorithm.

Key words:

measurement, linear dimensions control, image processing, microscopy, sub-pixel precision

Введение

В современной микроскопии одной из важнейших функций в сопровождающем программном обеспечении (ПО) является возможность проведения измерений наблюдаемых объектов.

Данная функция в подавляющем большинстве реализуется путем наложения «измерительного» слоя поверх изображения, другими словами, реализуется возможность рисовать примитивы поверх изображения, используя длины линий и переводной коэффициент для получения размеров объектов (метод измерений по длине линии). Недостатком такого подхода

является достаточно высокая абсолютная погрешность получаемого результата.

Актуальным является вопрос автоматического нахождения границ объекта средствами ПО, позволяя существенно уменьшить вклады субъективной, статической, мультипликативной и случайной составляющих погрешности.

Целью работы является разработка программного кода алгоритма для проведения измерений объектов на основе анализа изображений, полученных камерой, с субпиксельной точностью.

Рассмотрим основные этапы проведения субпиксельных измерений с использованием оптического микроскопа.

Преобразование цветного изображения в полутоновое

При работе микроскопа в видимой области спектра, по умолчанию, изображение с камеры для обработки приходит цветным. Однако в данном случае цветовая составляющая никак не влияет на точность нахождения края. Поэтому первым делом необходимо осуществить преобразование RGB изображения в градации серого.

В простейшем случае формулой получения значения пикселя «серого» изображения из цветного является среднее значение интенсивности всех цветовых каналов.

Однако в виду неравномерности восприятия цвета глазом, более правильно применять усреднение с весовыми коэффициентами [1]:

$$I = R*0,333 + G*0,5 + B*0,166 ,$$

где I – значение интенсивности пикселя «серого» изображения; R, G, B – значения интенсивности пикселя на каждом из каналов цветного кадра.

Нахождение границ объекта

Визуально объект всегда выделяется на фоне, поскольку его граница либо темнее, либо светлее фона. Т. е. объект контрастирует с фоном. Это говорит о том, что в окрестности границы объекта обязан быть существенный перепад яркости изображения.

Поскольку изображение имеет 256 градаций яркости (8-битный формат пикселя), то переход от фона к объекту является не ступенчатой функцией, а плавно возрастающей (рис. 1).

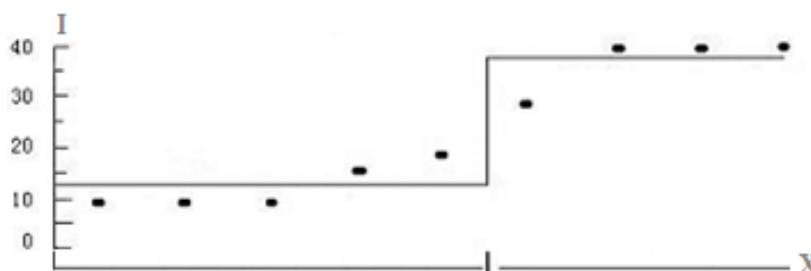


Рис. 1. Модель идеального и реального края

В этом случае для однозначного нахождения границ объекта необходимо взять производную функции по интересующей части изображения.

$$dx_i = \frac{I_i - I_{i-1}}{h},$$

где I – яркость текущего пиксела; h – шаг равный 1 пикселю.

В результате границами объекта будут экстремумы функции производной интенсивностей пикселей.

Чтобы не реагировать на локальные экстремумы (шум, пыль), необходимо применить пороговое значение (обозначим как T) уровня яркости, производная ниже которого будет приравняться к нулю.

Измерение линейных размеров наблюдаемого объекта с субпиксельным разрешением

Полученные в п.2 экстремумы представляют собой функции, распределённые на некоторой длине профиля (ряд пикселей по которому ведется анализ изображения). Используя это, можно применить метод Взвешенных Сумм (Center of Gravity) [2].

$$X = \frac{\sum_{i=0}^N |dx_i - T| * i}{\sum_{i=0}^N |dx_i - T|},$$

где dx_i – значение производной, рассчитанной на 2-м шаге алгоритма (нахождение границ объекта); T – величина порога.

К полученному значению X прибавляем смещение от нулевой точки, и разность $X_1 - X_2$ есть результат измерения линейного размера с субпиксельным разрешением.

На рис. 2 показан результат измерения ширины токопроводящей дорожки на кристалле полупроводниковой пластины. Изображение получено с помощью микроскопа Микро-200(Т)-01. Зелёный график – значение интенсивности профиля, красный – её производная, синий пунктир – установленный порог. Вертикальные линии проведены по найденным по методу взвешенных сумм краев объекта. Значения на графике по оси абсцисс указаны в пикселях, по оси ординат – в интенсивностях 8-битного формата пикселя.



Рис. 2. Получение линейного размера объекта

Повышение разрешения с помощью обработки соседних профилей, образующих зону обработки изображения

Уменьшить влияние шумов на результат измерений можно путем усреднения результатов с рядом параллельных соседних профилей. Сильно зашумлённое изображение можно также предварительно обработать фильтром Гаусса.

Применим на данное измерение толщину профиля в 5 пикселей и сглаживание с окном в 3 пикселя (рис. 3).

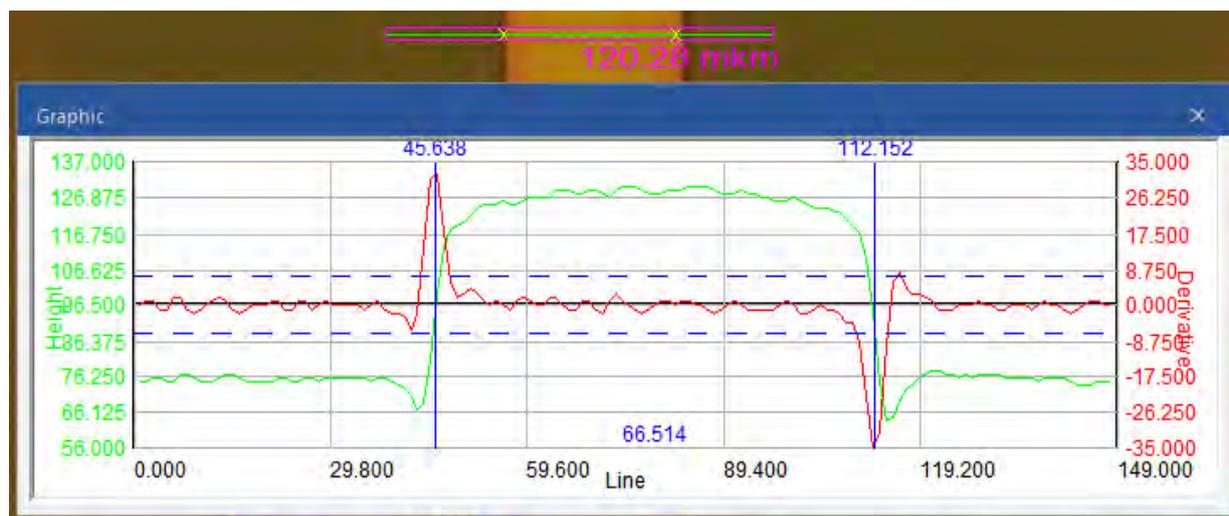


Рис. 3. Измерение с применением шумоподавления

Проанализировав полученный график, можно сделать вывод о существенном подавлении шума (коэффициент подавления более 3). А вычисленный средний размер ширины дорожки отличается от локального размера на 0,552 пикселя.

Кроме этого, погрешность полученных вычислением результатов можно уменьшить иным путем. Для этого необходимо взять зону множества профилей с некоторым шагом (3–5 пикселя) и усреднить полученные значения (рис. 4). Это позволит решить проблему измерения среднего значения ширины объекта, исключив фактор неровности края.

На рис. 4 показан график полученного множества измерений расстояния по 65 параллельным профилям. Как можно видеть из графика, отклонение результатов измерений не превышает 0,5 пикселя.

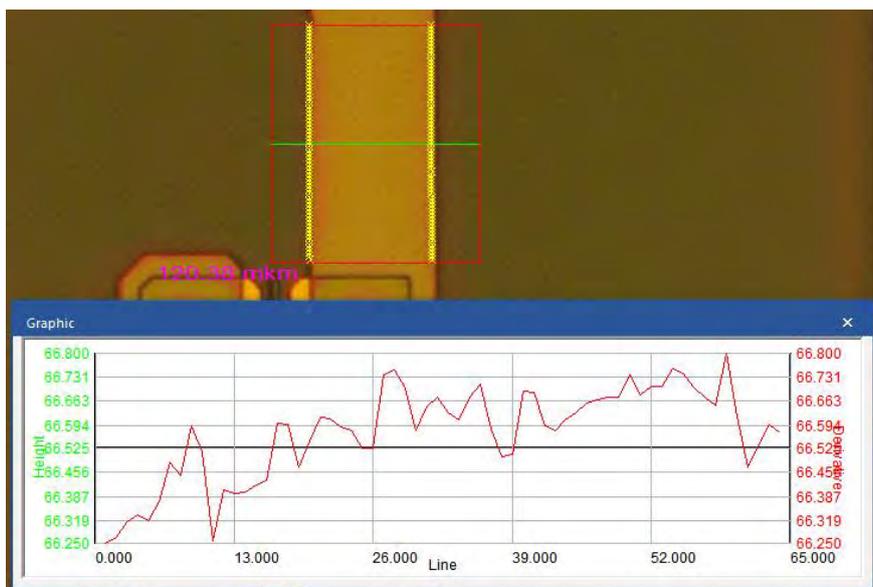


Рис. 4. В верхней части измеряемый объект, в нижней – график разброса результатов множества измерений

Однако на изображении некоторых объектов могут присутствовать артефакты, искажающие профиль объекта (рис. 5), в связи с чем возникает вопрос об удалении результатов вычислений связанных с ними.

В разрабатываемом алгоритме применён критерий Граббса [3] для удаления выбросов результатов вычислений связанных с артефактами.

$$G_i = (X_i - \bar{X})/S,$$

где X_i – i -е значение результата измерения линейного размера в выборке;
 $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N X_i$ – среднее значение результата; $S = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2}$ – среднеквадратическое отклонение результата.

Полученный массив G сортируется по возрастанию величины результата. Крайние элементы массива считаются выбросами, если его значение превышает критическое (в соответствии с заданным уровнем значимости α)

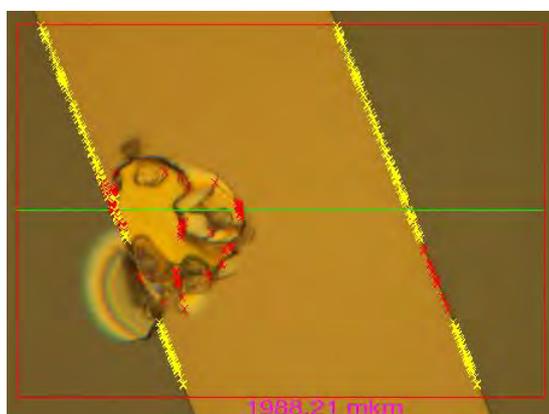


Рис. 5. Измерение объекта со значительным дефектом края

Заключение

Результатом работы является методика измерения объектов с субпиксельным разрешением на изображениях, полученных на микроскопе Микро-200(Т)-01 в условиях реальной эксплуатации. Рассмотренный подход позволяет значительно снизить погрешность оценки линейных размеров объектов в сравнении с классическим методом измерения по длине линии. Он также позволяет в автоматическом режиме обнаруживать изменение положения и размер объекта в видеопотоке, производя перерасчёт результата.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kumar, T.** A Theory Based on Conversion of RGB image to Gray image // T. Kumar, K. Verma // International Journal of Computer Applications. – 2010. – № 7. – P. 7–10.
2. **Осадчий, И. С.** Метод субпиксельного измерения координат изображений звезд для приборов астроориентации космического базирования / И. С. Осадчий // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – № 5. – URL: <http://jre.cplire.ru/jre/may15/1/text.pdf>.
3. **Лемешко, Б. Ю.** Расширение области применения критериев типа Граббса, используемых при отбраковке аномальных измерений / Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко / Измерительная техника. – 2005. – № 6. – С. 13–19.