

УДК 004.932.2

КАЛИБРОВКА СИСТЕМЫ, ПРЕДНАЗНАЧЕННОЙ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПРОВОДНИКОВ НА ПОДЛОЖКЕ МИКРОСХЕМЫ

И.Н. ГУБЧИК

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровки, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Поступила в редакцию 25 марта 2013

Описывается методика калибровки фотометрической системы для решения конкретной задачи оценки положения проводника, соединяющего полупроводниковую микросхему с подложкой. Строится нелинейная модель дисторсии объектива камеры, позволяющая оценить положение проводника в трехмерном пространстве с заданной точностью. Новизна описанной методики заключается в обеспечении поставленной точности измерений параметров проводника с высокой скоростью обработки.

Ключевые слова: калибровка камеры, точность калибровки, трехмерная сцена.

Введение

Калибровкой фотометрической системы называется оценивание параметров входящих в систему фотокамер для коррекции искажений изображения сцены с целью получения достоверных метрических параметров объектов, представленных на сцене [1]. В статье рассматривается только внутренняя калибровка, а внешние параметры, то есть положение камер, предполагаются известными. Идеальной фотокамерой, не требующей калибровки, является камера-обскура, реализующая математическую модель центральной проекции; центром проектирования служит фокус камеры – точечное отверстие на плоскости, разделяющей сцену и сенсорную плоскость камеры. Источником искажения (дисторсии) фотокамеры являются искажения линз объектива, деформация их поверхностей и погрешности монтажа, клиновидность применяемых светофильтров, неровность плоскости сенсора камеры, ошибки в его установке и т.п. Но даже камера с идеальными линзами и идеальной компоновкой ее компонент дает искажение, вызванное свойствами геометрической оптики. Ввиду этого возникает задача калибровки фотокамеры; математическая модель и оцениваемые параметры зависят от конкретной постановки. Поскольку существует неограниченное число различных задач фотометрии, то существуют и множество задач калибровки.

Имеются методы калибровки фотометрической системы по снимкам трехмерного испытательного полигона. Цель метода состоит в получении калибровочных поправок на основе известных данных измерения объектов полигона. Сложность практического применения этого метода связана с необходимостью создания дорогостоящего полигона для решения конкретной задачи, однако в простейшем случае полигон может состоять из 2 или 3 плоских палеток с геометрическими узорами, при этом палетки устанавливаются ортогонально друг другу [2]. В последние годы развивается так называемый аналитический метод самокалибровки. Для реализации метода требуются съемки статической сцены более, чем из 2 точек. Суть этого метода – в учете систематических искажений координат объектов на снимках в процессе уравнивания невязок изображений, полученных из различных точек съемки [3].

В статье рассматривается задача визуального контроля качества микросхемы. В микроэлектронной промышленности в качестве электрических соединителей между полупроводниковой микросхемой и подложкой, на которой расположена микросхема,

применяются проводники, визуально это напоминает классический навесной монтаж. В основном используются высококачественные проводники, изготовленные из золота, меди или алюминия. Для снижения производственных затрат процесс соединения микросхемы и подложки автоматизирован. В полупроводниковой промышленности наблюдается постоянная тенденция к уменьшению размеров компонент. Это справедливо и по отношению к соединительным проводникам. В результате производство для соблюдения стандартов требует все большей точности измерений, что выдвигает новые требования, как к фотометрической аппаратуре, так и к допустимым погрешностям ее калибровки [4]. Здесь для калибровки используется одна плоская палетка, расположенная на горизонтальной плоскости стола. Поскольку микросхемы очень малы, то принимается довольно грубое предположение о том, что искажение изображения по вертикали достоверно интерполируется центральной проекцией с линейным пропорциональным изменением размеров.

Постановка задачи и математическая модель

Прежде всего, условимся, что проверяемые микросхемы располагаются на идеально плоском прямоугольном столе, на нем же размещают плоскую палетку для калибровки. Для построения математической модели задачи калибровки и оценки параметров проводников микросхемы введем на плоскости стола декартовы координаты X и Y . Начало координат установим в одной из углов стола. Вертикальную координату, направленную вверх перпендикулярно столу, назовем Z . Считаем, что толщина палетки равна нулю, то есть координата Z как для плоскости стола, так и для плоскости палетки равна нулю.

В фотометрической системе для оценки высоты соединительного проводника используются, как правило, несколько фотокамер [5], [6] и дополнительных специализированных устройств, например, высотометра [7]. Изменяя положение камер относительно стола, можно сфокусировать их на определенной точке проводника. Это будет точка, для которой выполняется оценка высоты проводника. Возрастающие количественные потребности производства микросхем требуют от фотометрической системы также все большей скорости построения оценок объекта. Все методы оценок ограничены скоростью работы электромеханических устройств, которая ограничена по их физическим возможностям.

Для сокращения времени оценивания предлагается фотометрическая система, состоящая из трех отдельных камер и трех отдельных источников света. В качестве источников света используется круговое освещение. Положение камер и источников света фиксировано. Одна из камер расположена перпендикулярно к плоскости стола, на котором находится микросхема. Источник света для данной камеры также расположен перпендикулярно. Снимки с этой камеры используются для проверки формы проводников, их целостности, отсутствия контактов с другими проводниками. Вторая камера повернута относительно оси X . За точку вращения принимается начало координат плоскости стола. Источник света для данной фотокамеры также повернут относительно оси X на равный по модулю, но отличный по знаку угол. Расположение третьей камеры со своим источником света аналогично расположению второй камеры с заменой оси X на ось Y . Угол поворота камер и источников света выбирается таким, чтобы на снимках, получаемых с двух последних камер, можно было отдельно видеть проводник и его тень на подложке. Снимки с двух последних камер используются для оценки высоты проводника. Соединительные проводники в качественной сборке микросхемы не искривлены, но направление каждого отдельного проводника может быть индивидуальным. Снимки второй камеры предпочтительнее для проводников, параллельных оси X , а третьей камеры – параллельных оси Y .

Разрешение сенсора используемой камеры составляет 10 мкм/пиксель, размер сенсора 1280×1024 пикселей. Фотокамера используется в совокупности с телецентрическим объективом. Использование данного типа объективов позволяет перейти от центральной к параллельной проекции. В контролируемых микросхемах необходимо проверять форму проводов, а погрешность оценки высоты петли соединительного провода не должна превышать 4 мкм. Требуемая скорость оценки параметров проводников не должна превышать 200 мс. Для этого с интервалом в 10 мс поочередно делаются снимки с трех камер. Время получения снимков зависит от времени экспозиции камеры. Данное время не может быть уменьшено до

слишком малых значений, т.к. теряется четкость снимка. Для получения снимков с трех независимых камер требуется около 50 мс с учетом времени перемещения микросхемы, поскольку рабочая область системы составляет около 10×10 мм, что значительно меньше размера стандартной микросхемы.

В описываемой системе определение высоты проводников производится на основе оценки расстояний между проводником и отбрасываемой им тенью. На рис. 1 схематически представлены расположение камеры, источника освещения и проверяемый проводник.

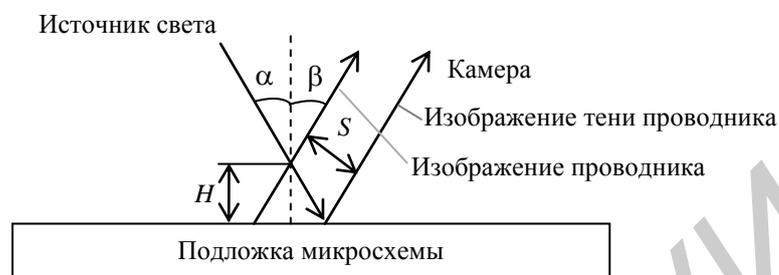


Рис. 1. Камера, источник света и проводник

Исходя из расстояния S между проводником и его тенью на плоскости сенсора камеры,

рассчитывается искомая высота проводника: $H = \frac{S \cdot \cos(\alpha)}{\sin(\alpha + \beta)}$.

Если поверхность подложки будет матовой, то отраженные от поверхности подложки лучи будут иметь угол, отличный от угла прямых лучей, попадающих на подложку. В микроэлектронной промышленности используются, в основном, хорошо отражающие поверхности из недорогих металлических сплавов. На подложке могут располагаться и другие элементы с плохо отражающей поверхностью, в связи с чем предполагается, что $\alpha \approx \beta$. Для определенности будем считать, что углы α и β равны – это предположение практически не влияет на погрешность калибровки. Тогда высота проводника равна

$$H = \frac{S}{2 \cdot \sin(\alpha)}. \quad (1)$$

Для калибровки камер используется палетка – плоский тестовый объект, который представляет собой набор отражающих кругов на прозрачной подложке [3], [8]. Круги расположены в узлах прямоугольной сетки с известным шагом 200 ± 1 мкм, диаметры кругов равны 100 ± 2 мкм. Количество кругов известно. Изображение, считываемое с камеры, представлено в градациях серого цвета. Идеальное изображение тестового объекта представляет собой набор светлых кругов на темном фоне.

Прямоугольная сетка описывается при помощи шага сетки h , угла поворота относительно начала координат γ и смещения $(x_0; y_0)$. Отдельный узел прямоугольной сетки описывается выражением

$$X_{N_{ij}} = \begin{bmatrix} x_{N_{ij}} \\ y_{N_{ij}} \\ 1 \end{bmatrix} = X'_{N_{ij}} \cdot R \cdot T = \begin{bmatrix} i \cdot h \cdot \cos \gamma - j \cdot h \cdot \sin \alpha + x_0 \\ j \cdot h \cdot \cos \gamma + i \cdot h \cdot \sin \alpha + y_0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

где $X'_{N_{ij}} = \begin{bmatrix} i \cdot h \\ j \cdot h \\ 1 \end{bmatrix}$ – координаты узла прямоугольной сетки без поворота и сдвига;

$$R = \begin{bmatrix} \cos \gamma & -\sin \gamma & 0 \\ \sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad T = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ x_0 & y_0 & 1 \end{bmatrix} \text{ – матрицы поворота и сдвига соответственно; } i, j \text{ –}$$

индекс узла сетки.

Оценка внутренних параметров камеры при калибровке осуществляется через функционал квадрата разностей между узлами сетки и центрами тяжести кругов на идеальном изображении: $F(x_N, y_N) = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^M [(x_{N_{ij}} - x_{c_{ij}})^2 + (y_{N_{ij}} - y_{c_{ij}})^2]$, где $(x_{N_{ij}}; y_{N_{ij}}), (x_{c_{ij}}; y_{c_{ij}})$ – координаты узла сетки и центра тяжести круга на изображении соответственно; i, j – индекс узла сетки; K, M – количество узлов прямоугольной сетки вдоль обоих направлений.

Метод решения

Предварительно на калибровочном изображении применяется пороговая отсечка для фона. Круги, представленные на идеальном изображении, с учетом поворота камеры преобразуются в овалы, тем самым центры овалов будут смещенными относительно центров идеальных кругов. Координаты центров овалов определяются как центры тяжести на изображении, поскольку круги на тестовом объекте являются отражающими и интенсивность в различных точках овала на калибровочном изображении не будет одинаковой:

$$x_c = \frac{\sum_{x=x_0}^{x_0+n-1} \sum_{y=y_0}^{y_0+m-1} x \cdot I_{x,y}}{\sum_{x=x_0}^{x_0+n-1} \sum_{y=y_0}^{y_0+m-1} I_{x,y}}, \quad y_c = \frac{\sum_{x=x_0}^{x_0+n-1} \sum_{y=y_0}^{y_0+m-1} y \cdot I_{x,y}}{\sum_{x=x_0}^{x_0+n-1} \sum_{y=y_0}^{y_0+m-1} I_{x,y}},$$

где $I_{x,y}$ – интенсивность пикселя с координатами $(x; y)$; n, m – размер области, включающей отдельный овал; x_0, y_0 – начальный пиксель области.

С учетом формулы для прямоугольной сетки функционал разности между узлами сетки и центрами тяжести овалов на изображении определяется как

$$F(\gamma, h, x_0, y_0) = \sum_i \sum_j ((i \cdot h \cdot \cos \gamma - j \cdot h \cdot \sin \gamma + x_0 - x_{c_{ij}})^2 + (j \cdot h \cdot \cos \gamma + i \cdot h \cdot \sin \gamma + y_0 - y_{c_{ij}})^2).$$

При калибровке угол поворота идеальной прямоугольной сетки γ отличен от нуля, что связано с физическим поворотом сенсора камеры относительно оси Z , а также поворотом тестового объекта на X - Y плоскости стола. Исходя из введенного предположения, что угол поворота камеры и источника света одинаков по модулю, но различен по знаку, искомая оценка высоты проводника определяется только в определенном направлении, параллельном источнику света. В описываемой системе считается, что данное направление совпадает с направлением идеальной прямоугольной сетки относительно оси X или Y в зависимости от расположения камеры/источника света. Для упрощения вычислений выполняется поворот изображения на угол γ . За точку вращения принимается первый узел сетки. К повернутому изображению применяется билинейное преобразование, которое преобразует искаженную на плоскости камеры сетку в идеальную равномерную прямоугольную структуру. Поскольку шаг искаженной сетки изменяется за счет поворота камеры (или объекта) и дисторсии объектива, то данное преобразование применяется к каждому отдельному четырехугольнику сетки.

Разрешение системы в плоскости стола вычисляется, исходя из шага прямоугольной сетки и расстояния между кругами на тестовом объекте: $k = \frac{m}{h}$ (мкм/пиксель), где m – расстояние между центрами кругов на тестовом объекте в микрометрах; h – шаг прямоугольной сетки в пикселях.

Полагаем, что центр плоскости камеры совпадает с центром изображения. Для вычисления угла поворота камеры относительно осей X и Y используется совокупность снимков палетки с заданным смещением вдоль оси Z . Смещение калибровочного объекта относительно оси Z порождает смещение объектов на изображении по осям X и Y .

Угол поворота камеры относительно калибровочного объекта будет определяться из соотношения $\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta x}{\Delta z}$. Поскольку предполагается, что центр плоскости камеры совпадает с

центром изображения, то для определения угла поворота камеры необходимо выбрать ближайший к центру изображения объект.

На скорректированном изображении после билинейного преобразования определяется расстояние между проводником и его тенью. Однако данное расстояние не будет эквивалентно параметру S в формуле (1), поскольку корректировка изображения ставит плоскость камеры параллельно плоскости калибровочного объекта (см. рис. 2).

Параметр S определяется как $S = p \cdot \cos \alpha$, где $p = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}$ – расстояние между проводником и его тенью на скорректированном изображении. Подставляя полученное выражение в формулу (1), получаем выражение для оценки высоты проводника:

$$H = p \cdot \frac{\cos \alpha}{2 \cdot \sin \alpha} = \frac{p}{2} \cdot \operatorname{ctg} \alpha. \quad (2)$$

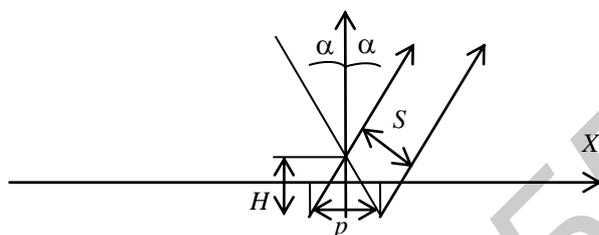


Рис. 2. Измеряемое расстояние p на скорректированном изображении

Для уменьшения погрешности калибровки используется совокупность снимков палетки, которая смещается вдоль осей X и Y . При смещении требуется, чтобы калибровочный объект не вращался. Это требование выполняется с использованием X - Y двукоординатного стола с сервоприводами. Перемещение стола не вносит искажений в угол поворота объекта.

Оценка погрешности метода через приращения с учетом преобразованной формулы оценки высоты проводника (2) будет определяться как $dH = \left| \frac{\partial H}{\partial p} \right| \Delta p + \left| \frac{\partial H}{\partial n} \right| \Delta n$, где $n = \operatorname{ctg} \alpha$ – постоянный коэффициент системы.

Оцениваемое расстояние между проводником и его тенью измеряется только вдоль одной из осей (X или Y), поэтому приращение переменной p равно:

$$dp = \left| \frac{\partial p}{\partial x_1} \right| \Delta x_1 + \left| \frac{\partial p}{\partial x_2} \right| \Delta x_2 + \left| \frac{\partial p}{\partial y_1} \right| \Delta y_1 + \left| \frac{\partial p}{\partial y_2} \right| \Delta y_2 = 2 \cdot \frac{|x_1 - x_2| + |y_1 - y_2|}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}} = 2 \cdot \frac{|x_1 - x_2|}{\sqrt{(x_1 - x_2)^2}} = 2.$$

При оценке угла поворота камеры смещение Δz известно. Смещение вдоль оси X или Y определяется исходя из разрешения системы и расстояния между идентичными точками на двух смещенных относительно друг друга снимках.

$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{\Delta x}{\Delta z} = \frac{k \cdot l}{\Delta z} = \frac{10,15 \cdot 9,71}{100} = 0,986$, где $k = 200/19,7 = 10,15$ (мкм/пиксель) – разрешение системы в плоскости стола; $l = 9,71$ (пикселей) – расстояние между идентичными точками на двух снимках.

Приращение угла поворота камеры определяется по формуле

$$\Delta n = \left| \operatorname{ctg} 45^\circ - \frac{1}{\operatorname{tg} \alpha_0} \right| = 0,014.$$

Максимально измеряемое расстояние на тестовом изображении между проводником и его тенью равно $p = \operatorname{dist} \cdot k = 10 \cdot 10,15 = 101,5$ (мкм), где dist – расстояние между тенью и проводником в пикселях. Конечная погрешность метода определяется по формуле (3). С учетом введенного предположения о равенстве углов поворота камеры и источника света полученный результат округляют в большую сторону до целого значения:

$$dH = n \cdot \Delta p + p \cdot \Delta n = 0,986 \cdot 2 + 101,5 \cdot 0,014 = 3,39 \approx 4 \text{ (мкм)}. \quad (3)$$

Заключение

Описанная методика калибровки позволяет удовлетворить требования к скорости оценки высоты соединительных проводников на изображении. Время, необходимое для обработки отдельной части микросхемы, которая попадает в поле зрения камеры, составляет 135–140 мс при количестве проводников на изображении до 200 единиц. Погрешность метода калибровки не превышает установленные 4 мкм, что позволяет использовать описанную систему для точной оценки высоты проводников.

CALIBRATION OF THE SYSTEM USED FOR CONDUCTOR INSPECTION AT MICROCHIP SUBSTRATE

I.N. GUBCHIK

Abstract

The article describes the calibration method of the photometric system for a particular purpose of estimation position of the conductor connecting the semiconductor chip and the substrate. A nonlinear model of the camera lens distortion, which allows estimating the position of the conductor in a three-dimensional space with the required accuracy is described. The novelty of the described technique is to provide the required accuracy of conductor parameters measurement with a high processing speed.

Список литературы

1. *Salvi J., Armangue X., Batlle J.* // Pattern Recognition. 2002. Vol. 35, Iss. 7. P. 1617–1635.
2. *Gupta M., Upadhyay S., Singh S. et. al* // International Journal of Enterprise Computing and Business Systems. 2011. Vol. 1, Iss. 2.
3. *Ankur D., Jun-Sik K., Kanade T.* // IEEE 12th International Conference on Computer Vision Workshops. 2009 P. 1201–1208.
4. Semiconductors history review [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.pwc.com/en_GX/gx/technology/publications/assets/semiconductor-industry-analysis-and-projections.pdf – Дата доступа: 28.02.2013
5. *Ando M., Tsukahara H., Oshima Y.* Method and apparatus for measuring three-dimensional configuration of wire-shaped object in a short time / U.S. patent № 5243406
6. *Tomiyama H., Nagai S.* Bonding wire detection method / U.S. patent № 5576828.
7. *Hui Cheng X., Hong Leung W.* Wire loop height measurement apparatus and method / U.S. patent № 7,145,162
8. *Dong-Joong K., Jong-Eun H., Mun-Ho J.* // International journal of control, automation and systems. 2008. Vol. 6, № 5. P. 746–754.