

УДК 004.932.72

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ВЗАИМНОЙ КОРРЕЛЯЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЁТА КООРДИНАТ ПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ КРУГЛОЙ ФОРМЫ И ИЗМЕРЕНИЯ ИХ РАЗМЕРОВ

© А. А. Голицын^{1,2,3}, С. А. Голицын³, Н. А. Сейфи¹

¹Новосибирский филиал Института физики полупроводников им. А. В. Ржанова СО РАН
«Конструкторско-технологический институт прикладной микроэлектроники»,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 2/1

²Институт автоматизации и электрометрии СО РАН,

630090, г. Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 1

³Новосибирский государственный университет,

630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, 1

E-mail: aag-09@yandex.ru

Предложена методика вычисления координаты положения круглого объекта на изображении и его диаметра. В основе методики лежит вычисление значений взаимных корреляций фрагмента анализируемого изображения с несколькими характерными изображениями-эталоном, чтобы одновременно определить, и какой эталон, и какое его смещение относительно исследуемого фрагмента являются наиболее подходящими. Методика позволяет не только вычислить размер и координаты, но и определить фактическое отсутствие объекта в поле зрения. Показана её реализуемость и практическая применимость на примере алгоритма анализа мест сварки проволочных соединений на поверхности полупроводников с характерным шариком, которые используются при сборке интегральных микросхем. Алгоритм может быть использован в целях неразрушающего контроля на производстве полупроводниковых изделий до их корпусирования. Алгоритм позволяет не только измерить диаметр шарика и определить, находится ли его координата в допуске или нет, но также установить, имеется ли соединение вообще.

Ключевые слова: взаимная корреляция, обработка изображений, диагностика полупроводниковых изделий.

DOI: 10.15372/AUT20240506

EDN: PGGSGE

Введение. Корреляционный анализ изображений является стандартным методом оценки сходства двух изображений и широко применяется для поиска на изображении фрагментов, соответствующих некоторому другому изображению (или эталону) в системах технического зрения и слежения, для распознавания текста и образов и т. д. В данной работе описывается, каким образом при помощи метода корреляции можно определить не только местоположение интересующего нас объекта в поле зрения, но и его размер на примере диагностики мест пайки или сварки проволочных выводов на контактных площадках кристаллов при сборке интегральных микросхем или полупроводниковых приборов.

Технологии создания электрического контакта между полупроводниковым кристаллом и выводами корпуса микросхемы подробно описаны в соответствующей научной литературе, например в [1, 2]. Распространённой технологией на производстве микросхем является проволочное соединение с образованием шарика. Примеры внешнего вида такого соединения, полученные с помощью микроскопа, приведены в [3, 4]. К задачам диагностики соединений относится следующее: 1) находятся ли в допуске координаты места сварки проволоки на контактной площадке полупроводника; 2) находится ли в допуске размер получившегося шарика; 3) имеется ли соединение вообще, и не произошёл ли отрыв.

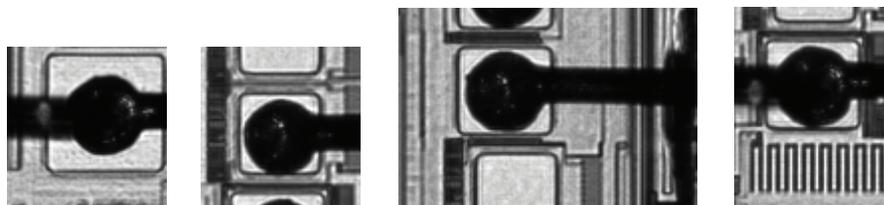


Рис. 1. Внешний вид контактных площадок на поверхности полупроводникового кристалла с подведёнными выводами на анализируемых фрагментах изображения

Целью данной работы является разработка методики, позволяющей решать перечисленные задачи в составе программных продуктов систем неразрушающего контроля, а также демонстрация ее реализуемости и практической применимости.

Условия наблюдения. Основной особенностью проволочных соединений с образованием шарика является то, что при виде сверху форма места сварки близка к круглой, а это значит, что алгоритмически диагностику соединения можно свести к задачам поиска на изображении круглого объекта и измерения его размеров. Помимо этой особенности, к рассматриваемому в данной работе примеру применим следующие условия:

- изображения являются монохромными;
- наблюдаемые объекты (места соединений выводов) имеют тёмный по сравнению с фоном оттенок, а фон может быть не сплошным, а в виде какой-либо структуры;
- наблюдаемые объекты имеют форму, похожую на круглую, их размер вычисляется приблизительно;
- диаметр объекта на изображении может быть в диапазоне от 30 до 50 пикселей;
- размер окрестности изображения, где может находиться объект, имеет ограниченные размеры, например 200×200 пикселей;
- в одной окрестности может находиться только один объект.

Примеры анализируемых фрагментов изображений приведены на рис. 1. Тёмный оттенок места сварки и подходящего к нему проводника обусловлен особенностями съёмки с коаксиальным освещением. От одного соединения может чаще всего исходить один проводник. В некоторых случаях проводников может быть несколько, когда к уже имеющемуся соединению сверху приваривается ещё один проводник.

Размеры фрагментов в общем случае могут быть произвольными, поэтому на рис. 1 они умышленно взяты разными. Каждый из них выбирается исходя из чертежа, т. е. из диапазонов допустимых координат места сварки, таким образом, чтобы во всех случаях, не являющихся дефектными, изображение шарика не заходило за границы фрагмента, которые могут даже иметь небольшой запас на часть дефектных случаев, когда проводник оказывается приварен за пределами допустимой окрестности. Диапазон диаметров изображения шарика выбирается исходя из толщины проводника, применяемого в конкретном случае при производстве анализируемой микросхемы. Неиспользуемые контактные площадки и области кристалла вне таковых не анализируются. Считается, что лишний проводник не может быть приварен, а если какой-либо из них будет приварен не на своё место, то этот дефект будет выявлен по отсутствию места сварки в том месте, где оно должно быть.

Теоретическое описание методики. Наиболее простым методом для определения координат разыскиваемого объекта на изображении является вычисление взаимной корреляции исходного анализируемого фрагмента с изображением-эталонном объекта в качестве меры сходства двух изображений. Допустим, выбранный фрагмент изображения имеет

размеры $w \times h$ пикселей и, соответственно, представляет собой двумерный массив данных I , каждый элемент которого содержит значение яркости соответствующего пикселя, тогда как эталон (или паттерн) имеет размеры $w_p \times h_p$ и дан в виде двумерного массива данных P .

Корреляция анализируемого изображения и эталона соответствует сумме произведений значений пикселей эталона и соответствующих им при данном взаимном положении пикселей исследуемого фрагмента. А именно, если эталон смещён относительно исследуемого изображения на x пикселей по горизонтали и на y пикселей по вертикали, величина корреляции для этого смещения может быть вычислена как

$$C(x, y) = P * I = \sum_{i=1}^{w_p} \sum_{j=1}^{h_p} P(i, j)I(i + x, j + y),$$

где $P(i, j)$ — значение яркости эталона в точке (i, j) , а $I(i + x, j + y)$ — значение яркости анализируемого изображения в точке, соответствующей указанной точке эталона. Если допустить, что выбранный эталон совпадает с разыскиваемым на изображении объектом, то смещения x и y , при которых значение корреляции окажется максимальным (т. е. при которых эталон будет иметь наибольшее сходство с анализируемым изображением), будут соответствовать координатам расположения разыскиваемого объекта.

Для удобства и наглядности за начало координат анализируемого изображения и эталона можно взять не левые верхние углы, а центры изображений, тогда формула вычисления их корреляции примет вид

$$C(x, y) = P * I = \sum_{i=1}^{w_p} \sum_{j=1}^{h_p} P(i, j)I(i + x + (w - w_p)/2, j + y + (h - h_p)/2).$$

В этом случае x может принимать значения от $-(w - w_p)/2$ до $+(w - w_p)/2$, чтобы не выходить за пределы допустимого диапазона, т. е. за границы изображения. Всё то же самое аналогично для y . При таком подходе решение получается более универсальным, так как в дальнейшем нам не потребуется пересчитывать координаты при сравнении нескольких значений корреляции изображения с эталоном, полученных для эталонов разных размеров.

Следует отметить, что под началом координат подразумевается воображаемая точка, от которой проще всего вести расчёт расположения изображения меньшего размера относительно изображения большего размера, а не первый элемент массива пикселей изображения в программном смысле. Также необходимо обратить внимание на то, что при программной реализации i и j являются порядковыми номерами строки и столбца во фрагменте изображения и поэтому принимают значения от 0 до $w_p - 1$ и от 0 до $h_p - 1$ включительно, несмотря на то, что за начало координат принят центр эталона. Кроме того, при нечётном значении $w - w_p$ в выражении $(w - w_p)/2$ будет использована только его целая часть.

Поскольку на исходных изображениях, примеры которых представлены на рис. 1, разыскиваемый объект (шарик в месте сварки) имеет форму, близкую к круглой, то в качестве эталона может быть взято изображение белого круга сходного диаметра на чёрном фоне. При этом исходное изображение перед вычислениями корреляции должно быть подготовлено таким образом, чтобы его фон стал тёмным, а разыскиваемый объект — светлым. Кроме того, в нашем случае диаметр шарика не только заранее не известен, но ещё и должен быть измерен, поэтому вычисления не могут быть ограничены поиском максимума значения взаимной корреляции с одним эталоном произвольного размера.

Очевидным решением является перебор нескольких похожих эталонов, для каждого из которых упомянутым методом взаимной корреляции можно найти наиболее подходящие координаты смещения x и y . Особенность заключается в том, что величина взаимной корреляции каждый раз будет зависеть не только от величины смещения, но и от площади светлой части изображения-эталона. Поэтому сравнение только значений взаимной корреляции изображения и эталона являлось бы некорректным. Для корректного сравнения вычисленные значения корреляций должны быть нормированы путём деления на величины (назовём их A), являющиеся значениями корреляции при максимально возможных совпадениях эталона и исследуемого изображения.

По очевидным причинам максимальными значения будут при совпадении каждого из двух изображений самих с собой, т. е. фактически эти величины соответствуют значениям автокорреляции для исходного изображения A_I и изображения-эталона (паттерна) A_P при нулевом смещении:

$$A_I = \sum_{i=1}^w \sum_{j=1}^h I(i, j)^2,$$

$$A_P = \sum_{i=1}^{w_p} \sum_{j=1}^{h_p} P(i, j)^2.$$

В итоговой формуле вычисления меры соответствия эталона изображению в зависимости от их смещения относительно друг друга $C_N(x, y)$ для соблюдения размерностей в числителе будем использовать значение корреляции изображения с эталоном дважды

$$C_N(x, y) = \frac{(P * I(x, y))(P * I(x, y))}{A_P A_I}.$$

Следует отметить, что обычно в качестве функции сходства корреляционного типа при анализе изображений применяются иные формулы [5, 6]. Например, в расчётах могут использоваться значения стандартных отклонений, вычисленных для яркости исследуемых фрагментов, значения средней яркости и т. д. Кроме того, при реализации функции кросскорреляции в исходных кодах различных библиотек в числителе выражение $P * I$ не умножается само на себя, а значения автокорреляции в знаменателе находятся под квадратным корнем.

В нашем случае предложенная формула более предпочтительна для аппаратно-программной реализации, так как в ней отсутствует ресурсоёмкая процедура вычисления квадратного корня. Естественно, она не является универсальной и применима только для частного случая — поиска светлого объекта на тёмном фоне. Однако, если бы изображение разыскиваемого круга могло быть как светлее, так и темнее фона, то предложенная формула оказалась бы менее пригодна, чем формула, учитывающая средние яркости. Мы же пользуемся тем, что из-за специфики анализируемых изображений разыскиваемый объект всегда ярче фона (за исключением отдельных элементов текстуры, не оказывающих существенного влияния).

Линейность или нелинейность значений $C_N(x, y)$ в данном случае не важны, так как нас интересует не столько само значение, сколько возможность найти максимум и провести сравнение, какое из значений окажется больше другого. При этом важно найти, какое именно значение максимально, но неважно, на сколько или во сколько раз оно больше остальных.

Также следует упомянуть, почему в качестве эталонов используются белые круги, а значения взаимной корреляции эталона вычисляются именно с исходными изображениями, пусть даже и видоизменёнными путём инвертирования (выполняемые над исходными изображениями преобразования перечислены при описании работы алгоритма). На первый взгляд кажется, что по смыслу задачи определения координаты и размеров круглого объекта информативным является его край, а не внутренняя область, поэтому более логичным кажется применять не исходные изображения, а соответствующие им результаты преобразований, полученные путём применения алгоритмов оконтуривания, а вместо эталонов в виде кругов использовать эталоны в виде колец.

Изначально до получения конечного результата оконтуривание рассматривалось как основной метод решения задачи. Но, как выяснилось в ходе практической реализации и тестирования на различных группах изображений, оконтуривание даёт ложноположительный результат в дефектных случаях, когда в исследуемом поле зрения шарика от сварки действительно нет, зато имеется круглый след от инструмента, который изначально подводит проволоку к контактной площадке и должен был осуществить сварку, но по каким-то причинам этого не сделал. В редких, но тем не менее встречающихся, случаях сам шарик может иметь на своей поверхности «посторонние» блики, которые оконтуриваются одновременно с настоящей границей шарика, что приводит к появлению артефактов на итоговом изображении в виде нескольких окружностей вместо одной. Также на конечный результат влияет отсутствие на многих изображениях границы между местом сварки в виде шарика и подходящим к нему проводником. И обозначенные ситуации, и некоторые другие требовали дополнительной обработки и анализа изображений. Но работоспособных в 100 % случаях критериев (в каких условиях какие именно дополнительные действия нужны) сформулировать не удалось.

В то же время описываемый в работе метод без применения оконтуривания и с использованием в качестве эталонов изображения сплошных кругов, напротив, показал свою работоспособность и простоту реализации. Причём способ оказался устойчивым, в том числе к наличию неравномерностей яркости внутри контура шарика, наличию бликов и теней, закрыванию части изображения шарика посторонними предметами и, как будет показано далее, отсутствию шарика в поле зрения.

Объяснение работы алгоритма при его практической реализации. Процесс вычислений состоит из нескольких отдельных этапов. Сначала необходимо подготовить изображения эталонов (паттернов) и рассчитать для каждого из них значения автокорреляции для нулевого смещения A_r . Назовём этот этап подготовительным. Он выполняется один раз независимо от числа измерений.

Как уже было отмечено, эталоны представляют собой несколько изображений с чёрным фоном (яркость 0), на которых по центру расположены сплошные белые круги (яркость 255) различных диаметров. Например, первый круг имеет диаметр 25 пикселей, следующий — 26, затем 27 и т. д. В рассматриваемом примере диаметр самого большого круга составляет 55 пикселей, но минимальный и максимальный диаметры в конкретном случае могут быть, конечно, и другими в зависимости от физических размеров измеряемых объектов, величины оптического увеличения и т. д. Для нашего примера это не принципиально. Для удобства распараллеливания вычислений размеры эталонов должны быть идентичными. В нашем случае пусть их размеры будут 60×60 пикселей, что немного больше максимального диаметра круга. Внешний вид некоторых из эталонов представлен на рис. 2.

Можно обратить внимание на то, что круги на эталонах — не сплошные. Фактически это круги со сплошной внутренней частью, но при этом со сглаженной границей, имеющей полутоновые оттенки. Эмпирическим путём было выявлено, что сглаживание необходимо для устранения несимметричности в случаях чётного/нечётного значения диаметра, и



Рис. 2. Примеры изображений эталонов в виде окружностей различных диаметров: 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55 пикселей

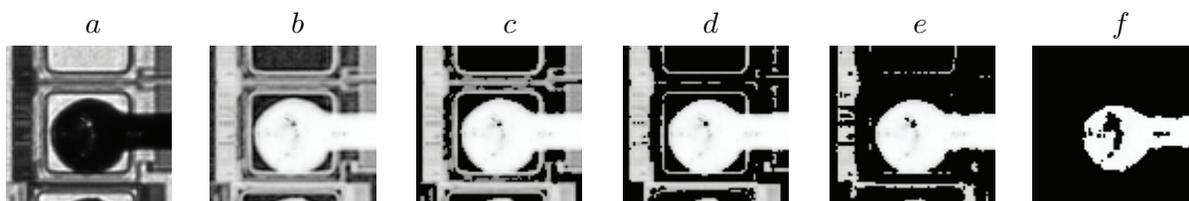


Рис. 3. Исходный фрагмент изображения (a), инвертированное изображение (b) и подготовленные изображения при значениях порога 50 % (c), 60 % (d), 70 % (e) и 90 % (f)

с применением сглаживания возрастает точность определения координаты и диаметра шарика.

Следующим этапом является подготовка фрагментов исходных изображений (пример приведён на рис. 1), которые путём некоторых действий должны быть преобразованы в подготовленные для анализа изображения, более пригодные для вычислений. Этот этап выполняется каждый раз перед измерениями после получения изображений анализируемых поверхностей полупроводниковых кристаллов. В результате преобразований на каждом фрагменте разыскиваемое изображение шарика в месте сварки проводника должно стать светлым вместо тёмного, а фон — очищенным от геометрического шума, потенциально мешающего нормальной работе алгоритма.

На этом этапе каждый фрагмент всех исходных изображений инвертируется, а затем из них исключаются все пиксели, темнее заданного порогового значения, рассчитываемого индивидуально для каждого фрагмента. Оставшиеся пиксели, имеющие яркость выше пороговой, остаются неизменными. Отметим, что наилучшим диапазоном величины порога оказались значения в пределах от 70 до 80 % максимальной яркости. Затем для получившегося подготовленного изображения рассчитывается значение автокорреляции при нулевом смещении A_I .

На рис. 3 представлены примеры полученных подготовленных изображений первого фрагмента из рис. 1 при различных значениях порога. На примере видно, что при малых значениях порога (менее 60 %) на изображении остаётся фоновая текстура поверхности полупроводника, при значении 70 % место сварки проводника отчётливо различается, а текстуры фона становятся минимальными по площади относительно всего изображения. При значении порога выше 90 % текстуры фона полностью исчезают, но при этом существенно изменяется и «полезное» изображение шарика.

На рис. 4 представлены примеры подготовленных изображений остальных фрагментов из рис. 1. На первый взгляд может показаться, что у этих изображений по сравнению с изображениями на рис. 1 увеличен контраст. Вместе с тем ни яркость, ни контраст изображений не меняются, т. е. в процессе преобразования изображение только инвертируется, и у него обнуляются те пиксели, яркость которых не превысила пороговое значение 80 % от максимальной яркости на конкретном фрагменте.

На завершающем этапе производится непосредственно вычисление значений меры

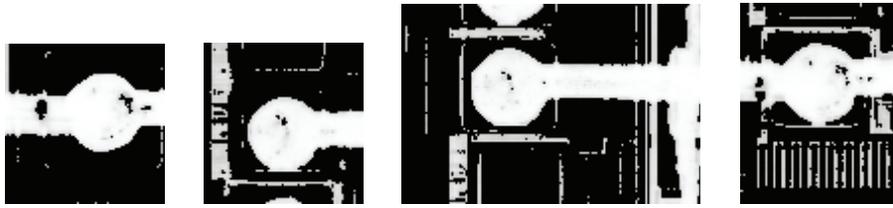


Рис. 4. Примеры подготовленных изображений при значении порога 80 %

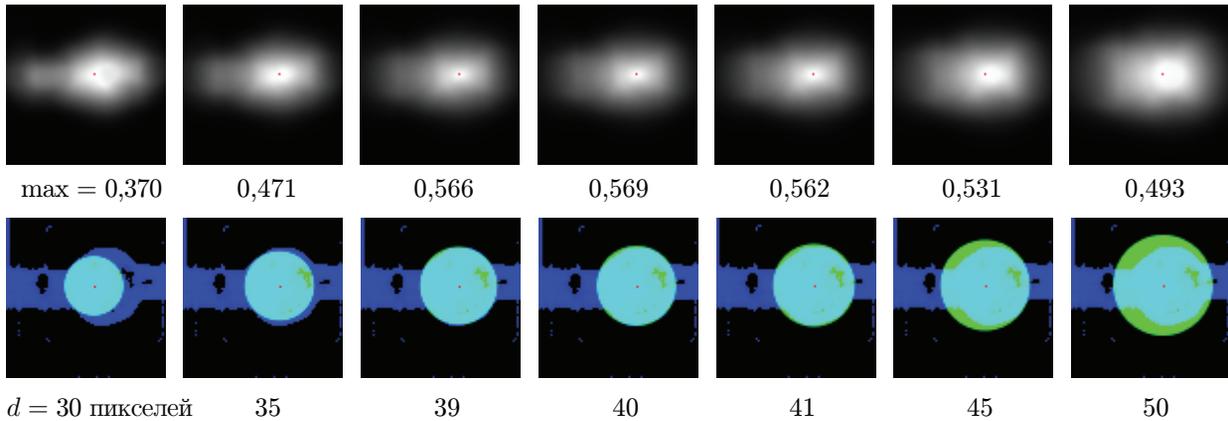


Рис. 5. Примеры графиков зависимостей меры соответствия эталона анализируемому изображению в зависимости от смещения эталона относительно изображения для эталонов с разными диаметрами кругов. Для наглядной демонстрации результатов вычислений дополнительно приведены результаты наложения эталонов на анализируемое изображение

сходства каждого из эталонов с подготовленным изображением для каждого из возможных их взаимных положений (т. е. смещений x и y). В результате вычислений имеется трёхмерный массив данных размером $n \times (w - w_p) \times (h - h_p)$, где n — это число эталонов, w и h — ширина и высота фрагмента изображения, а $w_p = w_h$ — размер изображения эталона. Все элементы массива — это числа с плавающей точкой в диапазоне от 0,0 до 1,0.

Путём перебора элементов массива вычисляется, при каких значениях x , y и каком номере эталона n значение массива максимальное. Фактически этим способом мы одновременно вычисляем значение координаты и выясняем, какой из эталонов является наиболее сходным с анализируемым подготовленным изображением.

Интерпретация результатов вычислений. Визуально результаты вычислений можно представить в виде набора из n трёхмерных графиков зависимостей меры соответствия C_N от координат x и y , по одному графику для каждого эталона. На рис. 5. приведены примеры графиков для эталонов с диаметрами кругов 30, 35, 39, 40, 41, 45 и 50 пикселей. Разумеется, данные для промежуточных значений диаметров тоже вычисляются, но на рисунке не приводятся.

Графики представлены плоскими в виде полутоновых изображений, элементы которых тем ярче, чем большее значение имеет C_N при данных x и y . Оси умышленно не изображены, координата $(0, 0)$ находится в центре каждого изображения. Для наглядности яркость и контраст увеличены так, чтобы самый яркий участок принимал значение 255, а самый тёмный — 0. На каждом из графиков точка, при которой C_N имеет максимальное значение, дополнительно отмечена красным пикселем. На некоторых графиках можно увидеть, что максимуму могут соответствовать одновременно несколько точек, в этих случаях за

максимальную взята та точка, которая в массиве данных встретилась первой. На рис. 5 численное значение максимума C_N каждого эталона дано под соответствующим графиком.

Также для наглядного понимания графики имеют те же размеры, что и исходный анализируемый фрагмент, т. е., например, x представлен в диапазоне от $-w/2$ до $+w/2$, в то время как фактически данные вычисляются для x в диапазоне от $-(w - w_p)/2$ до $+(w - w_p)/2$, о чём уже было упомянуто ранее. Для x и y вне вычисляемого диапазона приведены значения $C_N = 0$. Дополнительно под графиками представлены изображения, полученные путём наложения на анализируемые изображения в синих полутонах изображений эталонов в зелёных полутонах с координатами смещения, соответствующими координатам максимумов $C_N(x, y)$ для данных эталонов. Они помогают визуально оценить совпадение вычисленной координаты и размера круга-эталона с изображением шарика на анализируемом фрагменте.

Как показано на рис. 5, наибольшее значение меры совпадения эталона с анализируемым изображением составляет 0,569 и соответствует эталону с кругом диаметром 40 пикселей при его смещении таким образом, чтобы центр круга оказался в точке $x = +10$, $y = -6$ пикселей относительно центра анализируемого изображения. На совмещённом изображении под графиком также видно совпадение круга-эталона с изображением шарика. Обратим внимание на то, что даже при максимальном взаимном соответствии на границе круга-эталона имеются как полностью синие, так и полностью зелёные пиксели. Это следствие того, что форма изображения шарика является близкой к круглой, но не идеальной.

В ходе апробации алгоритма на различных изображениях проволочных соединений с образованием шарика точность измерений координаты и диаметра составила один пиксель. Для визуальной проверки результатов поверх исходного изображения накладывались эталоны с изображением круга диаметром, соответствующим результату измерений, а также эталоны с изображением круга меньшего и большего диаметров. При визуальном сравнении каждый раз оказывалось, что измеренный диаметр являлся самым подходящим (с учётом отклонений изображения шарика от идеальной круглой формы).

Таким образом, наглядно продемонстрирована фактическая возможность одновременного измерения и координаты места проволочного соединения с образованием шарика, и размера шарика. Решение о том, является ли соединение дефектным или нет, принимается исходя из того, находится ли данная координата в допустимой окрестности или выходит за её пределы, а также является ли данный диаметр допустимым или нет.

Особые случаи. Ещё одним дефектом, помимо некорректных значений координаты и/или величины диаметра шарика (т. е. значений вне допустимых диапазонов), является отсутствие соединения как такового там, где оно должно быть. Для проверки работоспособности описанного алгоритма анализа фрагментов изображений дополнительно были выбраны области с преднамеренно отсутствующими соединениями на поверхности полупроводникового кристалла. Кроме того, дополнительно исследовались случаи, когда в поле зрения попадают два соединения одновременно, несмотря на то, что такой случай противоречит изначально поставленным условиям.

На рис. 6 показан пример двух фрагментов изображений, в одном из которых имеются два соединения, а в другом — ни одного. Рядом с каждым из фрагментов показаны подготовленные для анализа изображения с порогом 80 % и графические представления значений C_N в зависимости от смещений x и y .

В случае, когда на изображении имеются два соединения, на графике видно два характерных максимума. В качестве итогового результата всегда выбирается одно значение — максимальное — такова работа алгоритма. На приведённом примере максимальное значение составляет 0,602. В случае, когда на изображении вообще нет соединений, максимум

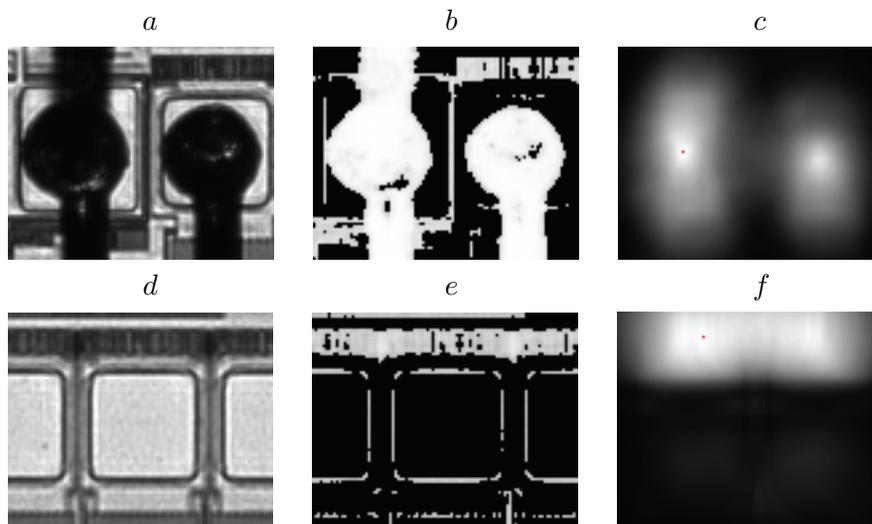


Рис. 6. Примеры работы алгоритма в особых случаях: *a* — исходное изображение двух соединений в одном поле зрения, *b* — подготовленное изображение этого же фрагмента, *c* — график распределения меры соответствия для наиболее подходящего по размеру эталона, *d* — исходное изображение с отсутствующими соединениями, *e* — подготовленное изображение, *f* — график распределения меры соответствия

тоже рассчитывается. В данном примере его величина оказалась равной 0,082, что на порядок меньше значения для случая, когда соединение присутствует. На рис. 6, *f* значения выглядят такими же яркими, как и на рис. 6, *c*, за счёт увеличения контрастности для большей наглядности. При демонстрации в едином масштабе значения на рис. 6, *f* оказались бы слабо различимы.

Экспериментальным путём установлено, что при наличии на фрагменте изображения соединения вычисленное значение меры совпадения всегда оказывается выше 0,45, а при отсутствии соединения оно не превышает 0,15. Таким образом, значение максимума выше или ниже 0,45 может быть использовано как косвенный показатель наличия или отсутствия соединения в анализируемой окрестности. Впрочем, при других условиях съёмки, при другой структуре поверхности анализируемого полупроводника и при иных толщинах прикрепляемого проводника данные пороговые величины могут оказаться иными. А теоретическое вычисление значений порогов и их обоснование требуют отдельного дополнительного исследования.

Что касается двух максимумов, то случай, когда в анализируемом фрагменте изображения оказываются два соединения вместо одного, является следствием некорректного выбора параметров перед анализом. Если по чертежу на один контакт должно быть прикреплено два проволочных вывода, то ещё на этапе составления карты анализируемых фрагментов следует их разделить на две отдельные области. Если же в одном поле зрения окажутся два соединения в результате ошибки монтажа, то это означает, что в каком-то другом фрагменте этого соединения не возникнет, и дефект в любом случае будет выявлен. Ситуация, когда на поверхности кристалла оказывается просто «лишний» проводник, невозможна из-за особенностей технологии производства.

На этапе тестирования в случаях, когда изображения соединений попадали на границу анализируемого фрагмента и получались частично обрезанными, чаще всего (но не всегда) в результате вычислений значение максимума оказывалось выше порогового, но при этом по очевидным причинам диаметр соединения часто измерялся некорректно и был

меньше реального. Такие случаи определялись как дефектные по вычисленной координате расположения центра соединения, поскольку он находился вне допустимой окрестности. Соответственно, достоверность величины измеренного диаметра для таких соединений становилась неважной. Если же значение максимума оказывалось меньше порогового, то дефект определялся уже как отсутствующее соединение, несмотря на его фактическое наличие.

Заключение. Апробация предложенной методики вычисления координаты положения круглого объекта и вычисления его диаметра показала реализуемость и практическую применимость. Алгоритм анализа фрагментов изображений, основанный на предложенной методике, позволяет решать несколько задач в составе приложения на установке неразрушающего контроля при производстве интегральных микросхем перед их корпусированием, а именно: позволяет определять наличие или отсутствие проволочного соединения с образованием шарика на поверхности полупроводника или подложки, а также измерять диаметр шарика и его координату.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Chauhan P. S., Choubey A., Zhong Z., Pecht M. G.** Copper Wire Bonding. N. Y.: Springer, 2014. 235 p. DOI: 10.1007/978-1-4614-5761-9.
2. **Gan C. L., Hashim U.** Evolutions of bonding wires used in semiconductor electronics: Perspective over 25 years // Journ. Mater. Sci: Mater Electron. 2015. **26**. P. 4412–4424. DOI: 10.1007/s10854-015-2892-8.
3. **Zhou H., Chang A., Fan J. et al.** Effects of Process Parameters on Bond Properties of Ag-2.35Au-0.7Pd-0.2Pt-0.1Cu Alloy Wire // Micromachines. 2023. **14**, Iss. 8. DOI: 10.3390/mi14081587.
4. **An B., Zhou H., Cao J. et al.** A Review of Silver Wire Bonding Techniques // Micromachines. 2023. **14**, Iss. 11. DOI: 10.3390/mi14112129.
5. **Gonzalez R. C., Woods R. E.** Digital Image Processing. 4th Ed. N. Y.: Pearson Education, 2018. 1022 p.
6. **Шипко В. В., Самойлин Е. А., Пожар В. Э., Мачихин А. С.** Выделение контуров на гиперспектральных изображениях // Автометрия. 2021. **57**, № 6. С. 67–75. DOI: 10.15372/AUT20210607.

Поступила в редакцию 01.03.2024

После доработки 12.07.2024

Принята к публикации 24.07.2024
