

Повышение эффективности алгоритма автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем

Б.В. Ширяев^{1,2}, Д.П. Аргунов^{1,2}

¹Научно-исследовательский институт полупроводниковых приборов, г. Томск

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники, г. Томск, shiryayev_bv@niipp.ru

Аннотация — В работе приведен разработанный авторами алгоритм автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем и описываются его модификации для повышения эффективности. Осуществленные модификации заключаются в изменении порядка расчёта карты дефектности, введении расчёта средневзвешенного пиксельного расстояния и в изменении веса слоёв фотошаблона. Проведенное тестирование модификаций на наборах микрофотографий монолитных интегральных схем различных топологий показало, что изменение порядка расчёта карты дефектности и изменение коэффициента веса слоёв фотошаблона позволили существенно повысить повторяемость ручного визуального контроля до 98%.

Ключевые слова — визуальный контроль, дефектоскопия, карта дефектности, искусственная нейронная сеть, МИС.

I. ВВЕДЕНИЕ

Визуальным контролем называют метод обнаружения и анализа внешних дефектов промышленных изделий, возникающих на различных этапах производства, осуществляемый оператором или специальным устройством с использованием оптических средств [1]. Визуальный контроль при производстве монолитных интегральных схем (МИС) является одним из этапов выходного контроля. Он позволяет отсортировать потенциально нерабочие МИС, снизить степень износа тестовых зондов посредством уменьшения числа касаний и оценить общий внешний вид выпускаемой продукции. Изготовленная МИС по визуальному признаку оценивается в нескольких категориях: качественный анализ поверхностей элементов топологии МИС, отсутствие повреждений и загрязнений, точность повторения топологии фотошаблона и другие [2], [3].

Современные масштабы выпуска МИС и дискретных полупроводниковых приборов огромны и ручной визуальный контроль не позволяет качественно осуществить данный технологический этап из-за требований большого количества времени и усилий со стороны контролирующего оператора. Длительная работа по осуществлению визуального контроля приводит к чрезмерной утомляемости зрения оператора и снижению качества данного контроля.

Решается эта задача посредством использования систем автоматизированного визуального контроля. При этом готовые системы имеют высокую стоимость и являются импортной продукцией [4], [5].

Ранее авторами был разработан алгоритм визуального контроля [6], позволяющий осуществлять поиск дефектов металлизации и диэлектрических слоёв топологии МИС. Однако, необходимость повышения качества автоматизированного контроля и улучшение сходимости результатов с ручным визуальным контролем требует его усовершенствования. Ввиду этого была поставлена **цель работы**: произвести модификацию этапов алгоритма автоматизированного визуального контроля с сохранением последовательности обработки микрофотографии и повышением повторяемости ручного визуального контроля.

В статье рассматривается визуальный контроль на основе оптической микроскопии в отражённом свете СВЧ МИС с линейными размерами видимых элементов топологии более 10 мкм.

II. АЛГОРИТМ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ

Разработанный авторами первоначальный алгоритм автоматизированного визуального контроля (далее алгоритм) структурно представлен на рис. 1.

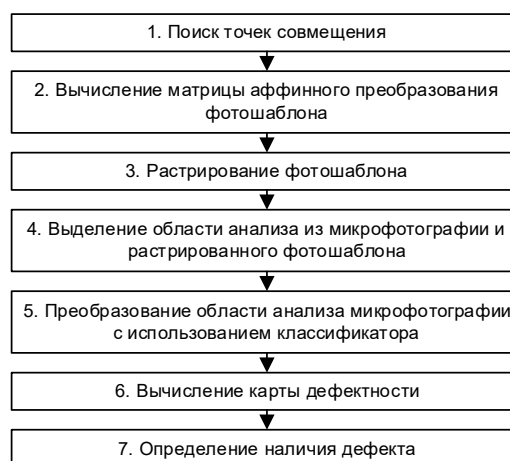


Рис. 1. Схема алгоритма автоматизированного визуального контроля

Алгоритм производит последовательную обработку и сравнение исходных микрофотографии МИС и чертежа фотошаблона в векторном формате «.dxf». В процессе обработки алгоритм по количественным и качественным показателям находит отличия и определяет наличие дефектов. Результатом работы алгоритма является карта дефектности МИС в масштабе микрофотографии, отображающая дефектные участки.

А. Поиск точек совмещения

Для поиска различий между растровой микрофотографией и векторным фотошаблоном следует их совместить, используя точки совмещения. Данные точки совмещения не могут являться точками совмещения, которые используются в технологическом процессе для совмещения разных слоёв топологии МИС.

Структура используемой точки совмещения состоит из изображения ключевого элемента поиска (угол МИС или другой ключевой элемент топологии МИС) в масштабе микрофотографии (рис. 2), размер и положение области поиска на микрофотографии, векторные координаты точного положения изображения точки совмещения на фотошаблоне.

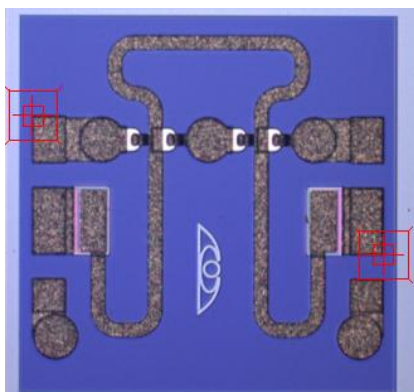


Рис. 2. Пример поиска точек совмещения на микрофотографии: изображения точек совмещения (слева) и найденные точки совмещения (справа)

Определение положения точек совмещения на микрофотографии осуществляется путём поиска координаты точки $P(x,y)$ положения изображения точки совмещения с минимальным значением коэффициента расхождения, который вычисляется по следующей формуле:

$$K_{x,y} = \sum (R_{x+i,y+j} - R_{i,j}^{TC})^2 + \sum (G_{x+i,y+j} - G_{i,j}^{TC})^2 + \sum (B_{x+i,y+j} - B_{i,j}^{TC})^2, \quad (1)$$

где $R_{x+i,y+j}$, $G_{x+i,y+j}$, $B_{x+i,y+j}$ – компоненты цвета RGB формата области поиска точки совмещения на микрофотографии;

$R_{i,j}^{TC}$, $G_{i,j}^{TC}$, $B_{i,j}^{TC}$ – компоненты цвета RGB формата изображения точки совмещения.

Для ускорения работы данного шага алгоритма используются методы частичного поиска шаблона на

изображении с использованием ключевых точек шаблона [7], [8].

В. Вычисление матрицы аффинного преобразования фотошаблона

При известных координатах точек совмещения в масштабе фотошаблона и микрофотографии можно вычислить коэффициенты преобразования векторных координат фотошаблона в растровые координаты микрофотографии, которые удобнее выражать в виде матрицы аффинного преобразования:

$$M = \begin{pmatrix} m_{11} & m_{12} & 0 \\ m_{21} & m_{22} & 0 \\ m_{31} & m_{32} & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где $m_{11}, m_{12}, m_{21}, m_{22}, m_{31}, m_{32}$ – элементы матрицы аффинного преобразования.

Раскрытые матричные операции преобразования координат из векторного пространства фотошаблона в растровое пространство микрофотографии можно записать в следующей форме:

$$\begin{aligned} p_{ix} &= v_{ix} * m_{11} + v_{iy} * m_{21} + m_{31} \\ p_{iy} &= v_{ix} * m_{12} + v_{iy} * m_{22} + m_{32} \end{aligned} \quad (3)$$

где v_{ix}, v_{iy} – абсцисса и ордината точек совмещения в масштабе фотошаблона;

p_{ix}, p_{iy} – абсцисса и ордината точек совмещения в масштабе микрофотографии.

Использование метода наименьших квадратов позволяет найти коэффициенты матрицы аффинного преобразования, позволяющие с максимальным коэффициентом корреляции совместить фотошаблон и микрофотографию для дальнейшего растривания фотошаблона [9].

С. Растривание фотошаблона

Фотошаблон представлен в виде цифрового файла векторного изображения в формате «.dxf» [10], который используется при изготовлении физических фотошаблонов для проведения фотолитографии или для создания подпрограммы для электронной литографии. Для проведения автоматизированного визуального контроля на основе чертежа фотошаблона требуются определённые слои и участки, которые формируют внешний вид конкретной МИС. Набор слоёв и их последовательность выбираются на этапе подготовки алгоритма, так как последовательность слоёв в файле «.dxf» может не соответствовать реальной последовательности фотошаблонов при изготовлении.

В процессе растривания над векторным фотошаблоном производятся следующие операции:

- 1) выбор необходимых слоёв из файла «.dxf»;
- 2) формирование необходимой последовательности растривания слоёв для формирования «правильного» изображения эталонной МИС;

- 3) преобразование каждой точки полигонов каждого выбранного слоя фотошаблона с использованием матрицы аффинного преобразования, полученной на предыдущем шаге алгоритма;
- 4) отрисовка полигонов каждого слоя фотошаблона, используя преобразованные точки;
- 5) закрашивание каждого полигона цветом слоя фотошаблона, к которому он принадлежит и формирование палитры эталонной МИС (рис. 3).

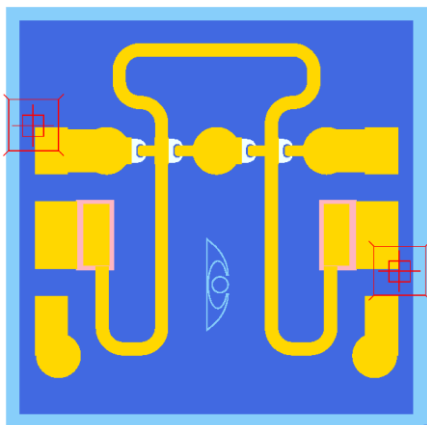


Рис. 3. Растриваемый фотошаблон в масштабе микрофотографии с отмеченными точками совмещения

Растривание фотошаблона необходимо для дальнейшего попиксельного сравнения его с микрофотографией МИС.

D. Выделение области анализа

Анализируемая микрофотография МИС получается в процессе автоматизированной съёмки полупроводниковой пластины на полуавтоматической, автоматической зондовой станции или станции визуального контроля. При наведении микроскопа на интересующую МИС в объектив фотокамеры микроскопа также попадают участки соседних МИС. Избавиться от этих участков уменьшением области интереса (ROI) нельзя из-за существования незначительного смещения и поворота МИС в объективе микроскопа.

Введение шага алгоритма выделения области анализа позволяет исключить попадание участков соседних МИС в процесс анализа дефектности интересующей МИС. При необходимости область анализа может содержать отдельный элемент топологии МИС, для которого настроены особые требования.

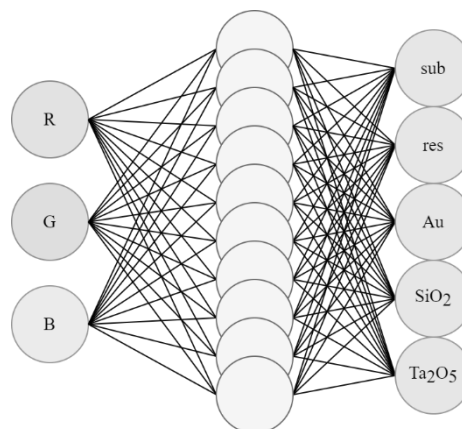
Координаты области анализа привязаны к векторным координатам фотошаблона и одинаковы для всех анализируемых МИС.

E. Преобразование микрофотографии

Микрофотография, полученная с использованием оптической микроскопии в видимом диапазоне, содержит множество цветов (при использовании формата RGB 24bit количество цветов до 16,8 млн). Для корректного сравнения цвета пикселей на

микрофотографии и растриваемом фотошаблоне, цвета пикселей микрофотографии МИС следует «перекрасить» в цветовую палитру растриваемого фотошаблона. Для этой задачи используется классификатор на основе обученной искусственной нейронной сети, который может «непрерывное» множество цветов формата RGB 24bit преобразовать в цветовую палитру растриваемого фотошаблона.

Классификатор является многослойной искусственной нейронной сетью, состоит из входного слоя с тремя нейронами (соответствует количеству каналов цветового пространства RGB), одного скрытого слоя с 10 нейронами и выходного слоя с количеством нейронов равному количеству классифицируемых областей фотошаблона (рис. 4).



sub – подложка, *res* – резистивный слой,
Au – слой металлизации, *SiO₂* – слой оксида кремния,
Ta₂O₅ – слой оксида тантала

Рис. 4. Пример архитектуры нейронной сети, используемой в качестве классификатора пикселей

Цвет каждого пикселя области анализа микрофотографии претерпевает нормализацию, так как область чувствительности искусственной нейронной сети находится в области значений от 0 до 1. Нормализация осуществляется делением каждой компоненты цвета пикселя на максимальное значение компоненты цвета (для формата RGB 24bit на 255).

В результате преобразования цвета пикселя искусственной нейронной сетью получается вектор значений принадлежности данного цвета к той или иной области фотошаблона. Далее выбирается наибольшее значение из данного вектора и пиксель перекрашивается в цвет слоя фотошаблона, к которому относится данное значение. В результате преобразования получается микрофотография, раскрашенная в палитре растриваемого фотошаблона.

Искусственная нейронная сеть предварительно обучена методом обратного распространения ошибки классифицировать пиксели к определённой области фотошаблона [11].

F. Вычисление карты дефектности

Сравнение преобразованной микрофотографии МИС с растриванным фотошаблоном осуществляется попиксельно: для каждого пикселя микрофотографии производится поиск ближайшего по положению пикселя растриванного фотошаблона того же цвета. В качестве результата операции принимается пиксельное расстояние (рис. 5).

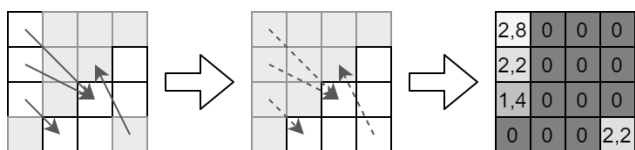


Рис. 5. Пример вычисления пиксельного расстояния

В результате работы алгоритма по всей преобразованной микрофотографии получается карта дефектности МИС. Если её нормировать по максимальному значению и раскрасить в чёрно-белые цвета, то можно визуально оценить положение дефекта на микрофотографии СВЧ МИС (рис. 6).

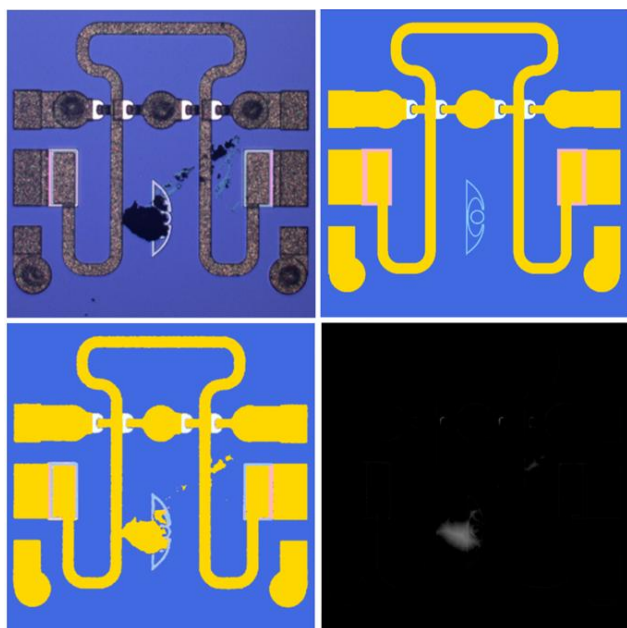


Рис. 6. Пример вычисленной карты дефектности на основе преобразованной микрофотографии МИС с дефектом

G. Поиск и определение наличия дефекта на карте дефектности

Ключевыми критериями наличия дефекта на карте дефектности являются порог детектирования дефекта и максимальный допустимый размер дефекта.

Порог детектирования дефекта определяет пиксельное расстояние, при котором текущий пиксель микрофотографии удалён от своей области фотошаблона на расстояние больше заданного и является дефектом. С использованием данного порога над картой дефектности производится бинарное преобразование. Ввод данного параметра позволяет

снизить чувствительность алгоритма и исключить несущественные отклонения топологии МИС от фотошаблона, незначительную ошибку совмещения микрофотографии и фотошаблона и аберрации оптической системы съёмки микрофотографий СВЧ МИС при оптической микроскопии.

После бинарного преобразования карты дефектности производится кластеризация выделенных дефектов в группы. Критерий объединения в группы – наличие соседних дефектных пикселей (4 соседних пикселей по вертикали и горизонтали).

Максимальный допустимый размер дефекта определяет максимально возможный линейный размер кластера дефектных пикселей, который не считается дефектом. Если существует хотя бы один кластер дефектных пикселей, который не удовлетворяет условию максимального допустимого дефекта, МИС на микрофотографии считается бракованной. Введение данного параметра в алгоритм объясняется наличием незначительного цифрового шума на микрофотографиях и небольших загрязнений, которые не являются дефектами МИС и не влияют на её работоспособность.

III. МОДИФИКАЦИИ АЛГОРИТМА

Для повышения сходимости алгоритма с ручным визуальным контролем были предложены и реализованы три модификации: изменение порядка расчёта карты дефектности, расчёт средневзвешенного пиксельного расстояния и изменение веса слоёв фотошаблона.

A. Расчёт карты дефектности

Первой модификацией разработанного алгоритма является изменение порядка расчёта карты дефектности (6 шаг алгоритма). В модификации алгоритма пиксельное расстояние вычисляется от растриванного фотошаблона до преобразованной микрофотографии. Данное значение показывает, как сильно изменились размеры и положение топологии относительно исходного значения. Отсутствие необходимого элемента топологии в указанном месте приведёт к получению максимального значения элемента карты дефектности, который не будет подавлен бинарным преобразованием по порогу детектирования дефекта (7 шаг алгоритма).

B. Расчёт средневзвешенного пиксельного расстояния

Вторая модификация алгоритма заключается в учитывании всех предположений классификатора на основе искусственной нейронной сети о принадлежности пикселя микрофотографии той или иной области фотошаблона.

Иногда области разных топологических слоёв имеют схожие цвета. Из-за эвристической основы используемого классификатора на основе предварительно обученной искусственной нейронной сети (критерий окончания обучения искусственной нейронной сети: ошибка на тестовом наборе менее 1%)

есть вероятность ошибки, когда классификатор неверно определяет принадлежность цвета той или иной области фотошаблона. Однако, используя полный результат работы классификатора: вектор значений принадлежности данного цвета к той или иной области фотошаблона (на шаге 5 алгоритма) и произведя вычисление пиксельного расстояния для всех областей фотошаблона для каждого пикселя области анализа микрофотографии (шаг 6 алгоритма) можно вычислить средневзвешенное пиксельное расстояние для каждого значения карты дефектности:

$$d_{x,y} = \frac{\sum vec_i \cdot dist_i}{\sum vec_i}, \quad (4)$$

где $d_{x,y}$ – значение элемента карты дефектности по координатам (x,y);

vec_i – элемент вектора значений принадлежности данного цвета к i области фотошаблона, полученного в результате работы классификатора;

$dist_i$ – пиксельное расстояние от текущего пикселя микрофотографии до ближайшего пикселя растрованного фотошаблона, принадлежащего i области.

С. Изменение веса слоёв фотошаблона

Активные и пассивные элементы топологии МИС часто имеют мелкие важные детали, которые определяют работоспособность схемы. Например, диэлектрик конденсатора незначительно выступает из-под обкладок. Отсутствие данного выступа с высокой вероятностью означает короткое замыкание обкладок данного конденсатора.

Для повышения значимости таких элементов топологии в алгоритм был добавлен коэффициент веса слоёв фотошаблона. Данный коэффициент применяется на этапе 6 алгоритма: полученное пиксельное расстояние умножается на коэффициент веса слоя фотошаблона, к которому принадлежит исходный пиксель микрофотографии.

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕСТИРОВАНИЯ ВВЕДЕННЫХ МОДИФИКАЦИЙ АЛГОРИТМА

Для оценки разработанных модификаций алгоритма было разработано тестовое программное обеспечение на основе ранней реализации алгоритма. Эффективность каждой модификации определялась методом сравнения показателя сходимости модифицированного алгоритма и ручного визуального контроля со сходимостью исходного алгоритма. Тестирование производилось на различных топологиях СВЧ МИС различной сложности. Планарная линия (рис. 7а): мелкие элементы топологии отсутствуют, размер МИС 500x500 мкм, минимальный детектируемый дефект до 20 мкм. СВЧ МИС аттенюатора 2 дБ (рис. 7б): минимальный размер резистивных элементов 10 мкм, размер МИС 500x500 мкм, минимальный детектируемый дефект до 120 мкм. МИС смещения по постоянному току (рис. 7с): минимальный размер шага катушки индуктивности 20 мкм, размер МИС 950x1050 мкм,

минимальный детектируемый дефект до 60 мкм. МИС ограничителя СВЧ мощности (рис. 7д): минимальная ширина элемента металлизации 50 мкм, размер МИС 1200x1200 мкм, минимальный детектируемый дефект до 60 мкм. Разрешение используемых микрофотографий МИС 1,5-2,0 мкм/пикс. Результаты тестирования приведены в табл. 1.

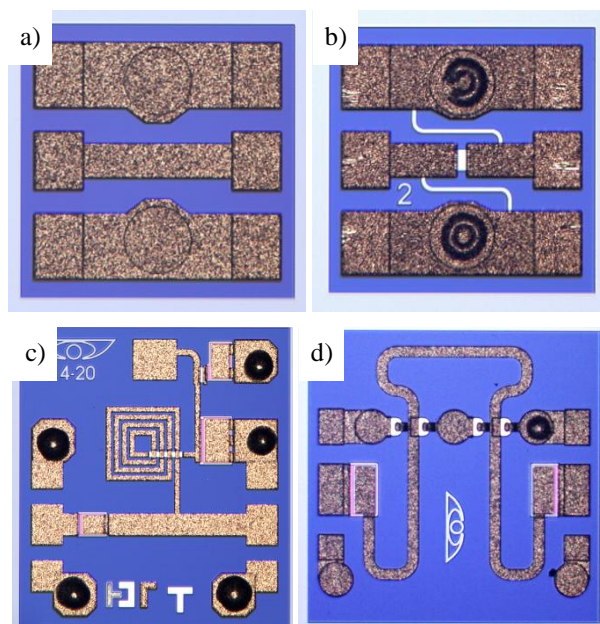


Рис. 7. Примеры микрофотографий МИС: планарная линия (а), СВЧ МИС аттенюатора 3 дБ (б), МИС смещения по постоянному току (с), МИС ограничителя СВЧ мощности (д)

Результаты тестирования показали высокую эффективность модификации алгоритма с изменением веса слоёв фотошаблона (Ш.С), другие модификации тестировались уже с ней.

Таблица 1

Повторяемость ручного визуального контроля различными модификациями алгоритма

	Исходный алгоритм	Ш.А+Ш.С	Ш.В+Ш.С	Ш.С
Планарная линия	до 85%	94-98%	80-84%	до 90%
СВЧ МИС аттенюатора 2 дБ	до 80%	92-93%	81-83%	до 89%
МИС смещения по постоянному току	до 75%	до 93%	60-64%	до 81%
МИС ограничителя СВЧ мощности	до 77%	90-93%	–	до 80%

Эффективность модификации с изменением порядка вычисления карты дефектности от фотошаблона до микрофотографии (Ш.А) выше, чем у исходного алгоритма. Данная модификация позволяет определять дефект «напыления» химически осаждённой металлизации на малые элементы топологии МИС (рис. 8).

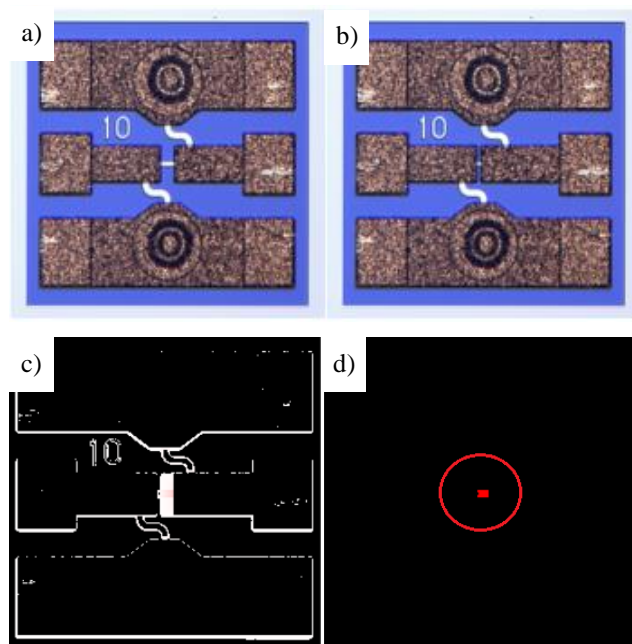


Рис. 8. Бездефектная МИС (а), дефект «напыла» металлизации (б), карта дефектности (с), обнаруженный дефект «напыла» металлизации на резистор (д)

Модификация алгоритма с вычислением средневзвешенного пиксельного расстояния (Ш.В) показала свою неэффективность: элементы вектора значений принадлежности цвета к области фотошаблона wes_i из формулы (4) для второго и третьего элементов по величине не сильно отличаются от максимального. Из-за этого в общую сумму ошибочно вводятся пиксельные расстояния для слоёв топологии, которые не относятся к текущему пикселю микрофотографии. Исправление ошибок классификатора на шаге 5 алгоритма привело к возникновению большего числа ошибок на шаге 6 алгоритма.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проделанной работы были разработаны, реализованы и протестированы три модификации существующего алгоритма автоматизированного визуального контроля монолитных интегральных схем.

Показано что две осуществленные модификации (изменение порядка расчёта карты дефектности и изменение коэффициента веса слоёв фотошаблона)

позволили существенно повысить повторяемость ручного визуального контроля до 98%. Модификация алгоритма с вычислением средневзвешенного пиксельного расстояния показала свою неэффективность и требует существенной доработки.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена с поддержкой в рамках Программы стратегического академического лидерства «Приоритет 2030», а также при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках соглашения №075-03-2020-237/1 от 05 марта 2020 г. (внутренний номер проекта FEWM-2020-0040).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Груздов В.В. Контроль новых технологий в твердотельной СВЧ электронике / В.В. Груздов, Ю.В. Колковский, Ю.А. Концевой. – М.: ТЕХНОСФЕРА, 2016. – 328 с.
- [2] ГОСТ 20.57.406-81. Комплексная система контроля качества. Изделия электронной техники, квантовой электроники и электротехнические. Методы испытаний. М.: Стандартинформ, 2005. – 133 с.
- [3] Test method standard microcircuits // [Электронный ресурс]. URL: <http://scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf> (дата обращения: 20.06.2022)
- [4] KLA-Tencor Candela CS-20. Установка для автоматизированной инспекции поверхности на производстве. [Электронный ресурс]. URL: http://www.rusnanonet.ru/equipment/candela_cs20/ (дата обращения: 22.06.2022)
- [5] MicroProf® AP Flexible Multi-sensor Metrology Tool for Advanced Packaging. [Электронный ресурс]. URL: <https://frtmetrology.com/produkte/microprof/microprof-ap/> (дата обращения: 22.06.2022)
- [6] Shiryayev B.V. Algorithm for automated visual inspection of MMIC using a classifier based on neural networks / B.V. Shiryayev, A.V. Bezruk, D.P. Argunov, A.Y. Yushchenko. – DOI 10.1051/itmconf/20193004012. – Text : electronic // ITM Web of Conferences. – 2019. – Vol. 30. – P. 04012.
- [7] Template Matching OpenCV. [Электронный ресурс]. URL: https://docs.opencv.org/4.5.1/de/da9/tutorial_template_matching.html (дата обращения: 23.06.2022)
- [8] Нахождение объектов на картинках. [Электронный ресурс]. URL: <https://habr.com/ru/company/joom/blog/445354/> (дата обращения: 23.06.2022)
- [9] Ширяев. Б.В., Аргунов Д.П., Безрук А.В. Алгоритм совмещения векторного чертежа фотошаблона и микрофотографии СВЧ МИС с помощью метода наименьших квадратов // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 13–30 мая 2020 г.: в 2 частях. – Томск: В-Спектр, 2020. – Ч. 2. – С. 41-43.
- [10] DXF Reference. [Электронный ресурс]. URL: https://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_2012_pdf_dxf-reference_enu.pdf (дата обращения: 23.06.2022)
- [11] Нейронная сеть – обучение ИНС с помощью алгоритма обратного распространения. [Электронный ресурс]. URL: <https://robocraft.ru/blog/algorithm/560.html> (дата обращения: 23.06.2022)

Improving Efficiency of Automated Monolithic Integrated Circuits Visual Inspection Algorithm

B.V. Shiryayev^{1,2}, D.P. Argunov^{1,2}

¹Research Institute of Semiconductor Devices, Tomsk

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, shiryayev_bv@niipp.ru

Abstract — The article describes an algorithm of automated visual inspection of monolithic integrated circuits (MIC) and the algorithm modifications improving its efficiency.

The algorithm is the following sequence of a MIC microphotograph and a photomask processing: search for two or more matching points, calculation of the affine transformation matrix from vector coordinates of the photomask to raster coordinates of the MIC microphotograph, photomask rasterization to the scale of the MIC microphotograph, selection of the analysis area from the MIC microphotograph and the rasterized photomask, transformation of the MIC microphotograph by a classifier based on artificial neural network, calculation of the defect map, and search for anomalies on the defects map.

The first modification of the algorithm is to change the order of the defect map calculation from the photomask to the microphotograph. This makes it possible to estimate the change in the MIC reference image. The second modification is to calculate the weighted average pixel distance of the defect map. This makes it possible to estimate the error responses of the classifier based on the artificial neural network. The third modification makes it possible to change the weight factor of the photomask layers, which makes it possible to specify the most important elements of the MIC topology.

After the modification of the algorithm, its work was tested on sets of MIC microphotographs of different topologies. The test results were compared to the test results of the original algorithm. The results showed an increase in the efficiency of the algorithm by changing the order of defect map calculation and changing the weight coefficient of the photomask layers. The repeatability of automated visual inspection with manual inspection after the modification increased to 98%.

Keywords — visual inspection, defectoscopy, defect map, artificial neural network, MIC.

REFERENCES

- [1] Gruzdom V.V. Kontrol' novykh tekhnologiy v tverdotel'noj SVCH elektronike (Control of new technologies in solid-state microwave electronics) / V.V. Gruzdom, YU.V. Kolkovskij, YU.A. Koncevoj. – M.: TEKHNOFERA, 2016. – 328 s.
- [2] GOST 20.57.406-81. Kompleksnaya sistema kontrolya kachestva. Izdeliya elektronnoj tekhniki, kvantovoj elektroniki i elektrotekhnicheskije. Metody ispytanij. (Comprehensive quality control system. Products of electronic engineering, quantum electronics and electrotechnical. Test methods) M.: Standartinform, 2005. – 133 s.
- [3] Test method standard microcircuits. Available at: <http://scipp.ucsc.edu/groups/fermi/electronics/mil-std-883.pdf> (access date: 20.06.2022)
- [4] KLA-Tencor Candela CS-20. Machine for automated surface inspection in manufacturing. Available at: http://www.rusnanonet.ru/equipment/candela_cs20/ (access date: 22.06.2022)
- [5] MicroProf® AP Flexible Multi-sensor Metrology Tool for Advanced Packaging. Available at: <https://frtmetrology.com/produkte/microprof/microprof-ap/> (access date: 22.06.2022)
- [6] Shiryayev B.V. Algorithm for automated visual inspection of MMIC using a classifier based on neural networks / B.V. Shiryayev, A.V. Bezruk, D.P. Argunov, A.Y. Yushchenko. – DOI 10.1051/itmconf/20193004012. – Text : electronic // ITM Web of Conferences. – 2019. – Vol. 30. – P. 04012.
- [7] Template Matching OpenCV. Available at: https://docs.opencv.org/4.5.1/de/da9/tutorial_template_matching.html (access date: 23.06.2022)
- [8] Nakhozhdeniye ob"yektov na kartinkakh. (Finding objects in pictures) Available at: <https://habr.com/ru/company/joom/blog/445354/> (access date: 23.06.2022)
- [9] Shiryayev. B.V., Argunov D.P., Bezruk A.V. Algoritm sovmeshcheniya vektornogo chertezha fotoshablona i mikrofotoigrafii SVCH MIS s pomoshch'yu metoda naimen'shih kvadratov (Algorithm for alignment the vector drawing of a photomask and the microphotography of a MMIC using the least squares method) // Sbornik izbrannyh statej nauchnoj sessii TUSUR, Tomsk, 13–30 maya 2020 g.: v 2 chastyah. – Tomsk: V-Spektr, 2020. – CH. 2. – S. 41–43.
- [10] DXF Reference. Available at: https://images.autodesk.com/adsk/files/autocad_2012_pdf_dxf-reference_enu.pdf (access date: 23.06.2022)
- [11] Nejronnaya set' – obuchenie INS s pomoshch'yu algoritma obratnogo rasprostraneniya. (Neural Network - ANN Training Using the Back Propagation Algorithm) Available at: <https://robocraft.ru/blog/algorithm/560.html> (access date: 23.06.2022)