

В. А. ИВАНОВ, В. П. КОСЫХ

(Новосибирск)

АЛГОРИТМ СРАВНЕНИЯ ФРАГМЕНТОВ ИЗОБРАЖЕНИЙ ДВУХ КРИСТАЛЛОВ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ВНЕШНЕГО ВИДА МИКРОСХЕМ

Введение. Контроль внешнего вида кристаллов интегральных схем позволяет выделить дефекты (царапины, сколы, растравы, инородные частицы и пр.), не нарушающие функционирования схемы и потому не обнаруженные на этапе функционального контроля, но влияющие на надежность и срок службы схемы [1]. Субъективность и низкая достоверность визуального контроля требуют автоматизации обнаружения дефектов внешнего вида на основе объективных количественных критериев. Важной особенностью этой задачи является необходимость включения средств контроля в технологическую цепь изготовления интегральных схем, что влечет за собой жесткие требования к производительности, надежности, простоте обслуживания и стоимости оборудования. Для уменьшения количества вычислений и увеличения производительности обычно уже при считывании изображение кристалла приводится к некоторому ограниченному набору параметров, относительно которого и делается вывод о наличии или отсутствии дефекта [2]. В данной работе обсуждается другой подход, при котором обнаружение дефекта основывается на сравнении исследуемого изображения с эталоном [3], где эталоном является изображение аналогичного кристалла. Цель работы — рассмотреть обнаружение дефектов топологии кристалла как задачу поиска отличий на паре изображений с тем, чтобы выявить влияние условий формирования изображений на надежность обнаружения. Совмещение пары изображений осуществляется программно с использованием алгоритма из [4].

Аппаратура формирования изображений кристалла. В качестве датчика изображения используется телевизионная камера на видеоконе, связанная через 6-разрядный аналого-цифровой преобразователь со специализированной памятью (видеобуфером), которая доступна ЭВМ для чтения-записи. Камера установлена на металлографическом микроскопе, обеспечивающем наблюдение кристалла в светлом и темном полях. Цифровое изображение содержит 384×256 элементов с 6-разрядным представлением яркости. Геометрические искажения составляют примерно 2 % от размеров кадра, неравномерность яркости по полю, обусловленная неравномерностью освещения и чувствительности видеокон, достигает 15 %, а среднеквадратичное значение шума камеры — около 3 % от диапазона представления сигнала.

Особенности изображений кристаллов. Изображение кристалла можно рассматривать как кусочно-ступенчатую функцию яркости, сформированную в основном верхним слоем металлизации и просвечивающими через защитный слой нижележащими слоями. Внутренние слои проявляются также в виде резких линий шириной от 1 до 3 дискрет, «врезанных» в изображение верхних слоев и соответствующих границам элементов структуры. Верхний слой металлизации имеет гранулярную структуру, внутренние слои выглядят гладкими, постоянной яркости. Соотношение яркостей слоев практически неизменно в пределах одного кристалла, но может существенно отличаться на разных кристаллах одного типа, даже полученных из одной пластины.

Дефекты топологии качественно можно разделить на два вида. К первому относятся глубокие повреждения металлизации (вырывы, наплывы, царапины и крупные загрязнения). Они имеют контраст, близкий к контрасту между металлизацией и внутренними слоями. Дефекты второго вида: растравы защитного окисла, шелушение металлизации, ра-

стравы металлизированных дорожек, мелкие частицы грязи — имеют контраст, несущественно превышающий уровень шумов регистрации. Обнаружение этих дефектов представляет наиболее трудную задачу.

Соответствующие дефектам отличия в паре сходных изображений можно обнаружить, вычисляя разность этих изображений и выделяя области разности, превышающие некоторые пороговые значения по амплитуде и размерам. Корректное применение этого подхода требует выполнения, по крайней мере, двух условий.

Во-первых, значимые различия в изображениях должны быть обусловлены лишь дефектами. В нашем случае помимо этого существуют различия, вызванные изменением яркостных соотношений между слоями и яркостными искажениями телевизионной камеры. Их влияние на качество обнаружения дефектов и способ компенсации обсуждаются ниже при описании алгоритма выделения дефектов.

Во-вторых, выбор пороговых значений в общем случае основывается на оптимизации вероятностей пропуска дефектов и ложных тревог и требует знания распределений шумов и дефектов по яркости и площади (зависящих от порогового уровня яркости). К сожалению, получение аналитического описания распределения площадей превышений порога даже на простых моделях двумерных дискретных полей сопряжено с непреодолимыми трудностями. Что же касается распределения дефектов, то оно, по-видимому, вообще может быть определено только экспериментальным путем.

В этой связи будем рассматривать более простой вариант анализа разности на основе изучения и описания среднего числа превышений за заданный уровень и их распределения по площадям. Эти данные позволяют выбирать пороговые значения уровня и площади по заданной вероятности ложной тревоги и количеству ложных превышений, соответствующих этой вероятности. Для непрерывных гауссовых полей в [5—7] приводятся необходимые характеристики, но нам не удалось перейти к аналогичным соотношениям для полей на дискретной решетке со значениями уровней $(1-3)\sigma$.

В этой статье в качестве примера рассмотрен конкретный кристалл микросхемы 534РУ2, изображение которого можно представить в виде двух однородных областей (фона, соответствующего внутренним слоям, и металлизации), которые отличны по своим статистическим характеристикам. Число превышений за пороговый уровень u ($u/\sigma = 1-3$) (в предположении нормальности значений разности однородной области) качественно аналогично непрерывному случаю [5, 7] и грубо может быть представлено в виде

$$v(u) = N \exp(-u/\alpha), \quad (1)$$

где параметр N зависит от общей площади и корреляционной функции, α — от радиуса корреляции. Для фона $\alpha \sim 5,5$, а для металлизации $\alpha \sim 12,5$, что связано с ее гранулярностью.

Плотность распределения площадей S , превышающих пороговый уровень u , опишем функцией

$$P(S) = 0,5 \exp(-\beta\sqrt{S})/S. \quad (2)$$

Первые два момента для $S \in (0, \infty)$ имеют вид $\bar{S} = 1/\beta^2$; $\text{var}(S) = 5/\beta^4$.

Проведенное сравнение (2) с выборочными распределениями площадей областей, превышающих пороговый уровень, дает основание на использование этого распределения для вычисления вероятности ложной тревоги, что позволяет как-то оценить величину пороговой площади. Вероятность ложной тревоги $P(S)$ для фиксированного порогового уровня S_p выражается через неберущийся интеграл $P(S_p) = \int_{S_p}^{\infty} 0,5 \exp \times$

$\times (-\beta\sqrt{\tau})/\tau d\tau$, который можно протабулировать и использовать при расчетах пороговой величины u при заданной вероятности ложной тре-

воги. Для обработанной серии среднее значение $\beta = 0,7$, для которого $S, P(S)$ принимают следующие значения:

S	10	20	30	40	50
$P(S)$	0,0573	0,0198	0,00918	0,00489	0,00284
S	60	70	80	90	100
$P(S)$	0,00175	0,00112	0,000759	0,000516	0,000362

Получение распределений площадей дефектов, а также оптимизация вероятностей ошибок первого и второго рода выходят за рамки настоящей работы, и поэтому здесь ограничились лишь обсуждением некоторых вопросов.

Заметим лишь, что распределение дефектов, видимо, можно аппроксимировать γ -распределением. Это утверждение сделано на основе анализа данных о дефектах, которых было явно недостаточно для окончательных выводов по этому вопросу.

Структура алгоритма.

(с: означает комментарии, 1:, 2:, ... — шаги алгоритма).

- с: $L1 - L4$ — страницы видеобуфера.
- 1: Заносим первое изображение в $L4$ видеобуфера.
- 2: А. В заданных координатах на фиксированной площадке собираем гистограмму распределения яркостей и вычисляем по этой гистограмме моду первого максимума, соответствующего фону.
- с: Возможен другой вариант вычисления значений яркости фона, а именно: подсчитываем гистограмму для полного формата; вычисляем моду первого максимума и пороговое значение яркости, разделяющее фон и металлизацию; вычисляем средние значения по фону на заданных площадках с фиксированными координатами, которые используются для вычисления тренда, вызванного неоднородностью чувствительности телевизионной камеры.
- Б. По полученным яркостям вычисляем параметры тренда, взятого в виде двумерного полинома.
- с: В рассматриваемом случае выбран полином первого порядка (плоскость), так как полиномы более высокого порядка требуют дополнительных вычислительных затрат.
- 3: Преобразуем яркости исходного изображения согласно формуле

$$D_{ij}^n = D_{ij}^0 / (1 + (C_1 i + C_2 j) / C_0),$$

где D_{ij}^n , D_{ij}^0 — преобразованная и исходная яркости; C_0, C_1, C_2 — параметры тренда; i, j — координаты точки.

- с: Преобразованное изображение в $L4$.
- 4: А. По гистограмме преобразованного изображения ($L4$) вычисляем пороговое значение яркости, по которому осуществляем срез и сжатие (эрозию) областей фона на один шаг, используя морфологический процессор [5]. Результат помещается в $L1.0$ видеобуфера.
- с: $L1.N$ — N -я битовая плоскость $L1$ ($N = 0 - 7$).
- Б. По исходному изображению, маскированному $L1.0$, вычисляем среднее значение яркости фона ($D_{\Phi 1}$).
- В. Аналогично п. 4А, Б вычисляется среднее значение яркости металлизации (D_{M1}).
- с: Сжатие области фона (металлизации) требуется для исключения областей перепадов, которые искажают оценки средних значений яркости.
- 5: Повторяем шаги 1: — 4: для второго изображения в $L3$, а срез заносим в $L1.1$.
- 6: Вычисляем разность между $L3$ и $L4$, преобразуя предварительно значения $L3$ согласно выражению

$$D_{ij}^n = (D_{ij}^n - D_{\Phi 2}) DS + D_{\Phi 1};$$

$$DS = (D_{M1} - D_{\Phi 1}) / (D_{M2} - D_{\Phi 2}),$$

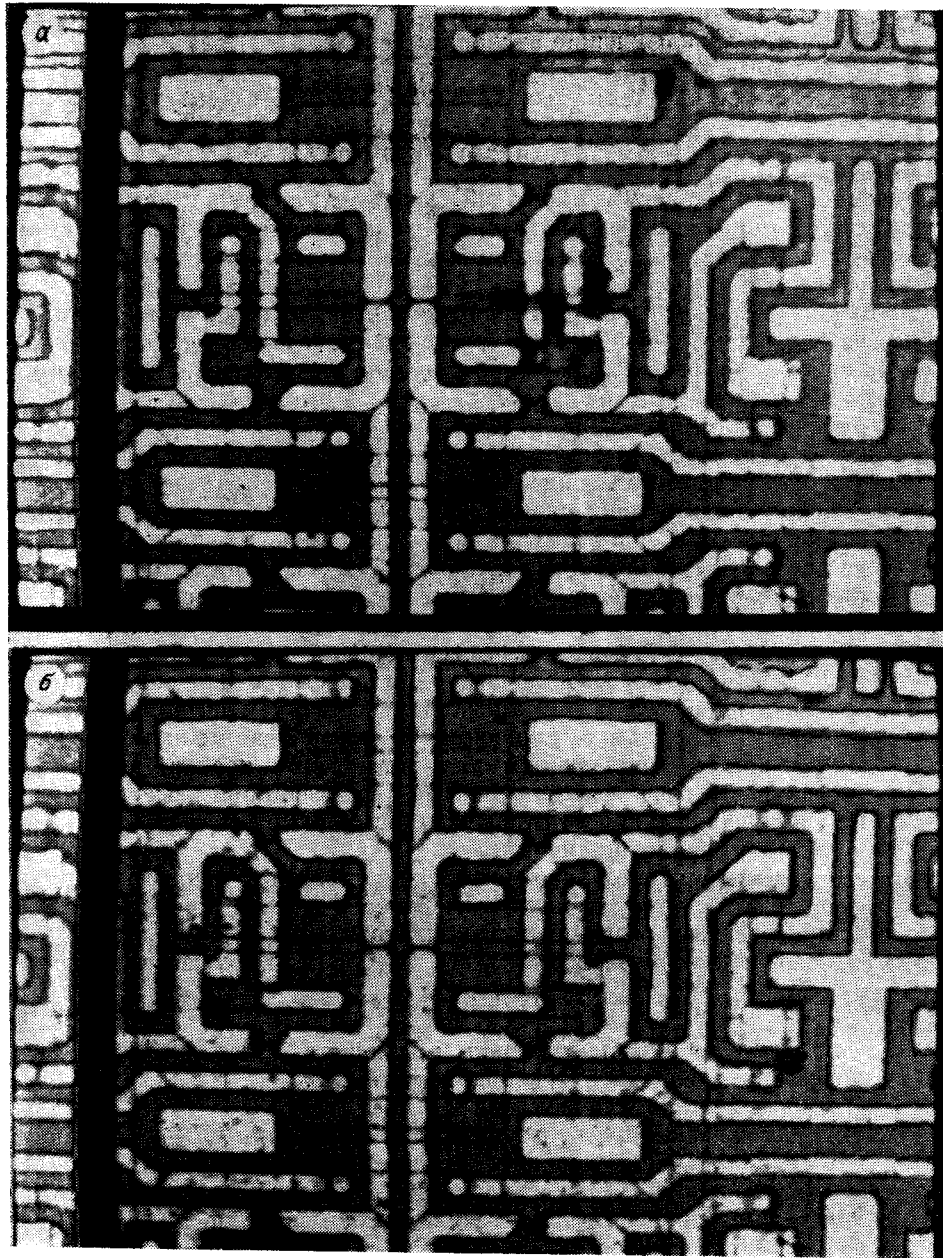


Рис. 1

что компенсирует различия яркостных соотношений в изображениях $L3$ и $L4$. Разность содержится в $L2$. Одновременно вычисляем сумму $L4 + L3$, которая размещается в $L3$.

7: А. Вычисляем пороговое значение

$$PD = (D_{M1} - D_{Ф1})/2 + (D_{M2} - D_{Ф2})/2,$$

по которому выполняем срез изображения $L3$ и заносим его в $L1.2$.

с: Единичные значения в $L1.2$ соответствуют металлизации.

Б. Используя маску из $L1.2$ в разности ($L2$), подсчитываем две гистограммы, соответствующие фону и металлизации, на основа-

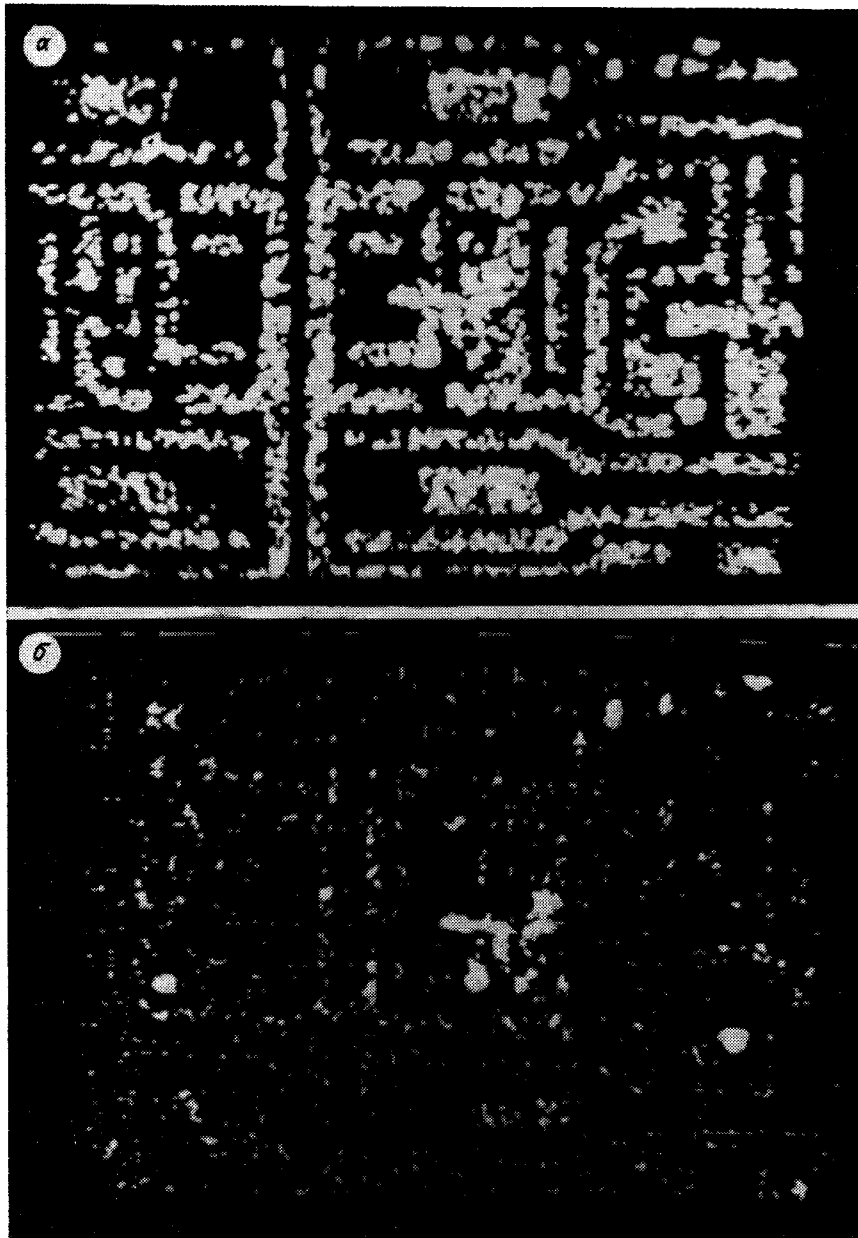


Рис. 2

нии которых вычисляется преобразование, приводящее распределение яркости металлизации (эквализации) к фоновому. Это необходимо сделать, чтобы выделение дефектов по всему полю кристалла выполнялось на одном пороговом уровне.

- с: В алгоритме предусмотрено простое амплитудное преобразование яркостей, относящихся к слою металлизации, т. е. умножение их на коэффициент (σ_{Φ}/σ_M или $\sigma_{\Phi}D_{\Phi}/\sigma_H D_M$).
- 8: Вычисляем дисперсию преобразованной разности, задаем порог u .
- 9: Морфологическим процессором из L1.0 и L1.1 или L1.2 формируем области перепадов и заносим в L1.3.
- с: Области перепадов, получаемые из L1.0 и L1.1, объединяются по &.
- 10: Осуществляем срез L3 с порогом $\pm u$ и заносим в L1.7.
- 11: Логически вычитаем L1.3 из L1.7 и заносим в L1.7.

- 12: Осуществляем селекцию по площади S_p объектов с целью удаления «ложных» дефектов.
 13: СТОП.

При разработке, отладке и проверке алгоритма использовались изображения фрагментов кристаллов, которые были, по существу, ТУ-замежные изображения сходных фрагментов двух кристаллов микросхемы 534РУ2. На рис. 2, а, б дан срез по пороговому уровню $u = 1,5\sigma$ для простой и «корректной» разностей. Сравнивая рис. 2, а и б, нетрудно видеть, что предлагаемый алгоритм существенно уменьшает число обнаруживаемых ложных дефектов.

Заключение. В работе обоснована методика сравнения изображений двух кристаллов с целью выявления дефектов топологии. Предложен и реализован алгоритм получения «корректной» разности, содержащей информацию о дефектах. Даны рекомендации по выбору пороговой площади для получения заданной вероятности ложной тревоги.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бутаков Е. А., Островский В. И., Фадеев И. Л. Обработка изображений на ЭВМ.— М.: Радио и связь, 1987.
2. Громов Г. Г., Марков И. А., Подвысоцкая Н. А. и др. Автоматическая система параллельного анализа изображений // Автоматизация анализа и распознавания изображений.— Рига: Зинатне, 1980.— Вып. 2.
3. Прэтт У. Цифровая обработка изображений.— М.: Мир, 1982.
4. Киричук В. С., Пустовских А. И. Применение статистических методов в задаче оценивания стационарной части фона по серии изображений // Автотметрия.— 1988.— № 3.
5. Свешников А. А. Прикладные методы случайных функций.— М.: Наука, 1968.
6. Тихонов В. И., Хищенко В. И. Выбросы траекторий случайных процессов.— М.: Наука, 1987.
7. Тихонов В. И. Нелинейные преобразования случайных процессов.— М.: Радио и связь, 1986.
8. Косых В. П., Пустовских А. И., Тарасов Е. В., Яковенко Н. С. Морфологический процессор // Автотметрия.— 1984.— № 4.

Поступила в редакцию 22 июля 1988 г.

УДК 681.3 : 681.7.08 : 576.3

Н. А. КИРИЧУК, В. П. КОСЫХ, А. И. ПЕТУНИН

(Красноярск — Новосибирск)

КОЛИЧЕСТВЕННЫЙ АНАЛИЗ ФОРМЫ ЯДЕР МИЭЛОИДНЫХ КЛЕТОК ЧЕЛОВЕКА

Одна из важных задач анализа изображений состоит в классификации предварительно выделенных областей изображения по их форме. Сложность этой задачи заключается в отсутствии строгого определения формы и вследствие этого в существовании множества эвристических количественных характеристик, с различной степенью адекватности описывающих форму разнообразных областей. Типичным примером такой задачи является анализ формы ядер клеток крови, играющий особую роль при оценке функционального состояния клеточной популяции.