

*Синхронный детектор.* С помощью этого блока осуществляется выделение постоянной сигнала с заданной фазой. Представляет собой двойной балансный смеситель, выполненный на диодах Шоттки.

*Дискриминатор.* Необходим для выделения процессов, которые происходят с заданной постоянной времени. Блок состоит из ключей на полевых транзисторах. На затворы полевых транзисторов подаются импульсы из формирователя импульсов. На выходе дискриминатора получаем сигнал, пропорциональный разности средних величин сигнала за два разных отрезка времени.

Интерфейсная часть спектрометра была специально разработана для подсоединения к компьютеру через линии канала общего пользования, а также линии многофункциональной платы PCI-1710HG вольтметра В7-34А и блоков питания ДЗ0-10-01А. Интерфейс состоит из следующих узлов: буфер шины, триггеры селектора адреса и дешифратора портов, блока индикации, буфера управляющих сигналов, блоков связи, многофункциональной платы PCI-1710HG.

Сигнал релаксации емкости преобразуется аналого-цифровым преобразователем и в цифровом виде передается в компьютер, где программно производится его усреднение с целью увеличения отношения сигнал/шум. Временная зависимость емкости исследуемой структуры  $C(t)$  в заданном температурном диапазоне записывается в память компьютера, и далее по стандартной методике [2, с. 16—30] определяются параметры глубоких уровней.

Программная реализация данной методики позволяет получить результаты за один температурный цикл,

что существенно сокращает время измерений. Применение программных методов обработки релаксационных сигналов также дает возможность обрабатывать результаты по новым методикам и программам, которые позволяют увеличить точность и достоверность получаемых результатов.

Таким образом, применение предлагаемых методик анализа и программной обработки информации позволяет повысить точность и чувствительность измерений релаксационных сигналов, расширить диапазон исследуемых энергетических спектров глубоких состояний в полупроводниковых структурах, увеличить достоверность получаемых результатов.

#### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Lang D. V. Deep-level transient spectroscopy: a new method to characterize traps in semiconductors // J. Appl. Phys.—1974.— Vol. 45, N 7.— P. 3023—3032.
2. Берман Л. С., Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров в полупроводниках.— Л.: Наука, 1981.
3. Бойко Ю. В., Ильченко В. В., Третяк О. В., Зінчук В. М. Дослідження параметрів глибоких рівнів в напівпровідниках та структурах на їх основі // Наук. зап. Київськ. нац. університету ім. Тараса Шевченка.— 2004.— Т. 9.— С. 154—163.
4. Ветров О. П., Кузнецов Г. В. Ємнісний спектрометр глибоких рівнів // Вісник Київського університету. Сер. Фіз.-мат. науки.— 1994.— № 1.— С. 293—300.
5. Tretyak O. V., Skryshevsky V. A., Vikulov V. A. et al. Surface electronic states in metal-porous silicon — silicon structures // Thin Solid Films.— 2003.— Vol. 445.— P. 144—150.
6. Avila A., Reyes A. Computerized DLTS system to characterize deep levels in semiconductors // Rev. Mex. Fis.— 2002.— Vol. 48 (6).— P. 539—547.

Д. т. н. В. Н. КРЫЛОВ, к. т. н. Г. Ю. ЩЕРБАКОВА,  
Ю. Ю. КОЗИНА

Украина, Одесский национальный политехнический университет  
E-mail: mokrickiy@mail.ru

Дата поступления в редакцию  
09.01 2007 г.

Оппонент д. т. н. В. И. ОСИНСКИЙ  
(НИИ микроприборов, г. Киев)

## ПОЗИЦИОНИРОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ФОТОШАБЛОНОВ В СИСТЕМАХ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ОПТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

*Разработана система автоматизированного оптического позиционирования фотошаблонов интегральных схем, которая имеет высокие показатели помехоустойчивости и точности.*

Современное производство качественных интегральных схем предполагает применение систем автоматизированного оптического контроля (АОК) на ряде этапов, начиная с производства фотошаблонов (ФС). Целью системы АОК является выделение и анализ дефектов ФС посредством сравнения с эталонным ФС. Для этого должно быть обеспечено позициони-

рование (ориентация) изображения контролируемого ФС, т. е. определение и коррекция угла наклона, сдвигов и изменения масштаба относительно эталона.

Позиционирование ФС в современных системах АОК выполняется в оптико-электронном блоке с помощью сложной прецизионной механики и дорогостоящей осветительной аппаратуры. Снижение ресурсоемкости процесса АОК и требований к осветительно-фокусирующей аппаратуре могут позволить более совершенные методы обработки изображений. С этой целью предлагается проводить обнаружение и распознавание реперных знаков (РЗ) при обработке изображений с помощью системы автоматизированного оптического позиционирования ФС.

Для достижения поставленной цели необходимо:

- провести анализ современных методов обработки изображений;
- разработать структуру системы контроля и распознавания РЗ;
- разработать информационную технологию системы контроля и распознавания РЗ;
- провести экспериментальные исследования в целях проверки помехоустойчивости метода.

Для решения задачи позиционирования при обработке изображений применяют различные методы — контурные, интегральные, характерных фрагментов [1, 2]. При использовании *интегральных* методов растут вычислительные затраты, поскольку параметры положения вычисляются по информации обо всем полутоновом изображении ФШ. Метод *характерных фрагментов* прост в реализации, имеет высокое быстродействие, но не обеспечивает инвариантность к сдвигу и повороту ФШ. В качестве характерных фрагментов в этом методе используются контактные площадки. *Контурный* метод существует в двух модификациях. В первой модификации производят совмещение по внешним границам ФШ, предполагая, что границы прямоугольные. Метод с высоким быстродействием, но точность его ограничена точностью изготовления и обнаружения внешних границ ФШ [1]. Во второй модификации для распознавания используются контуры РЗ — объектов известной формы, наносимых на поверхность фотошаблона. Для увеличения точности позиционирования применяются до четырех РЗ. При реализации этого метода необходимо произвести выделение и анализ контура с высокой помехоустойчивостью. Здесь объем вычислительных затрат хотя и снижается по отношению к интегральным методам, однако остается достаточно высоким. То есть остается потребность в разработке по-

мехоустойчивого метода, который позволит решать задачу позиционирования с высокой точностью и низкой ресурсоемкостью.

Системы автоматизированного оптического контроля состоят из оптико-электронного блока и системы обработки изображений. Оптико-электронный блок включает оптическую систему, датчик изображения (видеокамеру), двухкоординатный стол, осветительную систему и блок обработки видеосигнала, осуществляющий усиление, квантование и нормирование видеосигнала. Система обработки изображений представляет собой проблемно-ориентированный аппаратно-программный комплекс обработки и распознавания изображений [3]. На **рис. 1** представлена структурная схема системы АОК ФШ с разработанной системой обработки изображений, применяемой для автоматизированного позиционирования.

Для локализации (определения координат) объекта на изображении применяют пространственную низкочастотную фильтрацию (**ПНЧФ**) [4] и градиентный поиск (**ГП**) [5]. ПНЧФ размывает перепады интенсивности, которая содержит достаточно важную информацию об изображении. Для ГП скорость сходимости резко уменьшается при целевой функции типа “овраг”; результатом процедуры является не глобальный оптимум, а ближайший к начальной точке локальный; в присутствии шумов оценка градиента затруднена и поэтому направление поиска выбирается неправильно.

В работе предлагается для локализации РЗ использовать разработанный метод, который состоит в применении к изображению, которое обрабатывается, гиперболического вейвлет-преобразования (**ГВП**) [6].

$$HWT(s, x_0) = \frac{1}{\sqrt{s}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \psi_{s, x_0}(x) dx, \quad (1)$$

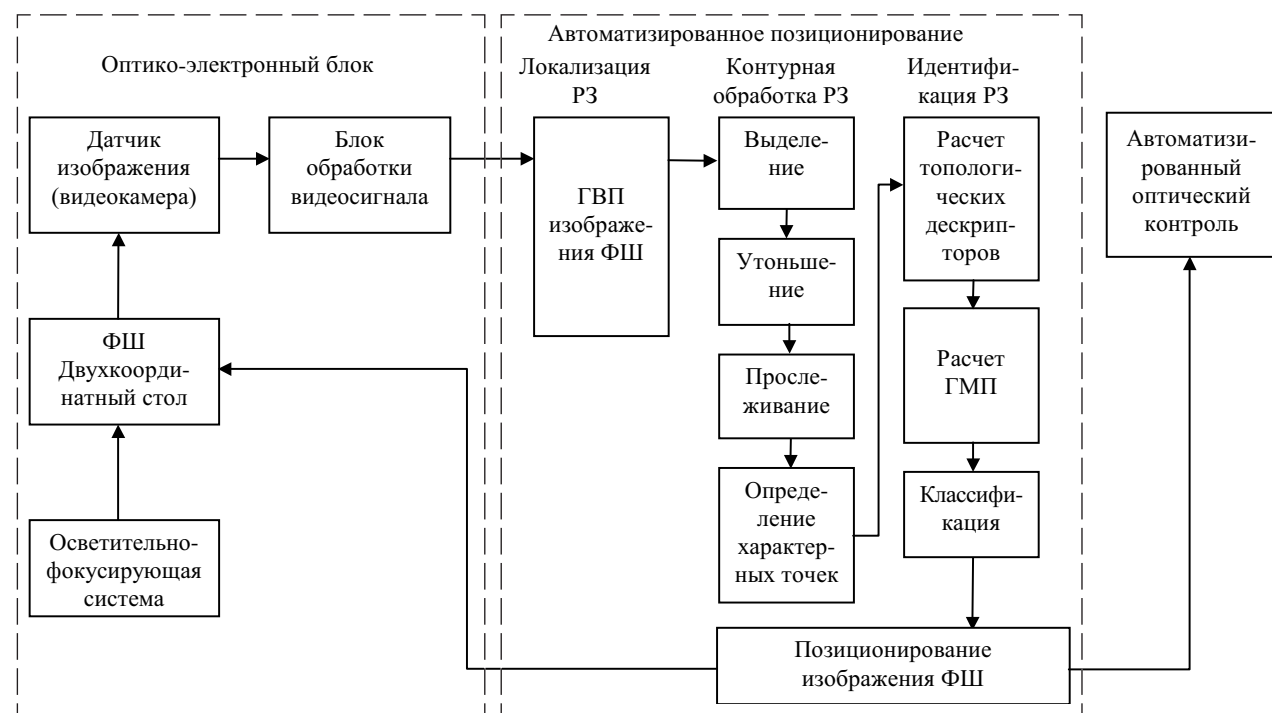


Рис. 1. Система автоматизированного оптического контроля фотошаблонов

где  $f(x)$  — преобразуемая (анализируемая) функция (строка либо столбец изображения);  $\psi_{s,x_0}(x)$  — двухпараметрическая базисная функция, получающаяся из материнского вейвлета  $\psi_0(x) = 1/x$  в результате масштабирования с масштабным множителем  $s \in R^+$  и сдвига с параметром  $x_0 \in R$ . Изменяя масштабный коэффициент  $s$  и величину сдвига вейвлетной функции, можно локализовать любые особенности изображения в пространстве масштабов. Данный метод позволяет расширить область пространственной локализации выделяемого РЗ.

На рис. 2 представлены изображение ФШ (рис. 2, а), область изображения ФШ с РЗ (рис. 2, б) и строка изображения в области ГВП (рис. 2, в).

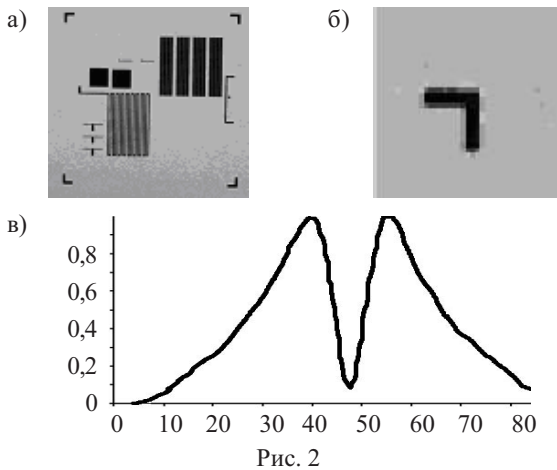


Рис. 2

Для поиска реперного знака предлагается следующая методика. Точки экстремума, которые определяют область перепада интенсивности, определяются с использованием регулярного итеративного алгоритма на основе ГВП. Для поиска РЗ использовался двухмерный пространственный алгоритм [6]:

$$HWT(x, y) = \frac{1}{\pi} \iint \frac{J(x, y)}{(\alpha x - x_1)(\alpha y - y_1)} dx_1 dy_1, \quad (2)$$

где  $x, y$  — пространственные координаты;  
 $J(x, y)$  — интенсивность входного информационного поля;  
 $\alpha$  — масштабный коэффициент.

При использовании этого метода для поиска РЗ появляется возможность найти как границы, так и центр строки (столбца) бинаризованного объекта, в котором ГВП равно 0. Концентрация энергии в области перепадов интенсивности создает благоприятные условия для последующего распознавания.

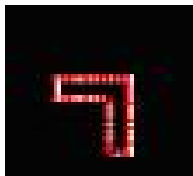


Рис. 3

Выделение и прослеживание контура РЗ выполнялось на базе алгоритма, основанного на морфологической обработке [7]. Выделенный и прослеженный контур РЗ представлен на рис. 3. В данном случае был выделен правый верхний РЗ.

В целях проведения исследования помехоустойчивости метода исходное изображение ФШ предварительно было зашумлено с помощью добавления аддитивной гауссовской помехи со среднеквадратиче-

ским отклонением  $\sigma_{\text{вых}}$ . Отношение сигнал/шум определялось как

$$q = h^2 / \sigma_{\text{вых}}^2, \quad (3)$$

где  $h$  — высота перепада.

Определена погрешность полученных координат центров тяжести РЗ зашумленного изображения относительно эталонного. Известно, что для реализации задачи позиционирования ФШ в системе АОК погрешность совмещения не должна превышать  $\pm 1,401$  мкм [8], что составляет 5% в относительных величинах. На рис. 4 представлено зашумленное изображение ФШ (а), выделенные РЗ зашумленного изображения (б) и график зависимости погрешности от отношения сигнал/шум для аддитивной помехи (в).

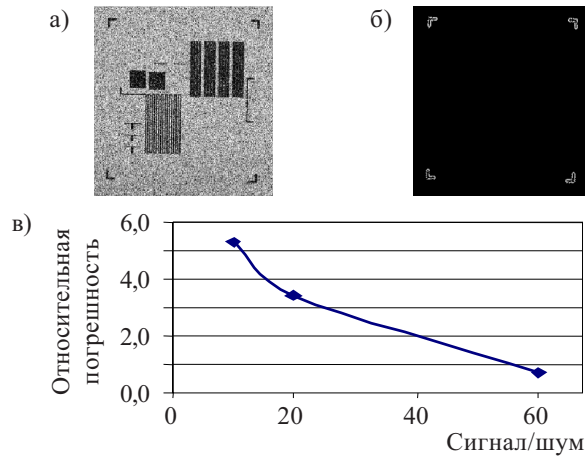


Рис. 4

Для исследования работоспособности метода в условиях неравномерной освещенности изображение было подвергнуто наложению мультипликативной помехи. Мультипликативную помеху можно промоделировать, перемножив каждую строку изображения с некоторым стационарным сигналом. Уровень мультипликативной помехи оценивался следующим образом: каждая строка исходного изображения ФШ умножалась на синусоидальный сигнал  $A \sin(x)$  в интервале  $[0; \pi]$ . Отношение сигнал/шум определялось как

$$p = S/A, \quad (4)$$

где  $S$  — уровень сигнала;  
 $A$  — амплитуда синусоиды.

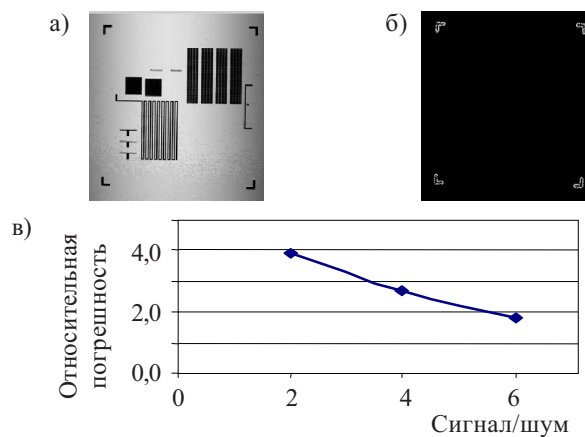


Рис. 5

На рис. 5 представлен результат добавления мультипликативной помехи (*a*), выделенные РЗ зашумленного изображения (*b*) и график зависимости погрешности от отношения сигнал/шум для мультипликативной помехи (*в*).

При идентификации для вычисления признаков формы РЗ была разработана следующая процедура [9].

1. Расчет топологического дескриптора (числа Эйлера) — разности между числом связанных компонентов и числом отверстий в изображении РЗ.

2. Расчет дескриптора области — компактности РЗ (отношение квадрата периметра к площади).

3. Расчет первых шести геометрических моментов-признаков (ГМП) с использованием информации о характерных точках [3].

4. Для РЗ формы квадрата и ромба вычисление эксцентриситета контура.

При формировании ансамбля признаков формы значения ГМП и компактности РЗ для ортогонализации подвергаются дискретному косинусному преобразованию (с целью устранения статистических связей между признаками). Далее производится минимизация пространства признаков с помощью оценки их информативности по Шеннону [10]. При этом информативность *k*-го параметра-признака для  $A_i$  ( $i = 1, 7$ ) класса (типа РЗ) оценивается как разность начальной энтропии системы признаков и энтропии решения по этому параметру

$$I_k = H_0(A) - H(A/x_k), \quad (5)$$

где  $H_0(A)$  — начальная энтропия системы;

$H(A/x_k)$  — энтропия решения по параметру  $x_k$ .

Информативность *k*-го параметра-признака определяется согласно выражению

$$I_k = -\sum_{i=1}^m p(A_i) \log p(A_i) + \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^m p(A_i, x_{kj}) \log p(A_i, x_{kj}) - \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^m p(A_i, x_{kj}) \log \sum_{i=1}^m p(A_i, x_{kj}), \quad (6)$$

где  $p(A_i)$  — априорные вероятности классов (приняты равновероятными);

$p(A_i, x_{kj})$  — совместное распределение вероятностей значений признака  $x_k$  для класса  $A_i$ .

В процессе расчетов было выявлено, что области изменения параметров-признаков знаков # и «крест» пересекаются. Это происходит при таком уменьшении масштаба, когда размер фрагмента знака # между характерными точками равен или меньше начального размера интерполяционного отрезка между ними. Эти знаки в пространстве признаков предлагается различать с помощью числа Эйлера. С учетом выше-

сказанного в ансамбль признаков рассматриваемых семи знаков включены первый и второй коэффициенты дискретного косинусного преобразования (с информативностью соответственно 0,7837 и 0,7697) и число Эйлера.

Классификация РЗ производится с помощью линейных решающих функций [11, с. 989] в двухмерном пространстве признаков — коэффициентов дискретного косинусного преобразования; если знак относится к области # или «крест» — дальнейшее разделение классов производится по величине числа Эйлера.

### Выводы

Созданная на базе приведенных процедур система автоматизированного оптического позиционирования фотошаблонов позволяет распознавать реперные знаки инвариантно к масштабу и повороту ФШ в поле зрения. При этом система работоспособна при отношениях сигнал/помеха не менее 2 (по амплитуде) для мультипликативной помехи и не менее 10 (по мощности) для аддитивной помехи.

Результаты экспериментальных исследований показали, что разработанная система АОК ФШ имеет высокие показатели помехоустойчивости и точности, что позволяет за счет уменьшения требований к осветительно-фокусирующей системе снизить ресурсоемкость процесса контроля.

### ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Задорин А., Захарова Г. Система автоматизации оптического контроля фотошаблонов и печатных плат с использованием стандартного сканера // Гироскопия и навигация.— 2001.— № 1.— С. 17—19.
2. Chan Steven. Automated inspection systems for the electronics industry // www.rsleads.com/508ee-207.
3. Крылов В. Н., Щербакова Г. Ю. Совмещение изображений в системах оптического контроля печатных плат // Технология и конструирование в электронной аппаратуре (ТКЭА).— 2000.— № 1.— С. 23—25.
4. Розенфельд А. Распознавание и обработка изображений с помощью вычислительных машин.— М.: Мир, 1972.
5. Цыпкин Я. З. Адаптация и обучение в автоматических системах.— М.: Наука, 1968.
6. Антошук С. Г., Крылов В. Н. Обработка изображений в области гиперболического вейвлет-преобразования // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. (Херсон).— 2003.— № 2.— С. 7—10.
7. Форсайт Д. Компьютерное зрение. Современный подход.— М.: Вильямс, 2004.
8. Готра З. Ю. Технология микроразноустройств: Справочник.— М.: Радио и связь, 1991.
9. Щербакова Г. Ю., Крылов В. Н., Козина Ю. Ю. Идентификация изображений реперных знаков в системах АОК ИЭТ // МНПК “Современные информационные и электронные технологии”. Т. 1.— 2006.— Одесса.— С. 67.
10. Анисимов Б. В., Курганов В. Д., Злобин В. К. Распознавание и цифровая обработка изображений.— М.: Высш. шк., 1983.
11. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений.— М.: Техносфера, 2005.