

УДК 621.391

## ПОВЫШЕНИЕ ИНФОРМАТИВНОСТИ ИЗОБРАЖЕНИЙ СЛОЕВ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ МИКРОСХЕМ

А.В. ИНЮТИН, Е.Е. МАРУШКО

*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Республика Беларусь**Поступила в редакцию 02 апреля 2020*

**Аннотация.** Представлены алгоритмы повышения информативности сильно искаженных снимков топологических слоев полупроводниковых микросхем для восстановления их топологии. Для повышения информативности предложено использовать данные с нескольких наборов кадров обрабатываемого слоя и соседних с ним слоев.

**Ключевые слова:** информативность изображений, топологические изображения, восстановление топологии, интегральные микросхемы.

### Введение

Задача обратного проектирования интегральных схем (ИС) состоит в восстановлении их топологии по совокупности изображений топологических слоев для дальнейшего получения структурной, функциональной и принципиальной схем ИС. Процесс обратного проектирования достаточно сложен и включает несколько технологических этапов: удаление корпуса ИС, сканирование и анализ изображения топологического слоя, удаление верхнего слоя, сканирование и анализ изображения очередного топологического слоя и межслойных соединений, построение транзисторной и принципиальной схем. На реальных снимках присутствуют многочисленные искажения, обусловленные как ограничениями микроскопа и системы видеозахвата, так и, в главную очередь, процессом получения послойных изображений кристалла ИС с помощью травления, шлифовки и т. д.

Из-за планарной технологии выпуска ИС элементы топологии слоя вносят искажения в изображения соседних слоев, что дополнительно затрудняет анализ. Восстановление топологии является актуальным этапом для процессов обратного проектирования, проверки патентной чистоты продукции, контроля технологического процесса производства ИС. Этот этап производится путем определения соответствия некоторого набора фрагментов изображения многоугольникам, которые являются элементами транзистора, межслойными соединениями, контактами и т. д.

### Информативность изображения слоя интегральной схемы для задачи восстановления топологии

Наиболее общее определение термина информативность – это количество информации, содержащейся в чем-либо. В задачах обработки изображения часто используют более узкие определения. [1-4]. Для задачи восстановления топологии слоя полупроводниковой микросхемы под информативностью будем понимать площадь областей интереса, т. е. всех сегментов снимка, которые можно классифицировать как элементы топологии (проводники, контактные окна) и подложку. Удобнее использовать нормированное значение информативности  $Z$  как отношение суммы площадей распознанных сегментов топологии  $A_i$ ,  $i = 1, \dots, n$ , ( $n$  – число сегментов) и подложки  $B$  к общей площади снимка  $S$

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n A_i + B}{S}. \quad (1)$$

В идеальном случае нормированная информативность кадра будет равна единице и тополог, используя специальные программные средства, может восстановить принципиальную или логическую схему ИС. Оптическими искажениями на данном этапе пренебрегаем, допуская, что выбор метода распознавания позволит уменьшить их влияние. Но по причине сильного разрушения слоя при его получении изображение будет состоять из суммы искаженных фрагментов элементов топологии  $A'_j$ ,  $j=1, \dots, m$ , ( $m$  – число сегментов), и  $m \neq n$ , искаженной подложки  $B'$  и нераспознаваемых фрагментов  $C_k$ :  $k=1, \dots, p$  ( $p$  – число нераспознаваемых фрагментов элементов топологии и подложки), а также ложных фрагментов  $D_l$ :  $l=1, \dots, q$  ( $q$  – число ложных фрагментов). Появление ложных фрагментов обусловлено тем, что топологические элементы соседнего слоя становятся видны в процессе удаления предыдущего слоя. В таком случае площадь кадра  $S'$  будет равна

$$S' = \sum_{j=1}^m A'_j + B' + \sum_{k=1}^p C_k + \sum_{l=1}^q D_l, \quad (2)$$

а нормированная информативность кадра  $Z'$

$$Z' = \frac{\sum_{j=1}^m A'_j + B'}{S'} = 1 - \frac{\sum_{k=1}^p C_k + \sum_{l=1}^q D_l}{S'}. \quad (3)$$

Чем больше площадь нераспознаваемых и ложных фрагментов слоя, тем меньше точность восстановления топологии. Таким образом, для повышения качества восстановления топологии необходимо увеличить количество информации, т. е. площади распознаваемых элементов топологии и подложки, на изображении слоя.

#### Алгоритм объединения областей интереса слоя нескольких кадров

Для повышения информативности предлагается использовать алгоритм объединения областей интереса слоя нескольких наборов кадров, полученных с разных кристаллов ИС. Объектами интереса выступают элементы топологии и подложка. Исходными данными являются два или более набора цветных или полутоновых изображений слоя ИС. Каждое изображение слоя ИС представляет собой набор кадров с их координатами.

Алгоритм состоит из следующих шагов:

1. Выбор двух кадров с изображением общего фрагмента слоя из каждого набора.
2. Совмещение кадров относительно друг друга.
3. Выделение для каждого кадра областей интереса методом сегментации изображения.
4. Объединение дорожек кадров.
5. Уточнение подложек кадров и их объединение.
6. Объединение областей интереса кадров.

На рис. 1 приведены увеличенные фрагменты двух совмещенных кадров слоя металлизации.

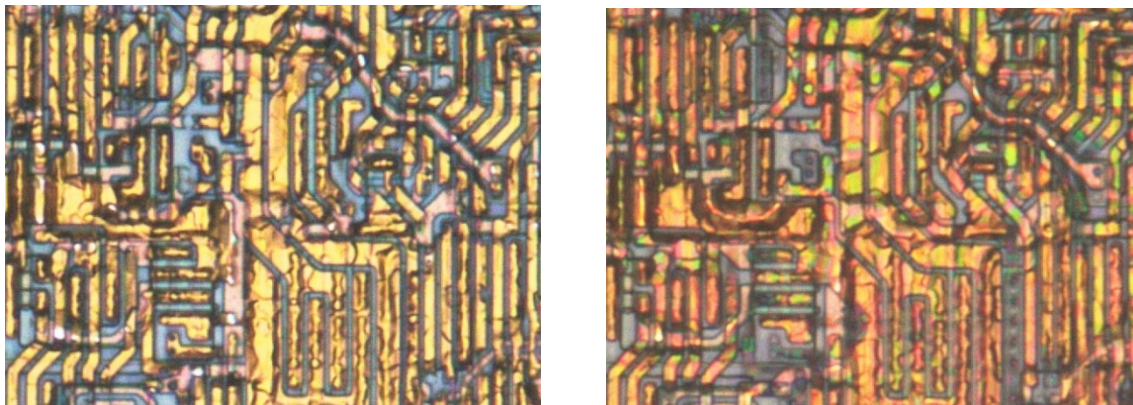


Рис. 1. Два кадра общего фрагмента слоя: *a* – кадр1; *б* – кадр2

Размеры и координаты кадров на слое идентичны. Выделение областей интереса проводилось с помощью сегментации изображения методом экспертной классификации цветных кластеров, полученных с помощью  $k$ -means кластеризации в пространстве RGB. Количество классов соответствует слагаемым формулы (2). Это дорожки, подложка, нераспознаваемые и ложные фрагменты изображения. На рис. 2 белым показаны области интереса, а черный цвет соответствует нераспознаваемым и ложным фрагментам изображения. На рис. 3 видно, что увеличилась площадь областей интереса после объединения кадров.

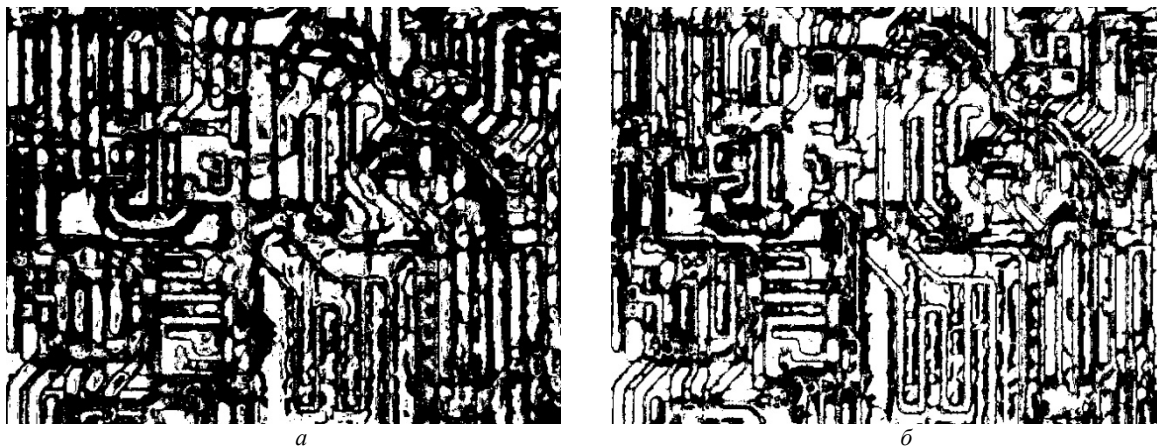


Рис. 2. Результат выделения областей интереса кадров: *a* – кадр1; *б* – кадр2

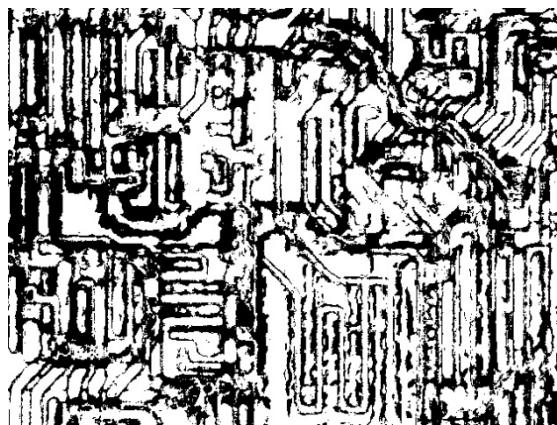


Рис. 3. Результат объединения областей интереса кадров

## Оценка информативности отдельных кадров и результата их объединения

Изображение	Площадь областей интереса, % от всего кадра		Нормированная информативность кадра
	дорожка	подложка	
Кадр 1	23,78	24,99	0,49
Кадр 2	24,98	8,20	0,33
Результат объединения	33,83	24,39	0,58

Из таблицы видно, что в результате работы алгоритма нормированная информативность изображения увеличилась с 0,33 и 0,49 до 0,58, а площадь подложки после объединения уменьшилась. Это обусловлено тем, что фрагменты дорожки при получении слоя разрушились до самой подложки. Если на другом кадре таким фрагментам соответствует дорожка, то фрагмент помечался как дорожка.

## Алгоритм коррекции изображения слоя с помощью маски

Точность выделения области интереса зависит от метода и параметров сегментации. В приведенном примере параметры сегментации подбирались для получения минимальной ошибки второго рода. Однако результат выделения областей интереса кадров слоя металла содержит ошибки еще и из-за влияния элементов соседнего слоя – поликремния. Поэтому разработан алгоритм коррекции изображения слоя, основанный на использовании элементов топологии одного слоя для коррекции соседнего. Исходными данными являются набор цветных изображений слоев ИС в виде набора кадров с их координатами.

Алгоритм коррекции изображения слоя с помощью маски, сформированной на базе областей интереса соседнего слоя, состоит из следующих шагов:

1. Совмещение подлежащего слоя с обрабатываемым.
2. Выделение необходимых элементов подлежащего слоя методом сегментации.
3. Формирование маски путем уточнения формы выделенных элементов и конвертации их в черно-белое представление.
4. Обработка изображения на основе полученной маски.

На рис. 4 приведен пример кадра подлежащего слоя – слоя поликремния, который соответствует кадрам слоя металлизации, приведенным на рис. 1 – 3.

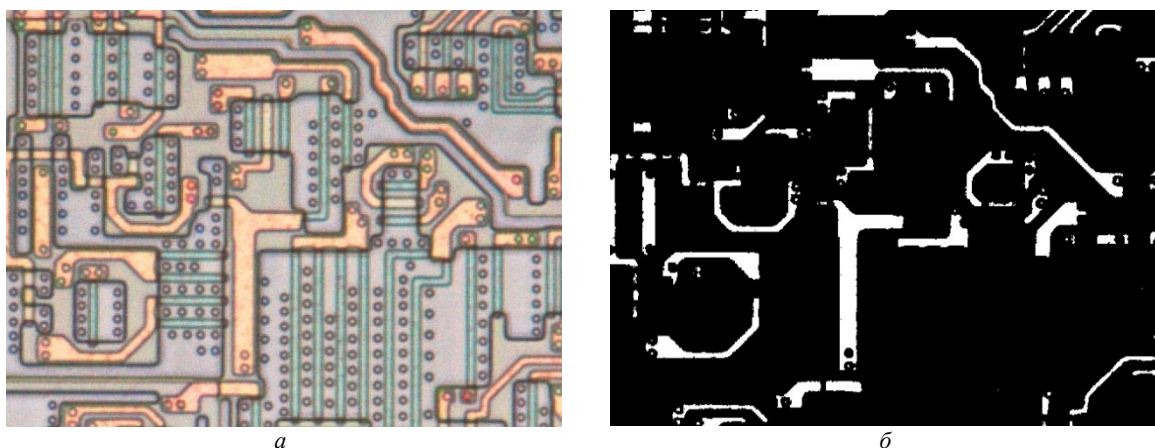


Рис. 4. Пример маски для слоя поликремния: *а* – кадр слоя поликремния; *б* – маска на его основе

На рис. 5 показан результат применения такой маски, а именно: проведена локализация ложных фрагментов для кадра после объединения объектов интереса.

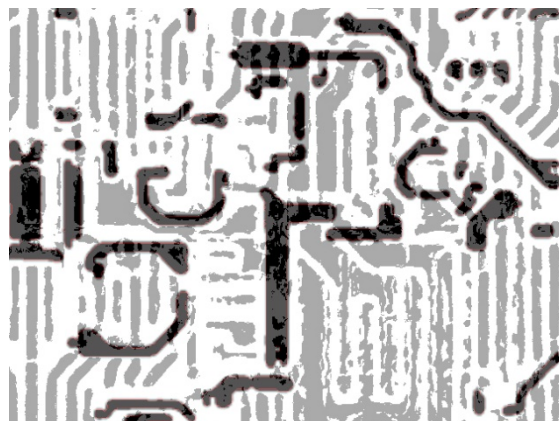


Рис. 5. Выделение мест потенциального разрушения элементов топологии на слое металла

Результатом работы шагов 2 – 3 алгоритма является маска, т. е. вспомогательное изображение, черные пиксели которого не влияют на обрабатываемый кадр, а ненулевые пиксели могут использоваться для удаления (маскирования) соответствующей части кадра или являться основой для операций по его обработке. Примерами таких операций могут быть устранение разрывов, расширение или сжатие изображений, семантическая фильтрация, условные операции математической морфологии [5] и т. д.

### Заключение

Использование предложенных алгоритмов позволяет повысить информативность сильно искаженных изображений слоев ИС за счет объединения информации об областях интереса с нескольких кадров, а также уменьшить искажения элементов топологии и подложки слоя при использовании масок, сформированных на базе информации с соседних слоев.

## ENHANCEMENT OF INFORMATIVITY OF INTEGRATED CIRCUIT LAYERS IMAGES

A.V. INYUTIN, Y.Y. MARUSHKO

**Abstract.** Algorithms for increasing the informativity of highly distorted images of integrated circuit layers to restore their topology are presented. To increase images informativeness, it is proposed to use information from several frames sets of the processed layer and its neighboring layers.

*Keywords:* image informativity, integrated circuit, layout images, topology restoration.

### Список литературы

1. Бондаренко М.А., Дрынкин В.Н. // Программные системы и вычислительные методы. 2016. № 1. С. 64–79.
2. Анодина-Андриевская Е.М., [и др.] // Приборостроение. 2011. №7. С. 27–35.
3. Sheikh H.R., Sabir M.F., Bovik F.C. // IEEE Trans. on Image Proc. 2006. Vol. 15, № 11. P. 3441–3452.
4. Еремеев О.И., Пономаренко Н.Н. // Авиационно-космическая техника и технология. 2008. № 6 (53). С. 105–108.
5. Gu L., Kaneko T., Tanaka N. // Mathematical Morphology and its Applications to Image and Signal Processing. 1998. P. 191–198.