



УДК 004.932.4

DOI: 10.22184/1993-8578.2023.16.9s.554.558

РАЗРАБОТКА ОПТИМАЛЬНОГО МЕТОДА ДЛЯ ОБРАБОТКИ SEM-ИЗОБРАЖЕНИЙ В ЦЕЛЯХ РАСПОЗНАВАНИЯ КОНТУРОВ ТОПОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУР

DEVELOPING AN OPTIMAL METHOD OF SEM-IMAGES PROCESSING TO RECOGNIZE TOPOLOGICAL STRUCTURES CONTOURS

МОСКОВЦЕВ АНДРЕЙ ФЁДОРОВИЧ^{1,2}

amoskovtsev@niime.ru

ХАРЧЕНКО ЕКАТЕРИНА ЛЕОНИДОВНА^{1,2}

ekharcheko@niime.ru

¹АО «НИИМЭ»

124460, г. Москва, г. Зеленоград, ул. Академика Валиева, 6/1

²Московский физико-технический институт

(национальный исследовательский университет)

141701, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

MOSKOVTCSEV A. F.^{1,2}

amoskovtsev@niime.ru

KHARCHENKO E. L.^{1,2}

ekharcheko@niime.ru

¹ Molecular Electronics Research Institute JSC

6/1 Academic Valiev St., Zelenograd, Moscow, 124460, Russia

² Moscow Institute of Physics and Technology

(National Research University)

9 Institutskiy Lane, Dolgoprudny, 141701, Russia

В работе рассмотрены различные подходы к детектированию выбросов на SEM-изображениях, что позволяет сделять более точным распознавание контуров топологических структур. Полученные контуры пригодны в качестве входных параметров в задаче калибровки модели фоторезиста.

Ключевые слова: обработка изображений; SEM-изображения; контурный метод; детектирование краев; поиск выбросов.

The paper considers various approaches to the processing of SEM images. In order to facilitate the recognition of the contours of topological structures, approaches to the detection of outliers have been considered and applied. The resulting contours are suitable as input parameters in the problem of calibrating the photoresist model.

Keywords: image processing; SEM-images; contour-based method; edge detection; finding outliers.

ВВЕДЕНИЕ

В последнее время обработка изображений все чаще используется при решении теоретических и прикладных задач. Результатом обработки изображения является его изменение (например цветовая коррекция, сглаживание) или получение ценной информации (например распознавание текста, сегментация). В частности, обработка изображений может быть использована и в фотолитографии, например, для анализа SEM-изображений (SEM-scanning electron microscope). В процессе фотолитографии происходит перенос изображения с фотошаблона пластины с ограничением минимально воспроизводимых размеров. Воспроизведение в фоторезистивной маске элементов с критическими размерами, меньшими длины волны экспонирующего

излучения, требует применения техник повышения разрешения (RET — resolution enhancement technology). Среди RET наиболее часто используемым является проведение коррекции оптической близости (OPC — optical proximity correction) [1, 2, 4].

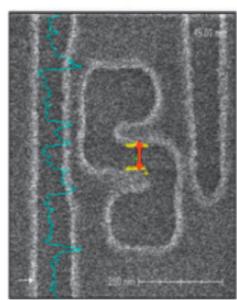
Прежде чем применять данные техники повышения разрешающей способности, необходимо иметь представление о формировании изображения в резисте. Данную задачу выполняют компактные полуэмпирические модели, основанные на результатах измерений размеров тестовых структур (CD — critical dimension) на пластине.

Распознавание контуров структур на основе SEM-снимков поможет значительно сэкономить измерительные ресурсы в задаче калибровки модели фоторезиста. В процессе обработки сложных двумерных топологических конфигураций возникает необходимость измерить два и более элемента одной тестовой структуры. Это влечет за собой написание нескольких рецептов измерения, что значительно увеличивает временные затраты. При проведении экстракции контуров необходимости в этом нет, т. к. для всех элементов, попавших в поле зрения, можно экстрагировать контур и использовать его при калибровке модели фоторезиста [3, 5, 6, 8].

НЕОБХОДИМОСТЬ УДАЛЕНИЯ ВЫБРОСОВ

На используемых SEM-изображениях в процессе обработки нередко можно обнаружить шум или выбросы, которые могут привести к некорректной экстракции контуров. В компьютерном зерении выбросами принято считать области

Классический метод CD



Контурный метод

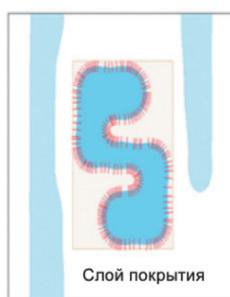


Рис. 1. Разница в количестве контрольных меток с одного SEM-снимка при классическом и контурном методе



цифрового изображения, которые отличаются по таким параметрам, как цвет или яркость от окружающих областей. При этом в области самого выброса свойства изображения можно в некотором приближении считать постоянными. Пример негативного влияния выбросов отражен на рис. 2. Для более наглядной визуализации выбросы были перекрашены в красный цвет. Из-за присутствующих выбросов в контуре появляются дополнительные элементы — небольшие «ответвления» от основной линии, что напрямую влияет на точность измерения CD.

ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ЭКСТРАКЦИИ КОНТУРА

Рассмотрим алгоритм обработки SEM-

изображений для вычисления контуров структур (см. рис. 3). Также отметим, что работать с бинарным изображением проще, чем с изображением в оттенках серого [7]. Поэтому на первом шаге применяется функция пороговой фильтрации: пиксели изображения фильтруются по оттенку серого цвета. Используется шкала, в которой серый цвет имеет 256 градаций, где 0 соответствует черный цвет, а 255 соответствует белый цвет. Значение

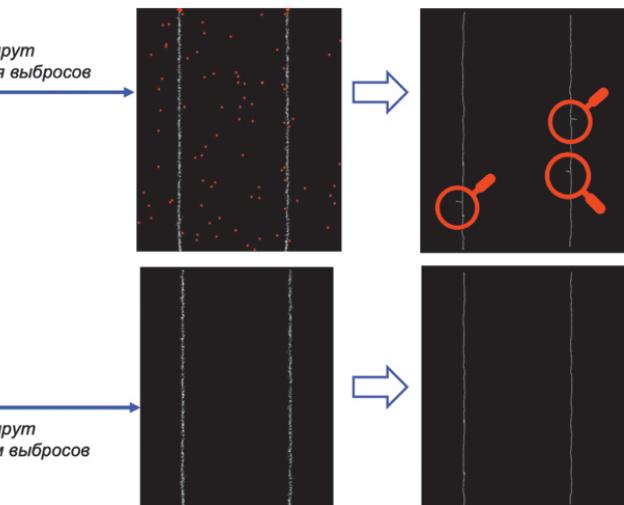


Рис. 2. Необходимость удаления выбросов при обработке изображений

оттенка серого цвета каждого отдельного пикселя будем называть интенсивностью. Ниже приведено пошаговое описание алгоритма.

Шаг 1: пороговая фильтрация. На этом шаге применяется фиксированный уровень порога к каждому элементу массива изображения. Пороговая фильтрация осуществляется встроенной функцией языка python cv2.threshold().

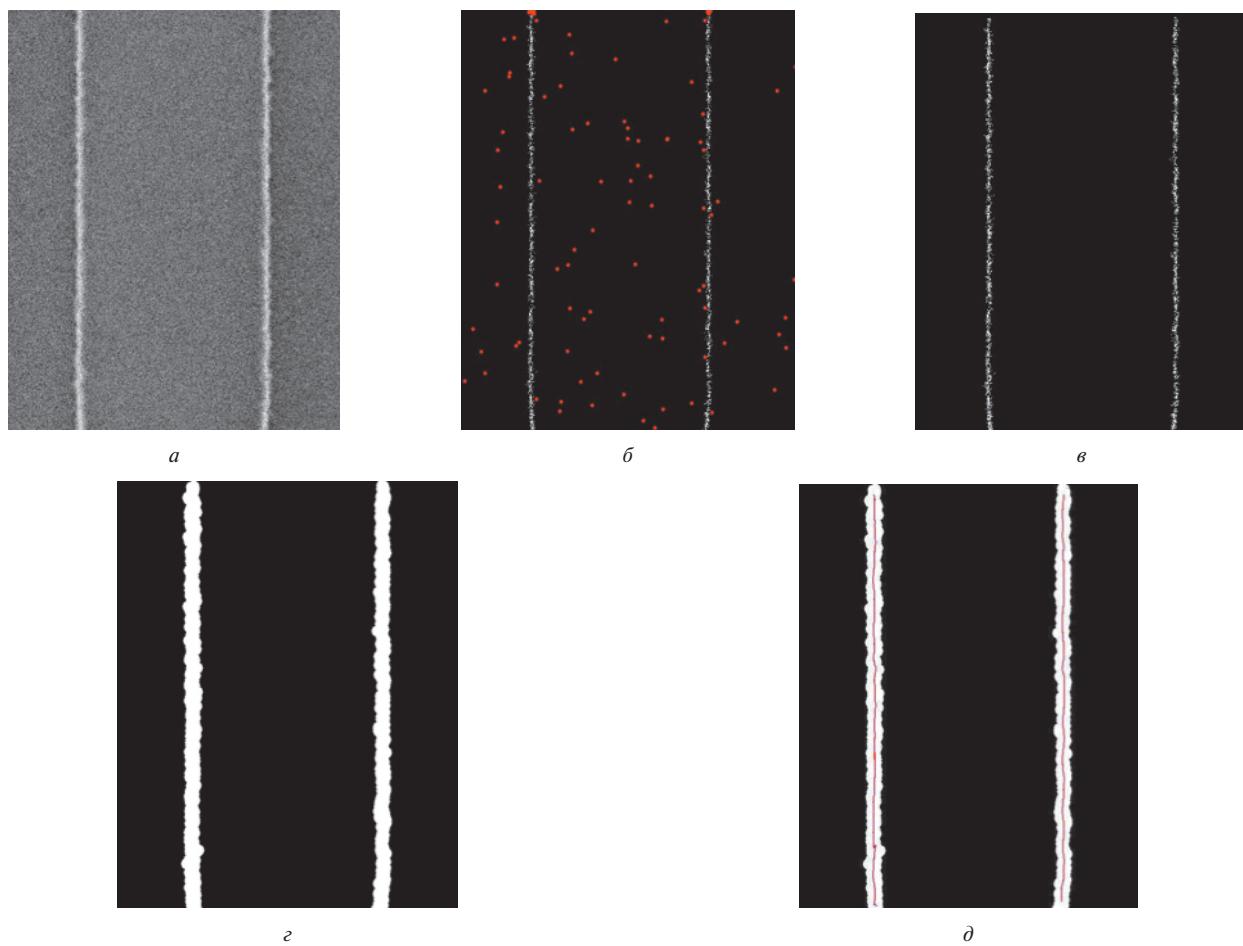


Рис. 3. Общий алгоритм обработки изображения: а — оригинальное SEM-изображение; б — пороговая фильтрация; в — удаление выбросов; г — сегментация проецируемой части; д — выделение серединной линии



Если интенсивность пикселя выше порогового значения, то каждый бит пикселя кодируется 1, что соответствует белому цвету пикселя. Если нет, то каждый бит пикселя кодируется 0, что соответствует черному цвету пикселя.

В итоге мы получаем изображение, на котором помимо основных элементов топологии присутствуют выбросы. Здесь они специально выделены красным цветом и слегка увеличены для более наглядной визуализации.

Шаг 2: на этом шаге происходит детектирование выбросов. Пиксели, соответствующие выбросам, перекрашиваются в черный цвет, тем самым составляя фон изображения.

Шаг 3: на данном этапе происходит сегментация проецируемой области. Используются встроенные функции языка python для поиска (`cv2.findContours()`) и выделения контуров изображения (`cv2.drawContours()`). Во второй функции можно настроить толщину линии контура. Для корректной прорисовки толщину выбирают как можно большей для предотвращения разрывов белой линии. На следующем этапе алгоритма будет показано, что такое уширение области не повлияет на конечное положение контура.

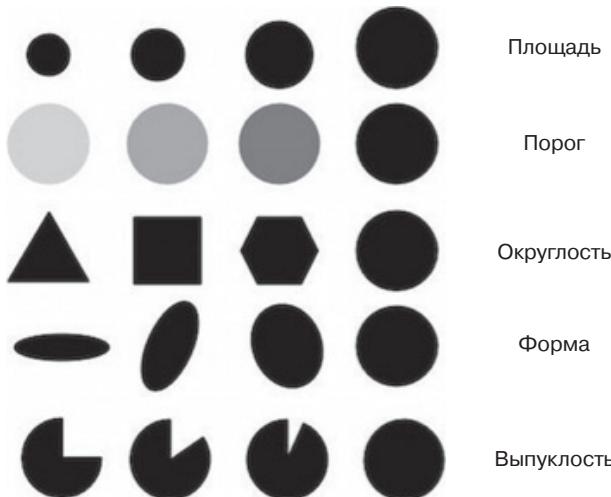


Рис. 4. Параметры для настройки у функции `BlobDetector`

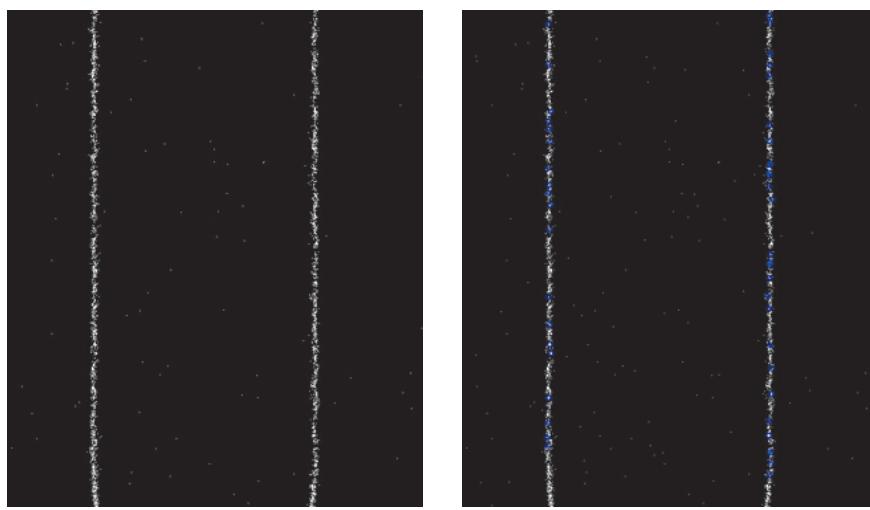


Рис. 5. Применение `BlobDetector`: а — SEM-изображение после применения пороговой фильтрации; б — детектирование выбросов функцией `BlobDetector ()`; выбросы выделены синим цветом

Шаг 4: предполагается, что линия, лежащая посередине проецируемой области, отвечает реальному контуру топологической структуры. На последней картинке показана найденная линия (отображается в красном цвете), лежащая внутри сегментированного фрагмента.

В рамках данной работы подробнее рассматривается шаг обработки, связанный с удалением выбросов.

АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ МЕТОДОВ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ

Рассмотрим существующие в языке python алгоритмы детектирования выбросов на изображениях. Наиболее часто используемыми являются встроенная функция `BlobDetector` и алгоритм `NLOG` (`Normalized Laplacian of Gaussian`). Опишем каждый из них.

Встроенная функция `BlobDetector` работает на основе алгоритма, состоящего из четырех этапов. На первом этапе исходное изображение преобразуется в серию бинарных изображений с применением различных пороговых значений от некоторого минимального (`minThreshold`) до некоторого максимального (`maxThreshold`) значения с определенным шагом (`threshold Step`) между соседними порогами. На втором этапе из каждого бинарного изображения выделяются отдельные компоненты с помощью функции `cv2.findContours()` и вычисляются их центры. На третьем этапе центры из нескольких бинарных изображений группируются по их координатам. Близкие центры образуют одну группу, соответствующую одному большому двоичному объекту. На последнем этапе по группам оцениваются окончательные центры выбросов и их радиусы. Положения выбросов и их радиусы хранятся в виде списка.

Фильтр самих выбросов можно производить по таким параметрам, как площадь, порог, округлость, форма, выпуклость. На рис. 4 представлен набор настраиваемых параметров у функции `BlobDetector`. По умолчанию фильтр настроен на поиск круглых черных выбросов.

Опишем алгоритм `NLOG`. Оператор Лапласа применяется к функции Гаусса и домножается на квадрат стандартного отклонения у функции Гаусса. Получается новая функция $f(\sigma, x, y)$. Далее осуществляется свертка полученной функции с изображением $I(x, y)$:

$$f(\sigma, x, y) \cdot I(x, y) = \sigma^2 \nabla^2 n_{\sigma} \cdot I(x, y),$$

$$\text{где } n_{\sigma} = e^{-\frac{(x+y)^2}{2\sigma^2}}. \quad (1)$$

Локальный максимум выражения (1) — набор параметров (x^*, y^*, σ^*) указывает на положение и размер выброса. Определение локального максимума зависит от того, какой параметр σ был выбран в функции Гаусса, поскольку на практике встречаются выбросы разных размеров. По этой причине свертка функции с изображением производится при различных значениях параметра σ , а локальный максимум выражения находится в пространстве (x, y, σ) . Радиус выброса r и стандартное отклонение σ функции Гаусса для двумерного случая связаны соотношением $r \approx 1.4\sigma$.



Далее рассмотрим применение представленных методов на имеющихся SEM-изображениях.

На рис. 5 демонстрируется результат применения функции `BlobDetector()`. На итоговой картинке выбросы выделены синим цветом. Из рисунка видно, что выбросы вне контура не распознаются. Вместо этого детектируются отдельные пиксели, составляющие контур изображения. Следовательно, такой способ регистрации не может быть применен в работе.

На рис. 6 показан результат применения алгоритма NLOG. На итоговой картинке выбросы выделены красным цветом. Наблюдается регистрация не только самих выбросов, но также и практически всех точек изображения. Таким образом, этот способ регистрации также не подходит для данной работы.

ОПИСАНИЕ СОБСТВЕННОГО МЕТОДА ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ВЫБРОСОВ.

В связи с тем что применение существующих алгоритмов не дает желаемого результата, возникла необходимость в написании собственного алгоритма по поиску выбросов.

В основе алгоритма лежит предположение о том, что т.н. выбросы — это области белых пикселей в окружении черных. Однако, чтобы отличить их от полезных пикселей, участвующих в формировании контура структуры, необходимо варьировать размер выброса и размер окружения. Опишем разработанный алгоритм. Для каждого пикселя $[j, i]$ вначале проверяется условие: является ли пиксель белым. В случае выполнения данного условия идем далее по циклу. Затем проверяется следующее условие: состоит ли окружение пикселя (т.е. матрица A заданного размера) только из пикселей черного цвета. В случае выполнения условия рассматриваемый пиксель перекрашивается в черный цвет. После этого цикл повторяется заново до тех пор, пока не будут проверены все пиксели изображения.

На рис. 7 представлена схематическая иллюстрация алгоритма.

Стоит уточнить, что использования одного «ядра» зачастую бывает недостаточно. На снимках встречаются выбросы различных размеров и имеющие различное окружение. Поэтому для корректного детектирования выбросов следует варьировать следующие параметры в зависимости от качества исходного изображения: размер выброса и количество белых пикселей в его окружении.

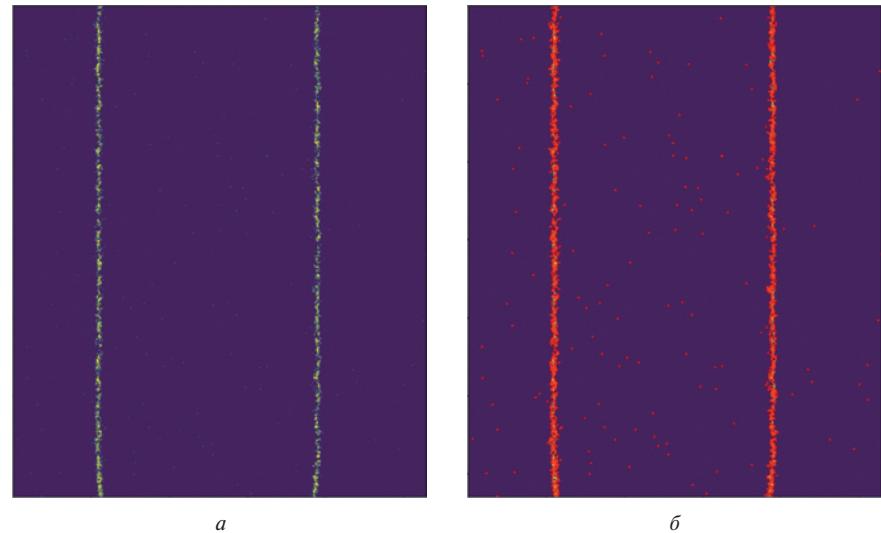


Рис. 6. Применение NLOG: а — SEM-изображение после применения пороговой фильтрации; б — детектирование выбросов функцией `NLOG()`; выбросы выделены красным цветом

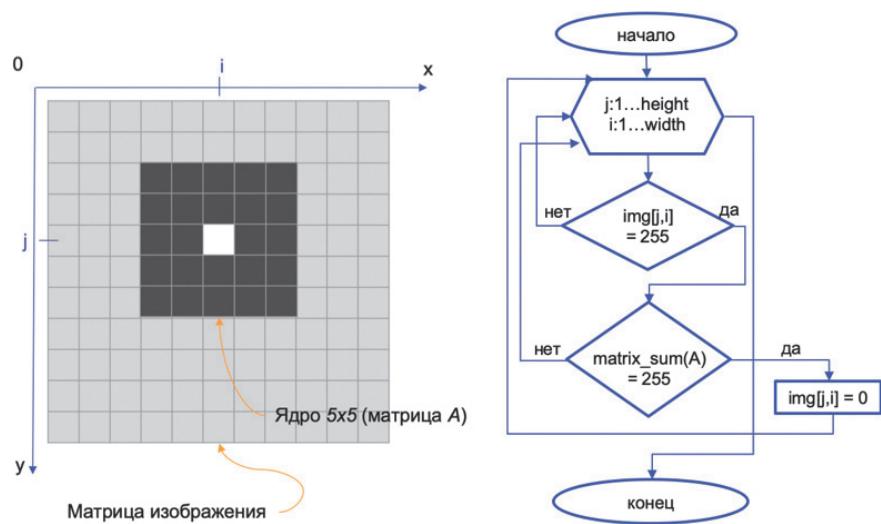


Рис. 7. Разработанный алгоритм детектирования выбросов

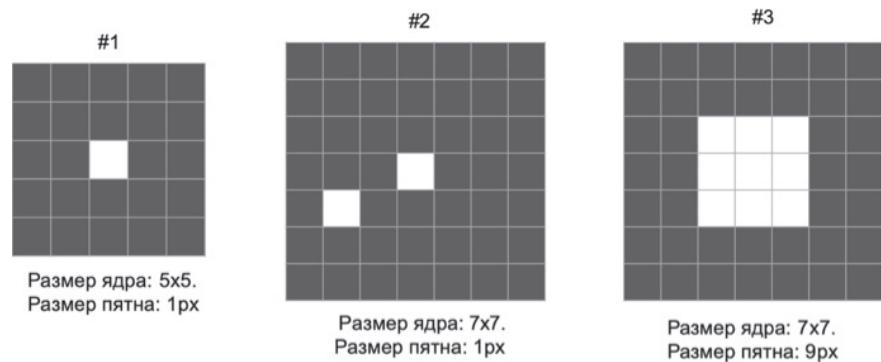


Рис. 8. Пример различных ядер для удаления выбросов

Пример вариации этих параметров приведен на рис. 8. Помимо исходного ядра №1 представлены также ядро №2 (в окружении белого пикселя имеется один белый) и №3 (сам размер выброса составляет 9 пикселей). Их использование позволяет избавиться



от выбросов, которые не удалось детектировать при использовании только одного ядра №1.

При работе с SEM-снимками было обнаружено, что оптимальный результат может быть достигнут при последовательном использовании ядер 1 и 2.

ВЫВОДЫ

Авторы считают, что в данной работе новыми являются следующие положения и результаты:

- разработан собственный алгоритм по избавлению от выбросов на бинарных SEM-изображениях;
- показан более эффективный результат по удалению выбросов по сравнению с алгоритмами BlobDetector и NLOG;
- алгоритм по удалению успешно внедрен в общий маршрут обработки SEM-снимков.

Работа программы была протестирована на 20 тестовых структурах. Во всех случаях удалось удалить лишние точки, не задев при этом важные элементы топологии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красников Г.Я., Орлов О.М. Отличительные особенности и проблемы КМОП-технологии при уменьшении проектной

нормы до уровня 0,18 мкм и меньше // Российские нанотехнологии, 2008. — Т. 3. — № 7–8. — С. 124–128

2. Макарчук В.В., Родионов И.А., Цветков Ю.Б. Методы литографии вnanoинженерии. — 2011.
3. Bernd Küchler, Francois Weisbuch, Wolfgang Hoppe, Jirka Schatz, Martin Bohn, Ulrich Klostermann. Contour-based model calibration to a minimum number of patterns // Proc. SPIE 11613, Optical Microlithography XXXIV, 116130G (22 February 2021):
4. Chris Mack. Fundamental Principles of Optical Lithography, 2007.
5. Francois Weisbuch, Kenneth Jantzen. Enabling scanning electron microscope contour-based optical proximity correction models // J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS 14(2) 021105 (28 April 2015).
6. François Weisbuch, Jirka Schatz, Sylvio Mattick, Nivea Schuch, Thiago Figueiro, et al. Investigating SEM-contour to CD-SEM matching // SPIE Advanced Lithography, Feb 2021, Online Only, France.
7. Nayar Shree K. Monograph FPCV-2-1, Edge Detection. First Principles of Computer Vision, Columbia University, New York, May. 2022.
8. Shunsuke Koshihara, Yoshihiro Ota, Hideo Sakai, Ryoichi Matsuoka. The Challenge to New Metrology World by CD-SEM and Design.