

УДК 004.93`1; 004.932

А.Н. Самойлов, И.В. Шевченко

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского

МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ КОНТУРОВ НА ЦИФРОВЫХ РАСТРОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ С НЕЧЁТКИМ ОТОБРАЖЕНИЕМ ДИСЛОКАЦИЙ В ПЛАСТИНАХ GaAs

Работа посвящена методам получения контуров на пластине GaAs, зафиксированной в виде цифрового растрового изображения. Рассмотрены возможные методы предварительной обработки, сегментации дислокаций. Показано, что для выделения фрагментов дислокаций пластин GaAs возможно использование типовых его признаков: наличие прямых линий граней, сходящихся в общей точке центра единичной дислокации для упрощения дальнейшей обработки. Предложены методы выделения границ контуров, примененные на гранях дислокации, позволяющие описать дислокации как контуры с геометрическими примитивами - прямыми в сочетании со структурным описанием формы дислокации и попиксельного анализа. Предложены методы бинаризации растрового изображения для выделения предполагаемых контуров.

Ключевые слова: глобальная бинаризация, растровое изображение, оконтуривание, дислокация, распознавание, сегментация
Форм. 6. Табл. 1. Рис. 4. Лит. 11.

Постановка проблемы. Развитие солнечной энергетики требует постоянного совершенствования характеристик фотопреобразователей (солнечных элементов) в том числе повышения эффективности преобразования солнечной энергии. Большое влияние на эффективность этих устройств оказывают структура фотоэлектрических пластин (ФЭП) GaAs. Фотоэлектрические пластины GaAs имеют некоторые преимущества для создания эффективных солнечных элементов, поэтому контроль качества – важная часть их производства. Особую трудность обычно вызывает контроль наличия и количества структурных дефектов, в том числе и дислокаций. Качество изготовления пластин определяется величиной плотности дислокаций: отношения их числа к площади проверяемой фотоэлектрической пластины из расчёта на квадратный сантиметр. Плотность дислокаций в пластинах GaAs, произведённых по методу Чохральского имеет порядок $10^3 \dots 10^5$. Поэтому проблема точного контроля плотности дислокаций в процессе производства фотоэлектрических пластин GaAs является актуальной.

Анализ последних исследований и публикаций.

Проблема точности контроля плотности дислокаций освещена в [5]. В этой работе предлагается использовать вариации угла освещения для увеличения точности подсчёта дислокаций с участием человека-оператора.

Нерешённые части проблемы. Развитие методов автоматизированной обработки изображений с целью подсчёта количества дислокаций позволяет значительно упростить труд оператора и повысить эффективность контроля качества фотоэлектрических пластин GaAs. Подсчет количества дислокаций имеет несколько аспектов, затрудняющих автоматическое определение их количества и плотности. Одним из основных аспектов является сложность получения цифрового изображения, адекватно отображающего дислокации фотоэлектрических пластин из GaAs. Это связано с объёмной структурой дислокаций и законами их отображения на плоскости растрового изображения. По этой причине грани дислокаций отображаются с разрывами, что требует исследования методов получения контуров на цифровых растровых изображениях с нечётким отображением дислокаций.

Целью исследования является определение особенностей дислокаций как объекта распознавания и методов получения контуров дислокаций пластин GaAs, зафиксированных в плоскости цифрового растрового изображения для подготовки классификации и распознавания дислокаций.

Основные результаты исследования. Обобщённый план распознавания фрагментов цифрового изображения с дислокациями пластины GaAs может быть реализован в следующих этапах [1]:

1. Предобработка цифрового изображения. Использование методов шумоподавления, неравномерности яркости, коррекции контрастности/яркости для предобработки цифрового растрового изображения.
2. Выделение и сегментация фрагментов, содержащих характерные признаки дислокаций. Критичной является обработка наложенных или искажённых фрагментов для определения признаков.
3. Классификация полученных объектов по идентификационным признакам.

4. Распознавание объекта на основании идентификации по некоторому набору признаков класса дислокации. Подсчёт количества распознанных дислокаций для исследуемой пластины GaAs и расчет плотности дислокаций.

Этап предобработки, учитывая специфику источника цифрового изображения фотоэлектрической пластины GaAs, прежде всего, может включать получение полутонового изображения для сокращения количества обрабатываемой информации и выравнивание уровня с последующим контрастированием и шумоподавлением.

Выделение и сегментация фрагментов с дислокациями позволяет подчеркнуть основные признаки дислокации. Грани дислокации, являющиеся границами между плоскостями, могут быть рассмотрены как прямые линии, ограничивающие плоскости объёмной фигуры и имеющие общую точку пересечения в центре. Поэтому в качестве характерного признака дислокации может использоваться геометрическая прямая грани. Однако случайное расположение граней относительно источника освещения негативно влияет на чёткость (рельефность) отображения основных элементарных составляющих дислокации в плоскости цифрового растрового изображения (рисунок 1). Это проявляется в неполном отображении сходных граней в дислокации.

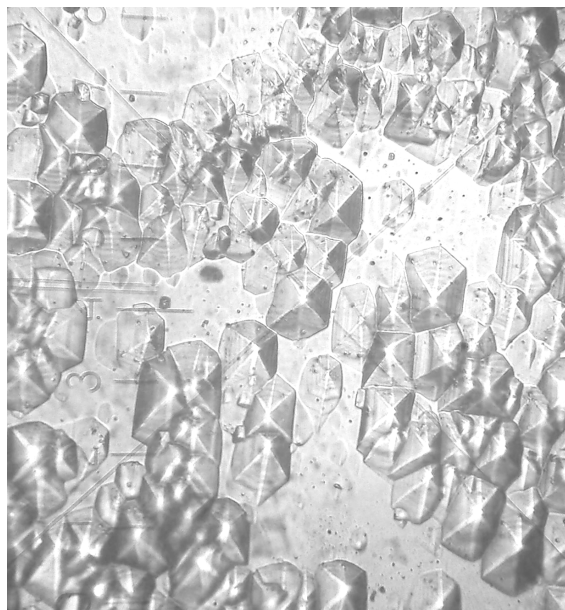


Рис. 1. Область дислокаций пластины GaAs

Пример изображения пластины GaAs для изготовления ФЭП, полученного на интерферометре МИИ-4, с последующим преобразованием к полутоновому 8-битному растровому изображению приведён на рисунке 1. Приблизительный размер интересующих фрагментов дислокаций составляет 5 мкм. Небольшая яркостная разница искомых фрагментов дислокаций и фона не оставляет возможности для сегментации цифрового изображения фотоэлектрических пластин GaAs традиционными методами [2]. Пороговая обработка, широко представленная методами обработки гистограмм, ориентируется на бимодальность гистограммы [1], что для данных фрагментов дислокаций пластин GaAs не характерно.

При ближайшем рассмотрении дислокации имеют особенности взаимного расположения элементарных составляющих: треугольных граней с общими вершинами, что не находит полного отображения в плоскости цифрового растрового изображения. Таким образом, для эффективного распознавания необходим инструмент восстановления граней дислокаций. Грань дислокации – яркий край разделяющий соседние плоскости дислокации или граница перехода со скачком яркости на крае поверхности. Преимущество такого подхода к рассмотрению дислокаций в произвольности геометрических примитивов описываемых в исследуемом фрагменте.

Грань можно определить, используя подходы к выделению ее границ на основе скачкообразного перехода яркости. Можно выделить две группы таких методов: методы, основанные на поиске максимумов, и методы, основанные на поиске нулей. Методы максимума выделяют границы по

критерию первой производной, например операторами величины градиента, с последующим поиском локальных максимумов силы края, с предполагаемым направлением границы, перпендикулярным к вектору градиента. Для подчеркивания перепадов яркости изображения можно использовать методы поиска нулей на основе второй производной по пересечению оси абсцисс на основании критерия равенства нулю. Двумерный дифференциальный оператор носит название оператора Лапласа с предварительной обработкой фильтром сглаживания изображения, обычно фильтром Гаусса [1]. Этот же метод подходит и для выявления дислокаций других типов ориентировки и вида контура дислокации. На рисунке 2 изображено возможное обозначение границ дислокаций.

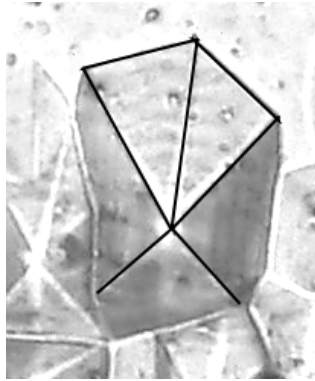


Рис. 2. Фрагмент дислокации пластины GaAs с обозначением граней геометрическими прямыми

Устранение непрерывных граней при отображении дислокации возможно сделать методами восстановления и оконтуривания.

На этапе классификации фрагментов предшествующем этапу распознавания, признаки класса дислокации могут представляться треугольными геометрическими фигурами граней с общим центром. Поэтому, наиболее подходящим способом распознавания контуров дислокаций на цифровом растровом изображении является их представление в виде последовательности отрезков прямых, сходящихся в общий центр, с ограничением грани в точке пересечения с прямыми линиями основания дислокации.

Представление контура геометрическими прямыми упрощает распознавание дислокаций. Если контур представляется последовательностью отрезков прямых, описание дислокаций производится в удобном виде, как для человеческого восприятия, так и для математической обработки. Само описание инвариантно относительно аффинных преобразований и применимо для получения количественных результатов. Использование такого подхода более естественно и экономно для описания контуров при обработке полутоновых и цветных изображений в сравнении с другими широко известными методами [4].

Методы оконтуривания могут быть различными, однако попиксельный поиск необходимых точек контура позволяет более точно определить прямые грани. Сам алгоритм должен предполагать:

1. Использование восьмисвязности. Рассматриваются все ближайшие точки, окружающие текущую точку.
2. Удаление точек сверху, снизу, слева и справа от точки контура в одном направлении с повторением этой операции для всех направлений. Критерием удаления точки как не принадлежащей контуру являются условия: у этой точки нет соседей по направлению удаления; обрабатываемая точка не является концом линии грани; удаление обрабатываемой точки не повлияет на связанность ближайших соседей; или делается вывод, что это изолированная точка.
3. Многократное повторение пункта 2 для получения точной границы.

Применение алгоритма уточнения границы продолжается до толщины в один пиксель. Предполагаемое уточнение границ методами прореживания позволяет [2]:

- получить точные границы, повышающие эффективность распознавания объектов;

- получить точные результаты использования трансформации Хафа или других подобных методов, имеющих более точный отклик для обнаружения прямых.

Таким образом, применение попиксельных методов в комбинации со структурными методами распознавания дислокации позволяет повысить эффективность классификационных признаков распознавания объектов дислокаций пластин GaAs для изготовления фотоэлектрических пластин.

Представление контура для вышеописанных методов, возможно, после некоторых предварительных шагов для выделения области поиска.

На рисунке 3а представлен результат последовательной обработки цифрового растрового изображения. Результат обработки получен как последовательности следующих операций с растровым изображением: получение цифрового растрового изображения, преобразование в полутоновое изображение, преобразование до 8 - битного изображения. После этого полученное изображение I обрабатывается с целью усиления существующих граней (границ), которые имеются на изображении с помощью нерезкого маскирования. Процесс нерезкого маскирования состоит из двух шагов:

1. Вычитания сглаженной версии изображения из оригинала этого изображения. Такая операция имеет результирующую маску M , полученную вычитанием сглаженной версии цифрового растрового изображения \tilde{I} из оригинала I , в соответствии с выражением (1):

$$M \leftarrow I - (I * \tilde{H}) = I - \tilde{I}, \quad (1)$$

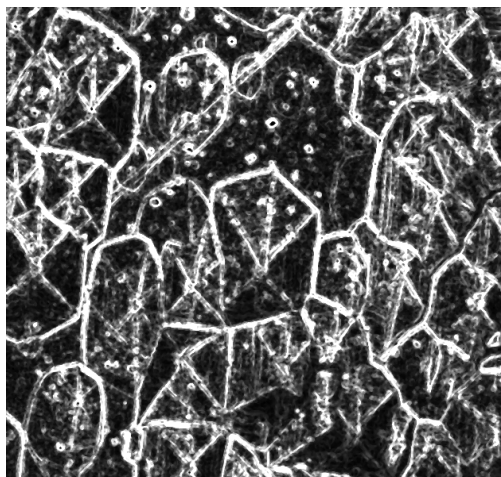
где H – нормализованный фильтр сглаживания, настройка которого осуществляется коэффициентом масштабирования, который вводится для масштабирования действия фильтра.

2. Для получения изображения I с повышенной резкостью границ, полученная маска M добавляется к оригинальному изображению I , с учётом весового фактора a , который определяет степень обработки по резкости результирующего изображения \tilde{I} , как показано в формуле (2):

$$\tilde{I} \leftarrow I + a \cdot M, \quad (2)$$

Так как $M \leftarrow I - \tilde{I}$, то формула (2) после замены эквивалентна (3):

$$\tilde{I} \leftarrow I + a \cdot (I - \tilde{I}) = (1 + a) \cdot I - a \cdot \tilde{I}, \quad (3)$$



а)



б)

Рис. 3. Фрагмент дислокации пластины GaAs
а) с обработанными гранями в процессе нерезкого маскирования
б) эталонное изображение в битональном виде

Целью нерезкого маскирования является получение усиленных краёв на растровом изображении фрагмента.

Выделение усиленных краёв изображения производится на основе детектора Собеля. Используется два 3×3 ядра свертки для определения вертикальных и горизонтальных границ на основе производных. Конечное изображение формируется путем объединения двух производных с использованием квадратного корня из суммы квадратов. Сглаживание результата проводилось медианным фильтром дающим усреднение яркости пикселя, вычисляемой по окружающим пикселям цифрового растрового изображения. На рисунке 3 а представлен результат обработки цифрового растрового изображения для непосредственного выделения интересующих контуров. Бинаризация для получения эталонного битонального изображения на рисунке 3б, проводилась алгоритмом IsoData в неавтоматическом режиме.

Второй метод получения контура после получения цифрового растрового изображения и преобразования в полутоновое 8-битное изображение, производит улучшение контраста, после чего находит усиленные края изображения детектором Собеля. Улучшение контраста изображения получено эквализацией гистограммы изображения с последующим сглаживанием результата медианным фильтром. Сглаживание результата производится медианным фильтром по окружающим пикселям цифрового растрового изображения. На рисунке 4а представлен результат обработки цифрового растрового изображения по второму методу. Результат этого этапа подвергается обработке для получения растрового изображения в битональном виде, как показано на рисунке 4б.

Бинаризация для получения эталонного битонального изображения на рисунке 4б, проводилась аналогичным методом, что и для эталона на рисунке 3б [6].

Оценка качества обработки полутоновых 8-битных растровых изображений проводилась на основании расчета показателей качества Q_n в сравнении с эталоном. Ранжирование показателя проводилось по минимальному значению Q_n для метода нерезкого маскирования (рисунок 3б) и процесса эквализации (рисунок 4б).

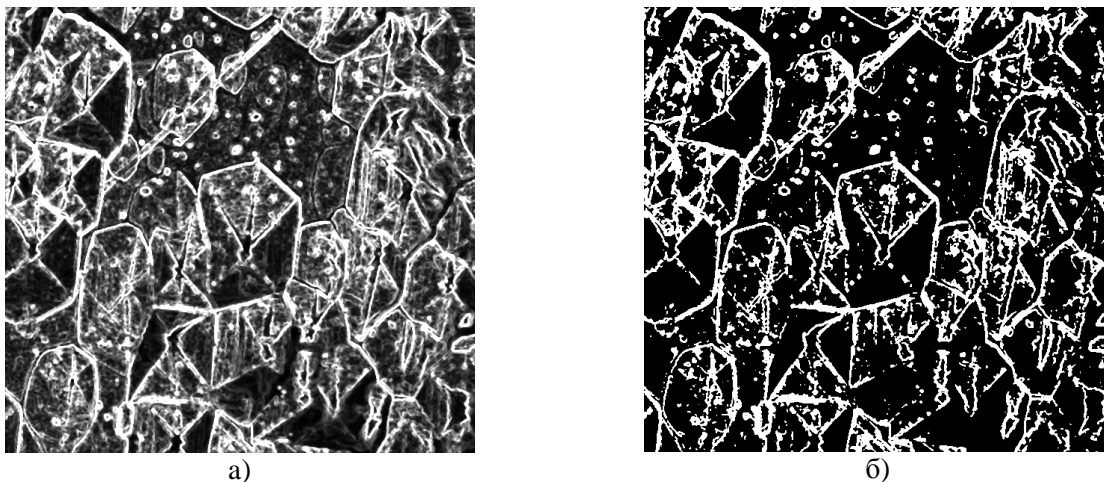


Рис. 4. Фрагмент дислокации пластины GaAs
а) с обработанными границами в процессе эквализации
б) эталонное изображение в битональном виде

Показатель качества Q_n рассчитан после экспериментальной обработки полутоновых изображений глобальными методами бинаризации в автоматическом режиме. Выбор методов осуществлялся на основе экспериментальных исследований приведенных в [7]:

- Intermodes [8];
- IsoData [9];
- Li [10];
- Otsu [11].

Следует заметить, что такие процедуры применяются после устранения неравномерности яркости фона растрового изображения. Эти методы показали наиболее устойчивую работу в

автоматическом режиме и применялись для расчета результатов бинаризации фрагментов для двух случаев усиления краев (рисунок 3б и рисунок 4б). Область интереса предположительно содержит фрагмент дислокации, после выбора оператором соответствующего метода бинаризации с номерами $n = 1, 2, 3, 4$ соответственно. В дальнейших расчётах использовались следующие показатели: S_{S_0} – общая площадь всех фрагментов дислокаций для эталона; S_{SN} – общая площадь всех найденных фрагментов дислокаций для изображения бинаризованного n -методом; S_{F_0} – площадь фрагментов дислокаций области интереса для эталона; S_{fn} – площадь фрагмента дислокаций области интереса для изображения бинаризованного n -методом; S_{A_0} – площадь всех фрагментов эталона за исключением фрагментов области интереса: $S_{A_0} = S_{S_0} - S_{F_0}$; S_{an} – площадь фрагментов дислокаций после бинаризации n -методом, за исключением фрагментов дислокаций области интереса: $S_{an} = S_{SN} - S_{fn}$.

Для количественной сравнительной оценки используемый показатель качества Q_n для n -метода глобальной бинаризации, вычисляется как сумма относительных показателей модуля разности критерия оценки n -метода и эталона. Относительные показатели рассчитывались по критериям:

- общей площади всех обработанных фрагментов, исключая область интереса:

$$\frac{|S_{an} - S_{A_0}|}{S_{A_0}}, \quad (4)$$

- площадей фрагментов области интереса, выбранных для характеристики качества:

$$\frac{|S_{fn} - S_{F_0}|}{S_{F_0}}, \quad (5)$$

Таким образом, показатель качества для n -метода:

$$Q_n = \frac{|S_{an} - S_{A_0}|}{S_{A_0}} + \frac{|S_{fn} - S_{F_0}|}{S_{F_0}}, \quad (6)$$

где $S_{A_0} = S_{S_0} - S_{F_0}$, $S_{an} = S_{SN} - S_{fn}$.

Показатель качества Q_n учитывает относительную разницу качества бинаризации по вышеописанным двум критериям в сравнении с эталоном для каждого из n -методов обработки исходного полутонового растрового изображения. Поэтому, наилучший метод бинаризации из предложенных имеет минимальное значение Q_n . Результаты количественной оценки методов Intermodos, IsoData, Li, Otsu представлены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты оценки методов глобальной бинаризации по качеству обработки авторская разработка

Метод глобальной бинаризации	Представление контура			
	Нерезкое маскирование		Эквализация гистограммы	
	Показатель качества	Условное место	Показатель качества	Условное место
Intermodos	1,453	1	1,146	1
IsoData	2,667	3	1,735	2
Li	6,574	4	5,262	3
Otsu	2,5624	2	1,735	2

Сравнение используемых методов бинаризации для нерезкого маскирования и эквализации гистограммы показывает, что использование бинаризации методом Intermodos дает наименьшее отклонение от эталонного результата извлечения границ на цифровом растровом изображении. Методы IsoData, Li, Otsu также могут быть применены учитывая их устойчивые результаты при обработке зашумленных изображений [7].

Выводы. В данной работе исследованы этапы и методы распознавания дислокаций с учётом особенностей их отображения на плоскую поверхность цифрового растрового изображения, практическая значимость которых состоит в возможности контроля качества производства пластин GaAs для изготовления ФЭП по критерию плотности дислокаций. Предварительная обработка может содержать прежде всего процедуры устранения неравномерности освещения, для обеспечения контрастирования и эквализации гистограммы растрового полутонового изображения с целью выделения фрагментов дислокаций пластины GaAs.

Использование типичных признаков наличия прямых линий граней сходящихся в общей точке центра единичной дислокации, позволяет представить дислокации отрезками прямых. Такое описание удобно как для человеческого восприятия, так и для обработки нейронными сетями. Само описание инвариантно относительно аффинных преобразований и применимо для получения количественных результатов. Распознавание предпочтительней производить на основе структурного описания формы дислокации и попиксельного анализа, что может быть основой признаков класса для этапа классификации. Это повысит точность определения плотности дислокации пластины GaAs. Сегментация выделенных фрагментов возможна с применением операторов выделения границ и восстановления контуров, где элементарной контурной кривой является прямая ограниченная общей для всех граней вершиной дислокации и её основанием. Такое описание универсально и подходит для любой формы дислокации.

Оконтуривание и последующее уточнение границы методами скелетизации в комплексе с методами восстановления контуров, позволяет подготовить геометрические прямые граней фрагментов дислокаций для этапа классификации фрагментов.

Получены экспериментальные результаты показывающие целесообразность использования глобальных методов бинаризации Intermodes [8], IsoData [9], Li [10], Otsu [11] для этапа оконтуривания цифровых растровых изображений с нечётким отображением дислокаций в пластинах GaAs. Отмечено, что такие методы наиболее эффективны после предварительной корректировки неравномерности освещённости пластины GaAs в процессе получения и обработки цифрового изображения.

Наиболее результативным методом получения битонального изображения, согласно проведенных экспериментов является Intermodes [8]. Выбор метода получения битонального изображения, служащего основой для дальнейших процедур восстановления контуров и утоньшения полученного скелета, является значимой задачей для повышения эффективности процедур распознавания в целом и определения границ контуров на этапе выделения и сегментации фрагментов растрового цифрового изображения с нечётким отображением дислокаций пластин GaAs.

1. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений: Пер. с англ. / Под ред. Чочиа П.А. / М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.
2. Путятин Е.П., Аверин С.И. Обработка изображений в робототехнике. М: Машиностроение, 1990. – 320 с.
3. Павлидис Т. Алгоритмы машинной графики и обработки изображений. // – М.: Радио и Связь, 1986. – 394 с.
4. Ту Дж., Гонсалес Р. Принципы распознавания образов / перевод с англ. И.Б. Гуревича под ред. Ю.И. Журавлёва. — М.: Мир, 1978. — 401 с.
5. Иванова А.И., Долматов А.Б., Соловьева Т.И., Кураева Н.О., Блохина Г.С. Изучение дислокационной структуры монокристаллов германия методом избирательного травления. // – Вестник ТвГУ. Серия "Физика". 2004. № 4(6) 2004. № 4(6). С. 65 – 71
6. Ridler T.W. and Calvard S. Picture thresholding using an iterative selection method // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1978. – № 8. – PP. 630 – 632.
7. Самойлов А. Н. Сравнение эффективности глобальных методов бинаризации растровых цветных изображений. / Самойлов А. Н., Петренко В. Р // – Вестник КрНУ имени Михаила Остроградского. – 2012. – № 4(75). – С. 49 – 54.
8. Sezgin M. and Sankur B. Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation // Journal of Electronic Imaging. – 2004. – № 13 (1). – PP. 146 –165.
9. Ridler T.W. and Calvard S. Picture thresholding using an iterative selection method // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1978. – № 8. – PP. 630 – 632.
10. Sezgin M. and Sankur B. Survey over Image Thresholding Techniques and Quantitative Performance Evaluation // Journal of Electronic Imaging. – 2004. – № 13 (1). – PP. 146 –165.
11. Otsu N. A thresholding selection method from graylevel histogram // IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics. – 1979. – № 9. – PP. 62 – 66.