

Самойлов А. Н.,
Шевченко И. В.

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ВЫДЕЛЕНИЯ БИНАРИЗОВАННЫХ ФРАГМЕНТОВ ЯМОК ТРАВЛЕНИЯ ПЛАСТИНЫ ПОЛУПРОВОДНИКА

Исследованы возможности выделения фрагментов контуров ямок травления дислокации на цифровом изображении пластины полупроводника на примере арсенида галлия. Разработаны метод фильтрации бинаризованных фрагментов ямок травления, метод удаления контуров микродефектов, а также критерии для выделения основных значимых фрагментов контуров. Приводится пошаговое описание методов.

Ключевые слова: ямки травления, дислокация, фрагменты контура, арсенид галлия, цифровое изображение.

1. Введение

Структурное совершенство выращенного монокристалла полупроводника методом Чохральского определяется плотностью дислокаций.

Повышение значений коэффициента извлечения материала и коэффициента выхода в готовую продукцию влияет на эффективность производства монокристаллов полупроводника. Качество монокристалла арсенида галлия, может быть определено применением мониторинга плотности дислокаций в одной партии пластин полупроводника.

Подсчет плотности дислокаций, как значимого показателя структурного несовершенства в процессе диагностики массового производства монокристаллов, является весьма трудоемким.

Для оценки величины структурного несовершенства пластины полупроводника, наиболее доступным и простым в реализации является метод селективного травления и световой микроскопии, который и нашел широкое применение. Контрастные отражения, получаемые после освещения пластины на ямках травления, зависят от степени изменения интенсивности отраженного света после химического избирательного травления и последующей полировки.

В результате, полученные дислокации отображаются на плоскость цифрового изображения пластины полупроводника в виде ямок травления дислокаций.

Для обнаружения дислокаций, возникающих при выращивании монокристаллов полупроводниковых материалов и при их последующей обработке, необходима фильтрация фрагментов ямок травления дислокаций.

Специфической проблемой подсчета количества ямок травления, является несовершенство их отображения как объемных геометрических фигур в плоскости снимка пластины полупроводника [1].

Учитывая наличие фрагментов, отражающих структурное несовершенство в контрастном изображении, необходимы методы фильтрации контуров, не принадлежащих к категории ямок травления дислокаций пластины полупроводника [1–4] и правила выделения

фрагментов, относящихся к фрагментам ямок травления дислокаций, что и обуславливает актуальность проведенного исследования.

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

Локализация фрагментов контуров предполагает применение признаков подчеркивающих особенности контуров дислокаций. Учитывая многообразие фрагментов, представленных на контрастном изображении поверхности пластин полупроводника [4], остановимся на рассмотрении способов получения характеристик фрагментов ямок травления методов описания контура.

В работе [5] рассмотрены подходы к восстановлению линии контура и предложены методы получения дескрипторов формы и методов описания контура. Однако, получение множества фрагментов, которые могут быть обработаны упомянутыми методами восстановления контуров является отдельной задачей, которая не может быть решена без предварительной локализации и выделения смежных фрагментов ямок травления. Объединить фрагменты относительно контура дислокации и увеличить эффективность обнаружения дислокаций в плоскости бинаризованного изображения пластины полупроводника возможно, если использовать несколько признаков. Использование таких признаков потребует описания некими универсальными значениями дескрипторов.

Локализацию контура можно предусмотреть по имеющимся признакам толщины линии контура дислокации, группировку фрагментов с отделением контура фрагментов дислокаций от артефактов в плоскости бинаризованного цифрового изображения пластины арсенида галлия.

В работе [6] предлагаются три основные категории дескрипторов:

- дескрипторы трехмерных структур;
- дескрипторы границы;
- дескрипторы области.

Учитывая, что признаки фрагментов реализовываются в плоскости бинаризованного изображения ямок

травления на пластине полупроводника, дескрипторы для описания трехмерных структур можно исключить из дальнейшего рассмотрения.

В работе [7] предложены следующие инструменты для описания границ:

- цепные коды;
- аппроксимация многоугольниками;
- дескрипторы Фурье;
- сигнатуры;
- топологические дескрипторы;
- реляционными дескрипторы.

Цепные коды [8, 9] описывают контура последовательностью отрезков прямых линий сохраняя его длину для всех направлений в форме 4- или 8-связной решетки. Контур представляется как последовательность прямых линий, соединяющих точки изменения направления контура в узлах наложенной на плоскость изображения координатной сетки. Направления задаются выбранным кодом. Площадь ячейки внутри границы равна 1, если она больше определенного числа, в противном случае значение 0. Недостатком является зависимость полученного цепного кода для описываемого контура от точки обнаружения и начала описания границы контура. Нормирование позволяет обходить данный недостаток. Метод актуален для непрерывных контуров ямок травления [10].

Способ аппроксимации многоугольниками применяется при условии полной точности и равенства числа сегментов многоугольника и точек замкнутой границы. Каждая пара соседних точек определяет сегмент многоугольника. Наибольшее применение получил алгоритм построения триангуляции Делоне [11], а также алгоритмы: наименьшего периметра, интуитивного объединения и разбиения для непрерывных контуров. Достоинством является качественное определение формы границы с помощью минимального числа многоугольных сегментов. Необходимы мощные аппаратные средства воспроизведения графической информации для оптимизации метода и реализации аппаратно.

Дескрипторы Фурье [7] рассчитываются на комплексной плоскости, где каждая координата (x, y) точки границы M соответствует комплексному числу вида $(x + jy)$. Функция точек границы представляется в виде преобразования Фурье $F(u)$, $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$. Если M является кратной степени два, $F(u)$ вычисляется с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. В силу необходимости только нескольких первых компонент $F(u)$ для последующей идентификации, преобразование Фурье легко нормируется для изменения размера, поворота. Масштабирование контура достигается умножением компонент преобразования Фурье на константу, что эквивалентно умножению границы на один и тот же множитель [6]. Поворот на угол θ осуществляется умножением элементов $F(u)$ на $\exp(j\theta)$. В декартовом пространстве дескрипторы Фурье подобны цепному коду для описания границы объекта. В отличие от цепного кода они могут формулироваться для непрерывных кривых. Дескрипторы Фурье реализованы в большинстве промышленных оптических систем на основе мощных вычислительных средств и описывают непрерывные контуры.

Дискретные граничные кривые имеют существенные недостатки. В 8-компонентной окрестности выборки по контуру на плоскости не равноудалены. В 4-ком-

понентной окрестности при равноудаленной выборке линия контура прерывистая, поскольку участки граничной кривой могут идти только в горизонтальных и вертикальных направлениях со стремлением удлиняться. Поэтому формирование непрерывной граничной кривой по точкам на прямоугольной сетке не кажется хорошей идеей. Альтернатива — выделение граничных кривых объекта с точностью до фрагментов пикселя из полутоновых изображений, что требует точного выделения его из изображения и вычислительные мощности, что в комплексе создает нелегкую задачу [12].

Сигнатура может применяться в качестве дескриптора как одномерная функция для описания границы контура. Приведем следующий пример: линия, проведенная от центра контура к границе, описывается функцией угла, которая зависима от точки отсчета и периметра области. Наиболее удачная реализация, это применение в качестве моментов определяющих характеристики конкретной линии контура. Достоинством дескриптора сигнатуры является простота обработки однокоренной функции, описывающей фрагменты. При описании ямок травления дислокаций, недостатком сигнатурного описания является невозможность представления бинаризованных фрагментов прерывистого отображения в плоскости цифрового изображения [6]. Недостатком дескрипторов Фурье и полярных методов сигнатуры является зависимость полученных данных от перемещения и вращения.

Более полную информацию о характеристиках области ограниченной линиями контура может дать текстура, скелет объекта. Структурные методы описывают взаимное расположение фрагментов искомого образа. Дескриптор текстуры описывает свойства поверхности с точки зрения однородности, регулярности каких-либо особенностей, например шероховатости [7]. Применение дескрипторов текстуры подходит для описания особенностей внутренней области и других аналогичных характеристик. Дескриптор текстуры объекта можно получить как структурными, так и статистическими методами. Статистические методы удобны для описания однородности и регулярности, например зернистость, узор. Недостатки применения дескрипторов текстуры проявляются на нерегулярных проявлениях ямок травления дислокаций.

Топологические признаки удачно представляют свойства фигур, инвариантные к деформациям. Однако, ямки травления в плоскости бинаризованного изображения имеют разное число фрагментов, а сами фрагменты будут смежными с разрывами. Топологические дескрипторы могут быть полезными дополнительными признаками для характеристики области на изображении, если основные признаки будут актуальными для конкретного фрагмента [7].

Реляционные дескрипторы, имеющие сходные достоинства топологическим [7], могут применяться для областей и контуров с целью зафиксировать в форме правил подстановки элементарные конфигурации на границе или внутри области.

В случае отличия распознаваемых объектов по некоторым параметрам, для их описания могут быть эффективны основные дескрипторы, характеризующие форму и общие характеристики: площадь объекта, большую и малую оси объекта, периметр области объекта, связность отдельных областей одного объекта.

В работах [13–15] рассмотрены *меры формы*, позволяющие выразить в числовом виде геометрические атрибуты объекта для формализованного описания формы контура ямки травления или фрагмента.

Атрибуты периметра границы, площади, радиуса и формы контура могут быть вычислены путем подсчета количества пикселей на границе. Недостатком таких атрибутов является зависимость от масштаба и размера описываемого контура, в то время как понятие формы инвариантно к масштабу, размеру и ориентации.

Число Эйлера [13] определяется разницей количества подключенных регионов и отверстий в объекте. Меры числа Эйлера, симметрии и числа формы инвариантны к упомянутым факторам.

В работе [16] описываются *дескрипторы формы* для бинаризованного контура. Описывается округлость (или компактность), симметрия (или число формы), периметр и площадь.

Округлость является одним из простейших параметров формы [12, 14, 15].

Дескриптор округлости, площадь, периметр инвариантны к масштабу, размеру и ориентации не зависят от ориентации объектов на плоскости изображения.

Описание формы при помощи *ненормированного показателя* округлости определяется как отношение квадрата периметра к площади фигуры [12, 14, 15]. Как правило, значение параметра округлости стремится к большим значениям для вытянутых объектов.

Нормированный признак округлости [12, 14, 15] показывает степень округлости формы исследуемого многоугольника с максимальным значением единица, что удобно для исследования фрагментов без учета периметра и площади.

В условиях изменчивости основных признаков ямок травления дислокаций инвариантные к масштабу, повороту, размеру и ориентации параметры округлости, периметра и площади будут использованы в качестве признаков для выделения бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника.

Таким образом, в процессе исследования необходимо решить проблему отбора фрагментов по площади и смежности отдельных фрагментов для выделения ямок травления, используя вышеописанные дескрипторы формы.

3. Объект, цель и задачи исследования

Объект исследования — процесс выделения ямок травления дислокаций в пластинах полупроводника арсенида галлия.

Целью исследования является поиск результативных методов определяющих фрагменты, относящиеся к предполагаемым ямкам травления контуров дислокаций на бинаризованном изображении пластины полупроводника.

Для достижения поставленной цели необходимо решить такие задачи:

1. Определить подмножество значимых фрагментов бинаризованных контуров ямок травления.
2. Выбрать признаки значимых фрагментов и реализовать их фильтрацию.
3. Обосновать и экспериментально подтвердить удаление микродефектов на пластине полупроводника.
4. Сформулировать критерии для подтверждения подлинности отобранных значимых фрагментов.

4. Материалы и методы исследования

Перечислим методы подлежащие разработке.

Метод фильтрации бинаризованных фрагментов уменьшает количество вероятных для рассмотрения ямок травления дислокации, определяя подходящие фрагменты на бинаризованном изображении поверхности пластины полупроводника.

Метод удаления контуров микродефектов позволит ограничить число рассматриваемых фрагментов путем исключения контуров микродефектов.

Применение критериев выделения основных значимых фрагментов контура позволяет сформировать правила отбора для дальнейшей обработки бинаризованного изображения.

Предлагаемые методы дополняют признаки ямок травления, предложенные в работах [4, 5], в направлении исследований с целью получения сведений о плотности дислокаций в процессе мониторинга производства объемных монокристаллов полупроводника по методу Чохральского и создания информационной системы технической диагностики качества выхода продукции.

5. Разработка метода фильтрации бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника

Все множество фрагментов в плоскости цифрового растрового изображения разделим на значимые и незначимые фрагменты.

Пусть A множество всех фрагментов бинаризованного изображения пластины арсенида галлия.

Значимое подмножество B — часть фрагментов, определяющих основные части линии контуров ямок травления на изображении пластины полупроводника.

Значимыми являются фрагменты контурной (внешней) или внутренней части ямки травления дислокации, охватывающие некоторую площадь в плоскости цифрового растрового изображения. Как правило, это контуры ямок травления округлой и незамкнутой округлой формы с большой площадью и периметром в сравнении с незначимыми фрагментами на бинаризованном изображении поверхности пластины арсенида галлия.

Подмножество незначимых фрагментов C — это остальные фрагменты множества A не вошедшие в подмножество B . Их смежность со значимыми областями может говорить об принадлежности к бинаризованному изображению для конкретно рассматриваемой ямки травления дислокации.

Вышесказанное можно выразить следующей формулой:

$$A = (B \cup C). \quad (1)$$

Для обнаружения и фильтрации бинаризованных фрагментов, представленных после этапа предварительной обработки в виде фрагментов ямок травления различного происхождения множества, в том числе не относящихся к ямкам травления дислокаций, будут использоваться меры форм, представленные признаками округлости, площади, периметра. Эти признаки инвариантны к масштабу, размеру и ориентации не зависят от ориентации объектов на плоскости изображения.

Плоскость, отображающая бинаризованные фрагменты растрового изображения пластины полупроводника, описана интенсивностью бинаризованных элементов изображения: $I = 255$; $I = 0$. Интересующие фрагменты имеют интенсивность $I = 0$, а остальная поверхность $I = 255$.

Фрагменты, определяющие предполагаемую линию контура ямки травления дислокации, имеют ширину линии контура T_{ni} , а также протяженность этой линии L_i . Значение L_i ограничено неравенством: $L_i \geq L_{pk}$, где L_{pk} — значение протяженности линии эталонного контура, получаемого от выделенного оператором контура ямки травления; L_i — значение протяженности линии предполагаемого контура. Интенсивность яркости линии контуров $I = 0$ [4, 5]. Длина линии контура не может быть определена в силу его прерывистости.

Наиболее предсказуемым признаком ямки травления дислокаций является значение текущей ширины T_{ni} , которая определяется для контура исходя из эталонной величины T_{\min} [4]:

$$T_{\min} \leq T_{ni} \leq 3T_{\min},$$

где T_{\min} — эталонное значение ширины линии контура; T_{ni} — текущее значение обнаруживаемой линии предполагаемого контура. Величина максимальной ширины линии контура $3T_{\min}$ определяется возможными наложениями граней нескольких смежных дислокаций в плоскости бинаризованного изображения.

Предлагается использовать показатель округлости для описания линии контура с текущей толщиной $T_{\min} \leq T_{ni} \leq 3T_{\min}$ [4].

Описание формы при помощи *ненормированного признака округлости* [12, 14, 15] определяется как отношение квадрата периметра к площади фигуры:

$$c = \frac{p^2}{A}, \quad (2)$$

где p — периметр фигуры; A — площадь фигуры.

Как правило, значение параметра округлости c стремится к большим значениям для вытянутых объектов.

Нормированный признак округлости [12, 14, 15], в отличие от формулы (2) имеет максимальное значение 1. Степень округлости формы исследуемого многоугольника определяется формулой:

$$c = \frac{4\pi A}{p^2}, \quad (3)$$

где p — периметр фигуры; A — площадь фигуры.

Нормированный признак округлости (3) обладает несомненным преимуществом, позволяя фильтровать фрагменты с любым масштабом и формой, используя лишь заданные характеристики округлости в виде числового коэффициента без необходимости использования абсолютных величин периметра и площади.

Для уточнения возможности использования показателя округлости по формуле (3), возьмем за основу постоянную ширину линии контура фрагментов контуров ямок травления дислокаций в пикселях изобра-

жения [4, 5]. Определяя эталонную ширину с выбором оператора $T_{\min} = 5$, оценим возможности показателя округлости по формуле (3) для фигуры прямоугольной формы и окружности. Табл. 1 содержит некоторые расчеты округлости для различных соотношений признаков площади и периметра, что позволяют оценить соотношение сторон для расчета показателя округлости.

Таблица 1

Оценка значения нормированного признака округлости c для различных соотношений сторон с шириной линии контура 5 пикселей с периметром фигуры p и площадью фигуры A

Соотношение сторон	Ширина линии контура (пиксели)	A	p	c
окружность		19,630	15,708	0,999
1:1	5	25	20	0,785
1:2	5	50	30	0,698
1:3	5	75	40	0,589
1:4	5	100	50	0,503
1:5	5	125	60	0,444
1:6	5	150	70	0,385

Заметим, что использование соотношения сторон 1:4 для изображения фрагмента позволяет определить значение признака округлости, которым можно охарактеризовать фрагменты контуров ямок травления дислокаций.

Следует отметить важность показателя периметра. Практически равная площадь фрагментов контура (рис. 1, а, б) позволяет уточнить компактность границ бинаризованного фрагмента.

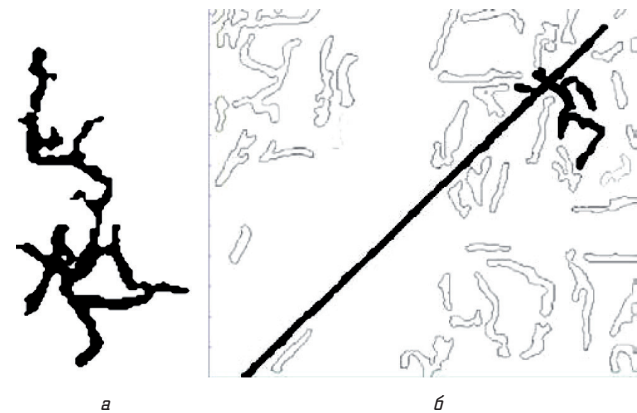


Рис. 1. Изображение фрагментов с подобными величинами площади: а — $A = 2184$; б — $A = 2182$. Показано без соблюдения масштаба

Фрагменты контуров на рис. 1, а, б имеют различие в показателях округлости и периметра, при практически равной площади фрагментов. Периметр фрагментов имеет различимую разницу в значениях: $p \approx 776$ и $p \approx 1104$, что учитывается величиной нормированного показателя округлости $c = 0,046$ и $c = 0,023$ соответственно.

Принимая $T_{\min} = 5$ пикселей и минимальную площадь фрагмента $A \geq 100$, можно выделить фрагменты контуров ямок травления дислокаций, обладающих сходными параметрами при равных условиях получения цифрового изображения всех пластин полупроводника.

Авторы предлагают применить показатель округлости в качестве признака для фильтрации бинаризованных фрагментов. На рис. 2, а показана пластина полупроводника арсенида галлия ориентации [100] после селективного травления. На рис. 2, б показан результат обработки с вышеуказанными заданными параметрами.

Количество фрагментов с показателями округлости $c = 0,0 \div 1,0$ и площадью $A > 0$ составляет 5467 элементов. Число отфильтрованных фрагментов по вышеописанному критерию округлости (3) со значениями в пределах $c = 0,0 \div 0,5$, равно 875.

Это составляет 16 % от общего количества всех бинаризованных фрагментов в количестве 5467 цифрового изображения (рис. 2, б).

Отобранные фрагменты в количестве 875 составляют 16 % от общего количества всех бинаризованных фрагментов в количестве 5467 цифрового изображения имеют признаки [4] фрагментов контуров ямок травления дислокаций.

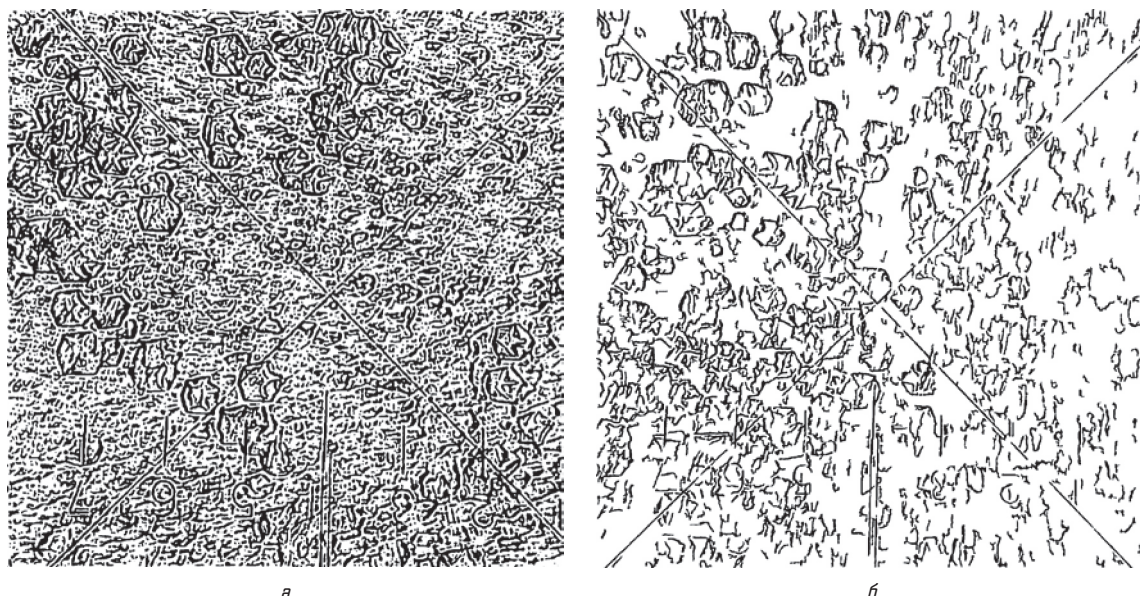


Рис. 2. Бинаризованное изображение поверхности пластины полупроводника арсенида галлия ориентации [100]: а — после селективного травления и бинаризации; б — после селективного травления и с выборочной фильтрацией фрагментов со значением дескриптора округлости $c = 0,0 \div 0,5$ и площадью $A \geq 100$ точек изображения. Показано без соблюдения масштаба

Таким образом, метод фильтрации бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника использует эталонную ширину линии контура на предварительно обработанном бинаризованном изображении T_{\min} [4, 5] и определяет минимальную площадь фрагмента A при соотношении сторон 1:4 по формуле (3).

Однако, изображение на рис. 2, б содержит не только значимые фрагменты ямок травления подмножества B , но и часть незначимых фрагментов, включающих другие структурные несовершенства, в том числе и микродефекты.

6. Разработка метода удаления контуров микродефектов

Микродефекты на поверхности пластины полупроводника, входящие в B -подмножество, снижают точность сведений о количестве фрагментов ямок травления дислокаций.

В процессе разработки метода удаления микродефектов на изображении бинаризованных контуров дислокаций пластины полупроводника важно выявить характерные особенности отображения микродефекта.

Отображение объемной ямки травления в плоскости, в отличие от отображения микродефекта, имеет особенности, реализуемые на изображении плоскости пластины полупроводника как бинаризованных площадей, ограниченных линиями контуров.

Фрагменты контуров и микродефекты имеют подобные признаки, но последние отображаются на плоскости без ямок и крупных выступов, что позволяет сделать вывод об отсутствии на бинаризованном фрагменте явно выраженных теней в виде площади с интенсивностью $I = 0$. Таким образом, подчеркнутый контур фрагмента и его бинаризованная площадь различающиеся в случае с фрагментом контура дислокации, для микродефекта остаются практически неизменными по причине малых изменений по высоте и глубине относительно плоскости пластины полупроводника.

На рис. 3, а-г отображена небольшая часть поверхности исследуемого изображения пластины с микродефектом и предполагаемыми фрагментами контуров ямок травления. Исходное изображение снято с окуляра интерферометра МИИ-4 стандартной веб-камерой с квадратной матрицей и разрешением в один мегапиксель. Предварительная обработка включает преобразование цветного изображения, полученного с веб-камеры, в восьмибитное полутоновое и последующую бинаризацию [7].

Однако, для микродефектов, разностные фрагменты не будут характерны. Это обусловлено отсутствием бинаризованной площади, характеризующей объемную природу ямок травления дислокаций у артефактов и микродефектов.

Авторы предлагают, учитывать наличие примыкающих бинаризованных площадей к фрагментам контура ямки травления как возможный дополняющий признак, удаление фрагментов микродефектов реализовать операцией сложения XOR («исключающее или»), примененной

к бинаризованному изображению и изображению с подчеркнутыми контурами, а устранение остаточных мелких несущественных деталей медианной фильтрацией. Результат предлагаемой обработки показан на рис. 3, г.

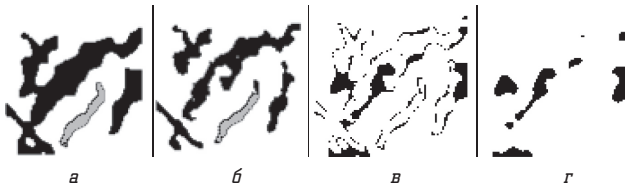


Рис. 3. Часть бинаризованного изображения поверхности пластины полупроводника GaAs ориентации [100] после селективного травления: *а* — изображение бинаризованных фрагментов и микродефекта; *б* — изображение с подчеркнутыми контурами фрагментов и микродефекта; *в* — разностное изображение; *г* — разностное изображение после фильтрации. Микродефект выделен серым. Показано без соблюдения масштаба

Полученное разностное изображение на рис. 3, г после применения операции XOR к изображениям на рис. 3, а, б и медианы к изображению на рис. 3, в, показывает отсутствие микродефекта на представленной части изображения пластины полупроводника. В точках совпадения фрагментов контуров и линий микродефектов двух исходных изображений образуются результирующие области с интенсивностью $I = 255$ и остаточными пикселями после обработки операцией сложения XOR.

На рис. 4 представлены контуры исследуемых фрагментов для количественной оценки.

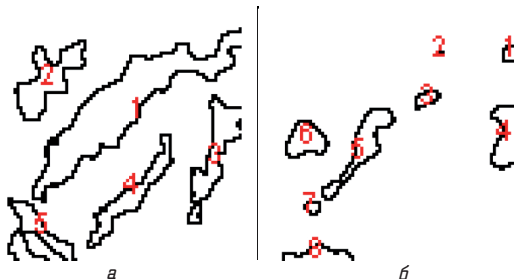


Рис. 4. Исследуемые фрагменты: *а* — с номерами подчеркнутых контуров фрагментов и микродефекта рис. 3, б; *б* — с номерами разностных фрагментов на рис. 3, г. Показано без соблюдения масштаба

В табл. 2 представлены площадь A и дескрипторы координаты центра масс X_M и Y_M для всех фрагментов рис. 4, а. Микродефект имеет показатель, выделенные полужирным шрифтом.

Таблица 2

Площадь A и координаты центра масс X_M и Y_M фрагментов ямки травления и микродефекта рис. 4, а

№ фрагмента	A	X_M	Y_M
1	841	46,853	32,109
2	252	20,766	23,889
3	248	75,766	47,907
4	198	48,268	61,854
5	183	16,609	75,462

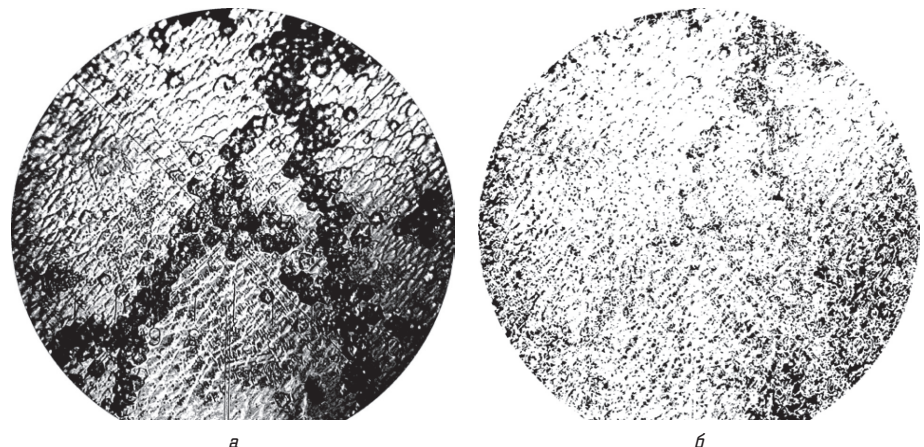


Рис. 5. Изображение пластины поверхности полупроводника арсенида галлия ориентации [100] в области видения окуляра интерферометра МИИ-4 с предварительной обработкой и бинаризацией изображения после селективного травления: *а* — изображение бинаризованных фрагментов и микродефектов; *б* — изображение после обработки операцией XOR и медианной фильтрацией. Показано без соблюдения масштаба

В табл. 3 представлены номера разностных фрагментов изображения рис. 4, б и координаты центров масс X_M , Y_M с площадью A соответственно для изображения рис. 4, а. Координаты используются в качестве признаков принадлежности к фрагментам бинаризованного изображения на рис. 4, б.

Таблица 3

Соответствие номеров и площадей фрагментов ямки травления и микродефекта на рис. 4, а, б

№ фрагмента на рис. 4, а	A	X_M	Y_M	№ фрагмента на рис. 4, б
1	19	83,079	14,605	1
2	2	60,000	14,500	1
3	28	55,536	29,500	1
4	124	81,661	42,347	3
5	172	34,424	45,174	1
6	111	15,455	43,365	2
7	15	17,833	65,767	1
8	86	19,953	81,953	5

В табл. 3 отсутствуют данные по разностной площади для микродефекта на рис. 3, а, б, что является результатом удаления фрагмента, относящегося к микродефекту. Таким образом, признаком микродефекта можно считать отсутствие разностной площади, определяемых в координатах бинаризованного изображения рис. 3, а.

Изображение, представленное на рис. 5 обработано вышеописанным методом для удаления бинаризованных фрагментов микродефектов.

После выполнения медианной фильтрации число фрагментов уменьшается с 46683 до 7601, что составляет 16,28 % от их изначального количества, как показано в табл. 4. Значительное сокращение числа обрабатываемых фрагментов уменьшает количество микродефектов на бинаризованном изображении поверхности пластины полупроводника.

Разностные фрагменты могут быть получены после операции XOR над изображениями с бинаризованными контурами ямок травления пластины полупроводника арсенида галлия и изображения с подчеркнутыми контурами фрагментов с множеством значимых бинаризованных контуров методом фильтрации бинаризованных фрагментов.

Таблица 4

Результат выполнения операции XOR (№ 1) и медианной фильтрации (№ 2) на рис. 4, а

№	Количество фрагментов	Процент от количества фрагментов на пластине полупроводника
1	46683	100
2	7601	16,28

Таким образом, полученные разностные фрагменты после операции XOR и медианной фильтрации на разностном изображении, могут быть признаком для одиночных фрагментов линий контуров, не совпадающих с бинаризованными областями изображения, что характерно для фрагментов контуров микродефектов.

Наличие примыкающей к фрагменту контура бинаризованной области указывает на фрагменты контуров ямок травления дислокаций.

7. Разработка критериев выделения основных значимых фрагментов контура

Уточнение подлинности значимых фрагментов необходимо для выделения и дальнейшей локализации ямок травления.

Использование изображения с подчеркнутыми контурами после применения адаптивной бинаризации с наиболее эффективным коэффициентом $C = 15$ [17, рис. 3] позволяет дополнительно подтвердить принадлежность фрагментов к значимым в процессе фильтрации ямок травления дислокаций от микродефектов изображения. Назовем такие фрагменты основными значимыми, а соответствующее изображение обработанное с коэффициентом $C = 15$ обозначим символом J2 — работа [2, рис. 3], а изображение обработанное с коэффициентом $C = 7$ символом J1 — работа [17, табл. 1].

Учитывая возможности вышеописанных методов, критериями выделения основных значимых фрагментов контуров будем считать следующие сочетания признаков на изображениях J1 и J2:

1. Совпадение координат фрагментов контура на изображениях J1 и J2.

Если на изображении контуров J2 есть контур, совпадающий с изображением контуров J1 (допускается частичное совпадение), то весь фрагмент контура учитывается для контуров на изображениях J1.

2. Наложение фрагментов контуров и смежных бинарных площадей. Сравнение бинарного изображения площадей и изображения фрагментов контуров считается указывающим на фрагмент контура ямки травления дислокации, если смежные бинаризованные области на изображении бинаризованных площадей накладываются на фрагменты контура изображения J1.

3. Примыкание фрагментов контуров и разностных бинарных площадей. Сравнение бинарного изображения площадей и изображения фрагментов контуров, полученных методом удаления контуров микродефектов. Фрагмент контура принадлежит ямке травления дислокации, если разностные бинаризованные области на изображении бинаризованных площадей примыкают на фрагменты контура изображения J1.

4. Совпадение координат контуров для изображения J2 с контурами на изображении J1, без совпадения

с бинарной площадью на основании их соответствия признакам ширины линии и замкнутости [5].

8. Результаты разработки методов фильтрации бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника, метода удаления контуров микродефектов и критерия выделения основных значимых фрагментов контура

Разработанные методы осуществляют выделение бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника из множества других элементов изображения поверхности пластины полупроводника.

Метод фильтрации бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника состоит из следующих этапов:

1. Определение эталонной ширины линии контура на предварительно обработанном бинаризованном изображении T_{\min} [4, 5].

2. Определение минимальной площади фрагмента A при соотношении сторон 1:4 и показателе округлости $c = 0,0 \div 0,5$ по формуле (3).

3. Выделение фрагментов контуров ямок травления дислокаций обладающих сходными параметрами в плоскости бинаризованного изображения пластины полупроводника.

Метод удаления контуров микродефектов на изображении бинаризованных контуров ямок травления дислокаций имеет следующие этапы:

1. Получение изображения с бинаризованными контурами ямок травления пластины полупроводника арсенида галлия и изображения с подчеркнутыми контурами фрагментов с множеством значимых бинаризованных контуров методом фильтрации бинаризованных фрагментов.

2. Получение изображения разностных областей на бинаризованных площадях операцией XOR:

— получение разностного изображения после операции XOR между бинаризованным изображением площадей дислокаций и изображением с подчеркнутыми контурами фрагментов и множеством значимых бинаризованных контуров;

— обработка полученного изображения медианным фильтром для удаления остаточных точек изображения после применения операции XOR к микродефектам.

Критерии для выделения основных значимых фрагментов контуров основаны на использовании метода фильтрации бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника и метода удаления контуров микродефектов:

1. Совпадение фрагментов контура на изображениях J1 и J2.

Если на изображении контуров J2 есть контур совпадающий с изображением контуров J1 (допускается частичное совпадение), то весь фрагмент контура учитывается для контуров на изображениях J2.

2. Наложение фрагментов контуров и смежных бинарных площадей. Сравнение бинарного изображения площадей и изображения фрагментов контуров считается указывающим на фрагмент контура ямки травления дислокации, если смежные бинаризованные области на изображении бинаризованных площадей накладываются на фрагменты контура изображения J1.

3. Примыкание фрагментов контуров изображения J_1 и разностных бинарных площадей, полученных как результат использования метода удаления контуров микродефектов. Фрагмент контура принадлежит ямке травления дислокации, если разностные бинаризованные области на изображении бинаризованных площадей примыкают на фрагменты контура изображения J_1 .

4. Совпадение координат контуров для изображения J_2 с контурами на изображении J_1 , без учета совпадения с бинарной площадью на основании их соответствия признакам ширины линии и замкнутости [5].

9. Обсуждение результатов разработки методов фильтрации бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника, метода удаления контуров микродефектов и критерия выделения основных значимых фрагментов контура

Автоматизация обнаружения контуров дислокаций является актуальной задачей при выполнении задач по организации управления производством и создания системы технической диагностики качества выхода продукции в производстве монокристаллов полупроводника методом Чохральского.

Обсуждаемые методы и критерий выделяют значимые фрагменты для определения ямок травления контуров, уменьшая тем самым количество незначимых контуров на бинаризованном изображении пластины полупроводника.

Метод фильтрации бинаризованных фрагментов ямок травления получает в качестве исходного параметра минимальную толщину линии контура ямки травления искомой дислокации T_{\min} . Использование нормированного показателя округлости по формуле (3), позволяет оценивать фрагменты без уточнения показателей периметра и площади для расчета показателя округлости s . Такой подход минимизирует усилия по поиску подходящих фрагментов по признакам линий контуров, указанных в работах [4, 5].

Метод удаления контуров микродефектов на изображении бинаризованных контуров ямок травления дислокаций использует некоторые различия в отображении подчеркнутого контура фрагмента и его бинаризованной площади. Микродефект практически неизменными при отображении из-за малых изменений по высоте и глубине относительно плоскости пластины полупроводника.

Получение изображения разностных областей на бинаризованных площадях операцией XOR позволяет получить разностное изображение после операции XOR между бинаризованным изображением площадей дислокаций и изображением со значимыми бинаризованными контурами. Медианный фильтр удаляет остаточные точки изображения. Однако происходит удаление фрагментов контуров, совпадающих с бинаризованными площадями. Поэтому, данный метод может применяться как дополнение к другим этапам фильтрации изображения поверхности пластины полупроводника.

Критерии для выделения основных значимых фрагментов контуров используют метод фильтрации бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника и метод удаления контуров микродефектов с целью корректного выделения значимых фрагментов ямок травления дислокаций.

Рассмотренные случаи выделяют такие варианты и их интерпретацию:

1. Совпадение фрагментов контура на изображениях J_1 и J_2 .

2. Если на изображении контуров J_2 есть контур, совпадающий с изображением контуров J_1 (допускается частичное совпадение), то весь фрагмент контура учитывается для контуров на изображениях J_1 .

3. Наложение фрагментов контуров и смежных бинарных площадей. Сравнение бинарного изображения площадей и изображения фрагментов контуров считается указывающим на фрагмент контура ямки травления дислокации, если смежные бинаризованные области на изображении бинаризованных площадей накладываются на фрагменты контура изображения J_1 .

4. Примыкание фрагментов контуров изображения J_1 и разностных бинарных площадей, полученных как результат использования метода удаления контуров микродефектов. Фрагмент контура принадлежит ямке травления дислокации, если разностные бинаризованные области на изображении бинаризованных площадей примыкают на фрагменты контура изображения J_1 .

5. Совпадение координат контуров для изображения J_2 с контурами на изображении J_1 , без учета совпадения с бинарной площадью на основании их соответствия признакам ширины линии и замкнутости [5]. Такой подход позволяет сохранить в подмножестве значимых контуры, не имеющие бинарную площадь.

В целом, преимущества предложенных методов выделения дают возможность обнаруживать и исследовать фрагменты характерной ширины и длины, что позволяет выделять, фильтровать и соотносить их с фрагментами бинаризованного изображения ямок травления дислокаций.

Получаемые результаты при использовании каждого метода и критериев имеют свои недостатки, которые могут быть скорректированы их совместным применением. Таким образом, для повышения эффективности выделения основных фрагментов, вышеописанные методы и критерии необходимо применять в комплексе.

Критерии выделения основных значимых фрагментов контура позволяют сформировать правила отбора для дальнейшей обработки бинаризованного изображения.

Данные методы и критерии продолжают ранее проведенные исследования [4, 5].

Критерии выделения основных значимых фрагментов контура, метод фильтрации бинаризованных фрагментов, метод удаления контуров микродефектов пластины полупроводника, являются частью комплекса мер для выполнения задач по организации управления производством и создания системы технической диагностики качества выхода продукции.

10. Выводы

В статье рассмотрена проблема выделения фрагментов контуров ямок травления дислокаций на фоне других фрагментов структурного несовершенства пластин полупроводника. Рассмотрены примеры обработки бинаризованных изображений поверхности пластины арсенида галлия.

В результате проведенных исследований:

1. Определены подмножества значимых B , незначимых C их множества фрагментов бинаризованных контуров ямок травления A .

2. Выделение значимости фрагментов реализовано на основе нормированного признака формы в разработанном методе фильтрации бинаризованных фрагментов ямок травления пластины полупроводника.

3. Показана возможность фильтрации несущественных фрагментов и удаления микродефектов при обработке цифрового изображения бинаризованных контуров дислокаций в пластине полупроводника по величине разностной площади. Обоснована и экспериментально подтверждена возможность удаления микродефектов на пластине полупроводника методом удаления контуров микродефектов.

4. В результате исследований сформулированы критерии для уточнения подлинности отобранных значимых фрагментов.

В работе впервые предложены методы и критерии, позволяющие произвести выделение бинаризованных фрагментов предполагаемых ямок травления дислокаций пластин полупроводника:

1. Метод фильтрации бинаризованных фрагментов.
2. Метод удаления контуров микродефектов.
3. Критерии для выделения основных значимых фрагментов контуров.

Вышеназванные методы и критерии являются частью информационной технологии мониторинга плотности дислокаций в монокристаллах полупроводника.

Данные методы и критерии являются частью комплекса мер для выполнения задач по организации управления производством и создания системы технической диагностики качества выхода продукции.

Преимущества предложенных методов и критерия:

1. Выделение значимых фрагментов при использовании бинарного изображения контуров дислокаций позволяет уменьшить количество фрагментов, не характерных для фрагментов ямок травления дислокаций на пластине полупроводника.

2. Возможность фильтровать фрагменты лишь на основании параметра округлости.

3. Возможность рассчитывать параметры фрагментов в плоскости изображения в шаге сетки, соответствующей одному пикселю растрового изображения. Пропорциональный пересчет точек раstra к новой сетке координат не выполняется, что способствует упрощению расчета.

Литература

1. Самойлов, А. Н. Методы получения контуров на цифровых растровых изображениях с нечетким отображением дислокаций в пластинах GaAs [Текст] / А. Н. Самойлов, И. В. Шевченко // Компьютерно-интегрированные технологии: освіта, наука, виробництво. — 2013. — № 12. — С. 63–69.
2. Самойлов, А. Н. Исследование медианной фильтрации бинаризованных контуров дислокаций пластины GaAs на растровых цифровых изображениях [Текст] / А. Н. Самойлов // Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції «ІТ-Перспектива», 4–5 квітня 2014 р., м. Кременчук. — 2014. — С. 10–11.
3. Самойлов, А. Н. Сравнение эффективности глобальных методов бинаризации растровых цветных изображений [Текст] / А. Н. Самойлов, В. Р. Петренко // Вестник КрНУ имени Михаила Остроградского. — 2012. — № 4(75). — С. 49–54.
4. Самойлов, А. Н. Метод обнаружения линий контуров в яркостных перепадах предполагаемых граней бинаризованного изображения следов дислокаций на пластинах GaAs [Текст] / А. Н. Самойлов, И. В. Шевченко // Автоматизированные системы управления и приборы автоматики. — 2013. — № 165. — С. 2–27.
5. Самойлов, А. Н. Методы восстановления линии контура дислокации цифрового изображения пластины арсенида

галлия [Текст] / А. Н. Самойлов, И. В. Шевченко // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2015. — № 3/5(75). — С. 8–16. doi:10.15587/1729-4061.2015.43326

6. Бессонов, А. А. Методы и средства идентификации динамических объектов [Текст] / А. А. Бессонов, Ю. В. Загашвили, А. С. Маркелов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 280 с.
7. Gonzalez, R. Digital image processing [Text] / R. Gonzalez, R. Woods. — Prentice Hall: Pearson Education, 2006. — 616 p.
8. Freeman, H. On the encoding of arbitrary geometric configurations [Text] / H. Freeman, L. Davis // IEEE Transactions on Electronic Computers. — 1961. — Vol. EC-10, № 18. — P. 260–268. doi:10.1109/tec.1961.5219197
9. Freeman, H. On the digital-computer classification of geometric line pattern [Text] / H. Freeman // Proc. Nat. Electron. Conf. — 1962. — № 18. — P. 312–324.
10. Zamperoni, P. Methoden der digitalen Bildsignalverarbeitung [Text] / P. Zamperoni. — Vieweg+Teubner Verlag, 1989. — 264 p. doi:10.1007/978-3-322-83935-0
11. Скворцов, А. В. Триангуляция Делоне и ее применение [Текст] / А. В. Скворцов. — Томск: Издательство Томского университета, 2002. — 128 с.
12. Jähne, B. Principles of filter design [Text] / B. Jähne H. Hau-becker, P. Geißler, Hrsg. — San Diego: Academic Press, Computer Vision and Applications, Signal Processing and Pattern Recognition, 1999. — Ch. 6, № 2. — P. 125–151.
13. Gonzalez, R. C. Digital Image Processing [Text] / R. C. Gonzalez, R. E. Woods. — New Jersey: Prentice-Hall, Inc., 2002. — Ed. 2. — 793 p.
14. Jian, A. K. Fundamentals of Digital Image Processing [Text] / A. K. Jian. — Pearson, 1988. — 569 p.
15. Rosenfeld, A. Representation [Text] / A. Rosenfeld, A. C. Kak // Digital Picture Processing. — Elsevier BV, 1982. — P. 191–275. doi:10.1016/b978-0-12-597302-1.50010-4
16. Mehtre, B. M. Shape measures for content based image retrieval: A comparison [Text] / B. M. Mehtre, M. S. Kankonhalli, W. F. Lee // Information Processing & Management. — 1997. — Vol. 33, № 3. — P. 319–337. doi:10.1016/s0306-4573(96)00069-6
17. Самойлов, А. Н. Анализ адаптивной пороговой обработки яркостных перепадов элементов цифрового растрового изображения [Текст] / А. Н. Самойлов // Матеріали Х Міжнародної науково-практичної конференції «Розвиток наукових досліджень 2013», 25–27 листопада 2013 р., м. Полтава. — 2013. — Т. 5. — С. 26–28.

РОЗРОБКА МЕТОДІВ ВИДІЛЕННЯ БІНАРИЗОВАНИХ ФРАГМЕНТІВ ЯМОК ТРАВЛЕННЯ ПЛАСТИНИ НАПІВПРОВІДНИКА

Досліджені можливості виділення фрагментів контурів ямок травлення дислокації на цифровому зображенні пластины напівпровідника на прикладі арсеніду галію. Розроблено метод фільтрації бинаризованих фрагментів ямок травлення, метод видалення контурів мікродефектів, а також критерії для виділення основних значущих фрагментів контурів. Наводиться покроковий опис методів.

Ключові слова: ямки травлення, дислокація, фрагменти контуру, арсенід галію, цифрове зображення.

Самойлов Андрей Николаевич, аспирант, кафедра інформаційно-управляючих систем, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Україна, e-mail: seticom@yandex.ru.
Шевченко Ігор Васильевич, доктор технічних наук, доцент, кафедра інформаційно-управляючих систем, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Україна.

Самойлов Андрій Миколайович, аспірант, кафедра інформаційно-управляючих систем, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Україна.

Шевченко Ігор Васильович, доктор технічних наук, доцент, кафедра інформаційно-управляючих систем, Кременчуцький національний університет ім. Михайла Остроградського, Україна.

Samoilov Andrey, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Ukraine, e-mail: seticom@yandex.ru.

Shevchenko Igor, Kremenchuk Mykhailo Ostohradskyi National University, Ukraine