

УДК 004.932.2; 004.932.2

DOI: 10.15587/1729-4061.2015.43326

МЕТОДЫ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЛИНИИ КОНТУРА ДИСЛОКАЦИИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ПЛАСТИНЫ АРСЕНИДА ГАЛЛИЯ

А. Н. Самойлов

Аспирант*

E-mail: seticom@yandex.ru

И. В. Шевченко

Кандидат технических наук, доцент*

E-mail: silver055@mail.ru

*Кафедра информационно-управляющих систем

Кременчугский национальный университет

им. Михаила Остроградского

ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, Украина, 39600

Досліджено можливості відновлення лінії контуру ямок травлення дислокації на бінаризованому цифровому зображенні пластини арсеніду галію. Запропоновано методи визначення ширини лінії контуру, відновлення лінії контуру у перепадах яскравості граней дислокацій в площині зображення пластини, відновлення розгалужень. Наводиться покроковий опис методів відновлення лінії контуру дислокації на цифровому зображенні пластини арсеніду галію

Ключові слова: дислокація, ямки травлення, відновлення лінії контуру, арсенід галію, цифрове зображення

Исследованы возможности восстановления линии контура ямок травления дислокации на бинаризованном цифровом изображении пластины арсенида галлия. Предложены методы определения ширины линии контура, восстановления линии контура по яркостным перепадам предполагаемых граней дислокаций в плоскости изображения пластины, восстановления разветвлений. Приводится пошаговое описание методов восстановления линии контура дислокации цифрового изображения пластины арсенида галлия

Ключевые слова: дислокация, ямки травления, восстановление линии контура, арсенид галлия, цифровое изображение

1. Введение

Арсенид галлия имеет уникальные свойства, позволяющие использовать его в высокоскоростных полупроводниковых приборах и оптико-электронных устройствах. По сравнению с другими полупроводниковыми материалами арсенид галлия более устойчив к радиации, может использоваться для преобразования электрических сигналов в оптические сигналы и наоборот. Широкое применение полупроводника определяет актуальность производства пластин GaAs в промышленных масштабах.

Контроль плотности дислокаций по ямкам травления является необходимым этапом производства полупроводниковой электроники на основе GaAs. В настоящий момент применяется ручной подсчёт плотности дислокаций на пластине GaAs. Ручной подсчёт плотности дислокаций по большому массиву цифровых изображений является весьма трудоёмким и не даёт возможности реализовать комплексную автоматизацию управления качеством конечного продукта. Эффективность решения такой задачи может быть повышена при автоматизации процесса.

Специфической проблемой подсчёта ямок травления является несовершенство их отображения как объёмных геометрических фигур в плоскости снимка [1]. Возникающая неоднозначность определения линий контура дислокации на бинаризованном изображении

яркостных перепадов граней контуров лишает возможности точно классифицировать дислокации.

Края ямок травления дислокаций представлены линиями, в том числе с разрывами и смещениями. Таким образом, для выделения фрагментов со свойствами контуров на фоне несущественных или паразитных фрагментов, необходимы методы обнаружения кривых линий контуров дислокаций в плоскости цифрового растрового изображения [1–3].

2. Анализ литературных данных и постановка проблемы

После этапа предварительной обработки и получения бинарного растрового изображения фрагментов с подчёркнутыми границами предполагаемых контуров ямок травления дислокаций, необходимо выделить объекты интереса специальными методами. Учитывая, что линии контуров ямок травления дислокаций имеют вполне отличимые особенности [4], остановимся на рассмотрении методов получения дескрипторов формы и методов описания контура.

В целом, описание контура можно производить на основе анализа границ и на основе анализа регионов. Граничные методы используют только контур или границы формы объекта. Методы регионов учитывают внутренние характерные детали, например, отверстия

и т. д. Граничные методы имеют множество вариантов реализации, рассмотрим некоторые из них:

1. Методы угловых точек на основе анализа интенсивности.
2. Методы угловых точек на основе производных градиента.
3. Отслеживающие методы.
4. Сканирующие методы.
5. Методы описания контуров.
6. Фурье дескрипторы формы объекта.
7. Метод Stroke Width Transform (SWT) на основе априорных знаний.

Методы угловых точек на основе анализа интенсивности (Intensity Based Methods) представлены SUSAN и FAST детекторами, работающими по принципу различия интенсивности изображения и применимы к различным изображениям. Многие из этих подходов основаны на поиске производных первого и второго порядка, для выделения зон отклонения рассчитываемых величин.

Детектор SUSAN [5] вычисляет долю пикселей в окрестности, которые имеют аналогичную интенсивность пикселей в центре. Углы могут быть локализованы пороговой мерой выбора локальных минимумов. Однако он не находит каплеобразные изменения, которые не так хорошо локализованы. Детектор удобен в случае определения подобия уже известного фрагмента изображения.

FAST детектор построен на основе SUSAN [6] и успешно определяет угловые точки, если можно найти достаточно большой набор пикселей на окружности фиксированного радиуса вокруг точки с повышенной яркостью, большей чем в центральной точке. Эффективность и быстрота FAST детектора определяется обработкой лишь части точек окрестности, расположенных на окружности. Однако, FAST детектор успешно справляется в случае определения всего спектра характерных угловых точек на уже определённом объекте. Например, для поиска подобных рисунков.

Методы угловых точек на основе производных градиента (Gradient-based approaches) используют производные первого порядка для локального обнаружения. Этот вариант реализации представлен детекторами Харриса (Harris), SIFT, SURF.

Детектор Харриса (Harris) [7] широко известен сегодня, и вероятно, лучший детектор области относительно точки интереса. Автокорреляционная матрица, которая часто используется для функции обнаружения и описания местных структур изображения, описывает градиентное распределение в ближайшей окрестности точки интереса. Такие точки инвариантны для перемещения и вращения. Также, они устойчивы при любых условиях освещенности. В работах [8, 9] по исследованию различных детекторов точки интереса, было доказано, что точки интереса, полученные детектором Харриса наиболее повторяемые и информативные. Однако для уже обработанных линий контуров, этот детектор лишь повторит уже реализованную бинаризацию.

SIFT детектор (Scale Invariant Feature Transform) [10] метод запатентован и результативен на сравнении двух областей интереса на подобие. Устойчив к изменениям освещенности и небольшим сдвигам. Однако, не все полученные точки по дескрипторам будут отвечать предъявляемым требованиям. В некоторых

случаях решение может быть не найдено, даже если оно существует.

SURF детектор (Speeded Up Robust Features) [11] рассматривает изображение как единое целое и ищет особенности этого изображения. При этом особенности могут быть как внутри объекта, так и на фоне, а также на точках границы объекта и фона. В связи с этим, метод плохо работает для объектов простой формы и без ярко выраженной текстуры.

Отслеживающие методы функционируют на основе поиска объекта (первой встретившейся точки объекта) и последующего отслеживания и векторизации его контура. Достоинством этих методов является их простота. К недостаткам относят их последовательную реализацию и сложность при поиске и обработке внутренних контуров. В работе [12] описан отслеживающий алгоритм «жука». Точка исследования условно названная жуком, двигаясь с области фона по направлению к границе контура, выполняет поворот налево и переходит к следующему элементу, как только он попадает на элемент контура с другой интенсивностью. Если это элемент фона, то жук поворачивается направо, иначе – налево. Процедура повторяется до тех пор, пока жук не вернется в исходную точку. Координаты точек перехода с черного на белое и с белого на черное и описывают границу объекта.

Недостаток отслеживающего алгоритма в ошибочном определении контура с прерывистой линией, а также если есть элементы фона внутри линии [13].

Сканирующие методы основаны на просмотре всего изображения и выделении контурных точек без задачи поиска контура объекта. Метод, использующий такой алгоритм, неэффективен и является затратным с точки зрения времени поиска контуров найденных объектов.

В работе [14] рассматриваются цепные коды (Chain coded string). Границы любого контура представляется в виде последовательности отрезков прямых линий определённой длины и направления на основе 4- или 8-связной решётки направлений для исследования. Длина каждого отрезка определяется разрешением решётки, а направления задаются выбранным кодом. Метод инвариантно описывает сдвиг контура, однако описание по Фримену не инвариантно к масштабу и вращению.

В работе [15] предложена некоторая модификация называемая производным кодом цепи, который является уникальным и инвариантным к вращению и масштабированию.

Метод применим для описания произвольных двумерных фигур, составленных из прямых и кривых линий и отрезков. Несомненными достоинствами метода цепных кодов являются:

- цепной код является компактным представлением бинарного объекта;
- цепной код является представлением бинарного объекта, инвариантным относительно перемещения;
- цепной код является полным представлением объекта или кривой. Следовательно есть возможность получить признак формы любого контура по цепному коду.

Условием полноценного описания контура является непрерывность его линии, что недостижимо в случае прерывистых линий контуров. Таким образом, применение цепных кодов в случае описания прерывистого контура дислокации в форме бинаризованной

линии, не может дать цельного представления о линии контура ямок травления дислокации.

Фурье-дескрипторы (Fourier descriptors) [16], подобно цепному коду, используют границу объекта. В отличие от цепного кода, Фурье-дескрипторы не описывают кривые на дискретной сетке. Но их можно применять для непрерывных и дискретных линий. Дискретные граничные линии, как и цепной код, имеют недостатки. В 8-компонентной окрестности выборки не равноудалены. В 4-компонентной окрестности выборки равноудалены, но граница прерывистая, поскольку участки линии контура идут в горизонтальных и вертикальных направлениях. Формирование непрерывной линии контура по точкам на прямоугольной сетке не даёт результата. Довести точность выделения фрагментов из полутоновых изображений до пикселя – трудная задача.

В работе [17] описан метод Stroke Width Transform (SWT). Данный метод определения ширины линии использует априорные знания о ширине линий текста для ожидаемого объекта (текста выполненного печатным шрифтом). Ширина может незначительно меняться в пределах фрагмента содержащего контур. Особенностью обнаружения линий методом SWT является учёт направления построения градиента перехода от средней интенсивности цвета линии и фона. Нормаль к линии будет строиться от контура к фону или наоборот. SWT использует анализ интенсивности и учёт градиента для заранее определённой области с характерным для печатного шрифта размером, формой и ожидаемым пересечением линий. Такие априорные знания отсутствуют для восстановления линии контура ямки травления дислокации.

Таким образом, проблема заключается в создании метода восстановления линии контура ямки травления дислокации на неоднородном фоне цифрового изображения плоскости пластины GaAs в условиях неоднозначного определения контура дислокации на бинаризованном изображении яркостных перепадов граней контуров.

3. Цель и задачи исследования

Целью исследования является поиск эффективного подхода к получению контуров ямок травления дислокаций.

Объектом исследования является цифровое растровое изображение пластины GaAs. На рис. 1 представлен пример плоскости пластины GaAs с подчеркнутыми границами предполагаемых контуров ямок травления дислокаций.

Задачей данной работы является разработка методов восстановления линии контура предполагаемых граней дислокаций пластин GaAs. Определение плотности ямок травления дислокаций производится по контурам бинаризованного цифрового растрового изображения пластины полупроводника.

Метод определения ширины линии контура определяет и сравнивает текущую ширину линии контура с признаком принадлежности контура [2].

Метод восстановления линии контура определяет грань ямки травления дислокации по изменению направлений и текущей ширины линии по условию интенсивности, равной нулю.

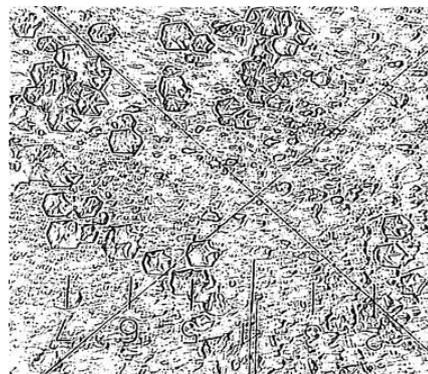


Рис. 1. Бинарное растровое изображение фрагментов с подчеркнутыми границами предполагаемых контуров ямок травления дислокаций

Метод восстановления разветвлённой линии контура исследует возможные сочетания линий, возникающие на смежных контурах нескольких граней.

Предложенные методы восстановления линии контура предполагаемых ямок травления дислокаций пластины GaAs, являются дополнением метода обнаружения контуров для распознавания дислокаций в яркостных перепадах предполагаемых граней бинаризованного изображения следов дислокаций на пластинах GaAs в плоскости цифрового растрового изображения [2].

4. Разработка методов восстановления линии контура дислокации цифрового изображения пластины арсенида галлия

Для обнаружения дислокаций в яркостных перепадах, после этапа предварительной обработки, предполагается использовать признаки, представляющие некоторые свойства линии контура, выявленные после бинарной обработки изображения. Интенсивность бинаризованного растрового изображения плоскости может быть представлена двумя значениями: $I=255$; $I=0$. Признаком интересующего фрагмента является переход яркости $I=255 \rightarrow I=0 \rightarrow I=255$ на его границах [1].

Признаки, определяющие предполагаемую линию контура могут включать ширину линии контура T_{ni} , а также протяжённость этой линии L_i . Значение L_i имеет определённые ограничения, связанные с использованием эталонного контура дислокации: $L_i \geq L_{pk}$, где L_{pk} – значение протяжённости линии эталонного контура получаемого от выделенного оператором контура ямки травления, L_i – значение протяжённости линии предполагаемого контура. Интенсивность яркости линии контуров $I=0$.

Ширина контура, является более предпочтительной в качестве основного признака ямки травления дислокаций, так как имеет большую предсказуемость значения текущей ширины T_{ni} и определяется исходя из эталонной величины T_{min} [2].

Для решения поставленной задачи целесообразно плоскость цифрового растрового изображения представить в декартовой системе координат с размерностью $m \times n$ пикселей, где m – размерность растра в пикселях изображения по оси абсцисс и n – размерность растра в

пикселях изображения по оси ординат (рис. 2). Шаг сетки координат имеет размерность пикселя конкретного растрового изображения. Поэтому пересчёт в другие геометрические координаты не производится, что снижает ошибку определения координат линий контуров [2].

Обнаружение кривых с заданной шириной можно производить с малым шагом приращения в плоскости изображения. Шаг пробного приращения по оси абсцисс i , где $i = (0, \dots, m)$ и по оси ординат k , где $k = (0, \dots, n)$ позволяет произвести попиксельный анализ бинарного растрового изображения достаточно точно. Однако, такой подход влияет на скорость обработки изображения. Количество операций пошаговых переходов растёт пропорционально площади обрабатываемого растрового изображения, что снизит эффективность обработки. Предлагается применить подход с обнаружением ближайшей точки предполагаемой кривой на бинарном изображении интенсивности $I = 0$, используя пробные линии C_n . Пробные линии $C_0, C_{(n+k)}, C_{0n}$ исследуют границы плоскости бинаризованного изображения (рис. 2) с шагом пробного приращения Z [2].

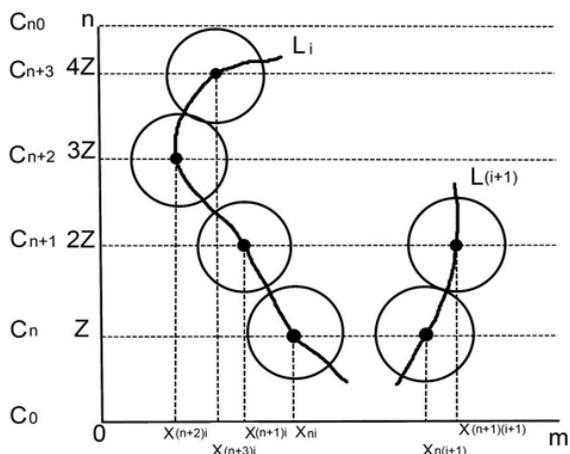


Рис. 2. Схема обнаружения линий предполагаемых дислокаций на плоскости цифрового растрового изображения пластины GaAs представленной осями координат m и n на основе определения пересечений пробных прямых $C_n, C_{(n+k)}$ с предполагаемыми линиями контура L_i в точках обозначенных $X_{ni}, X_{(n+1)i}, X_{(n+2)i}$ и $L_{(n+1)}$ в точках с точками пересечения $X_{n(i+1)}, X_{(n+1)(i+1)}, X_{(n+2)(i+1)}$ соответственно

Идентифицировать линию контура по ширине для ближайших фрагментов, позволяет обнаружение точек на пересечении пробных прямых $C_n, C_{(n+1)}, C_{(n+2)}$ и предполагаемых линиях контура L_i и $L_{(i+1)}$ обозначенных $X_{ni}, X_{(n+1)i}, X_{(n+2)i}$ и с точками пересечения $X_{n(i+1)}, X_{(n+1)(i+1)}, X_{(n+2)(i+1)}$ соответственно.

Определение ширины линии T_{ni} производится для каждого пересечения пробной линии C_n с точками предполагаемого контура. Граничными условиями для минимальных значений параметров обнаружения контура может быть ширина линии [2]:

$$T_{\min} \leq T_{ni} \leq 3T_{\min}, \quad (1)$$

где T_{\min} – эталонное значение ширины линии контура, T_{ni} – текущее значение обнаруживаемой линии пред-

полагаемого контура. Величина максимальной ширины линии контура $3T_{\min}$ определяется возможными наложениями граней нескольких смежных дислокаций в плоскости бинаризованного изображения.

Восстановление линии контура предлагается на основе определения признака ширины линии контура по условию (1) и линии восстановления X_L . Линия восстановления следует по точкам с определённой интенсивностью (интенсивность чёрного) исследуемой линии контуров L_i и $L_{(i+1)}$.

Текущее направление линии восстановления X_L для ориентировки по линии контура целесообразно определять восемью направлениями исследования и поведением линии предполагаемого контура. Границей линии считается изменение значения интенсивности чёрного: $I = 255 \rightarrow I = 0$.

Достижение границы линии контура изменит ориентацию линии восстановления X_L по направлениям $d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8$. Учитывая возможную вариацию линии контура L_i , необходима проверка текущего значения ширины T_{ni} . Обнаружением значимой вариации ширины линии контура считается изменение ширины на $2T_{ni}$. Такая величина вариации учитывает возможный признак пересечения или разветвления с другой линией контура. Это может являться признаком пересечения или разветвления с другой линией контура или артефактом обработки цифрового растрового изображения.

Обнаружение линии контура производится попиксельным наращиванием линии восстановления X_L , длина которой зависит от близости одного из восьми направлений исследования к границе линии контура определяемой переходом интенсивности $I = 0 \rightarrow I = 255$ на его границах.

Для точного определения границы контура, необходимо определить минимальное количество пикселей в его линии. Минимальным значением ширины можно считать величину 3 пикселя, т.к. площадь определения границы размером 3×3 обладает возможностью отразить направления: $d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8$. Последовательность исследования определяется соответствующим номером направления: $d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8$ под углом 45 градусов (рис. 3).

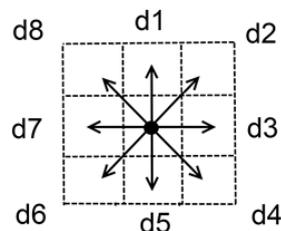


Рис. 3. Восемь направлений исследования линии контура $d1-d8$ дислокации в плоскости бинаризованного изображения пластины арсенида галлия

Приращение координат X_L задаются либо глобальной методикой [2], использующей эти исследования, либо сравнительно большим приращениями выбранными из нескольких положительных приращений координат по осям плоскости, по часовой стрелке при восстановлении контура.

5. Результаты разработки методов восстановления линии контура дислокации цифрового изображения пластины арсенида галлия

Определение ширины линии контура T_{ni} производится таким методом (рис. 4):

1. После обнаружения точки пересечения X_{ni} , с помощью пробной линии S_n в системе координат, совпадающей с направлением линий исследования $d7-d3$ и $d5-d1$ вычисляется абсолютная координата центра линии контура в месте пересечения X_{ni} .

2. Определяются координаты точек пересечения линии контура X_{d5} и X_{d1} по оси ординат и точки пересечения линии контура X_{d7} и X_{d3} по направлению $d7-d3$ параллельному оси абсцисс.

3. Рассматривая прямоугольный треугольник $X_{d7}-X_{ni}-X_{d1}$ для показанного расположения линии контура относительно пробной линии S_n , получим половину ширины линии контура, вычисляя её как высоту проведённую из прямого угла прямоугольного треугольника с величиной $T_{ni}/2$ по формуле:

$$T_{ni}/2 = L_{d7X_{ni}} \cdot L_{X_{ni}d1} / L_{d7d1}, \tag{2}$$

где длина отрезков $L_{d7X_{ni}}$, $L_{X_{ni}d1}$, L_{d7d1} определена по абсолютным координатам между точками $X_{d7}-X_{ni}$, $X_{ni}-X_{d1}$, $X_{d7}-X_{d1}$ соответственно в плоскости цифрового бинарного изображения.

Таким образом, текущее значение ширины линии контура:

$$T_{ni} = 2 \cdot L_{d7X_{ni}} \cdot L_{X_{ni}d1} / L_{d7d1}. \tag{3}$$

Ширина линии контура T_{ni} в процессе восстановления может изменяться по причине изменчивого отображения бинарной линии контура. Поэтому необходимо выделить частный случай определения ширины как суммы двух определённых отдельно полутолщин:

$$T_{ni} = T_{ni}/2 + T_{ni}/2. \tag{4}$$

Протяжённость линии в направлениях исследования $d2, d4, d6, d8$ для выбора вероятного направления X_L , после достижения границы линии контура, определяем по формуле:

$$X_L = \sqrt{(X_{Lm}^2 + X_{Ln}^2)}, \tag{5}$$

где X_{Lm} – проекция X_L на ось абсцисс m , X_{Ln} – проекция X_L на ось n .

Восстановление линии контура производится по мере продвижения линии восстановления X_L в направлении, обусловленном формой контура и границами его реальной линии. Первоначально X_L совпадает с одним из восьми направлений линии исследования контура, так что для рис. 5 X_L эквивалентна X_{d2} . Метод восстановления линии контура содержит следующие этапы (рис. 5):

1. Определение ширины линии контура T_{ni} и проверка выполнения условия (1) для точки обнаружения X_{ni} по вышеописанному методу определения ширины.

2. Продвижение по линии контура от точки X_{ni} . В данном случае (рис. 5) продвижение X_L совпадает с направлением исследования $d2$. Линия восстановления X_L имеет наибольшую длину приращения, совпадающую с линией направления $d2$. Эта линия подтверждает линию контура L_i до точки перехода к её границе с фоном изображения X_d , в которой происходит изменение интенсивности $I=0 \rightarrow I=255$.

3. Если граница линии контура L_i определена, производится уточнение ширины линии контура T_{ni} по условию (3) для последующего восстановления линии контура для точки X_{d2} на рис. 5. Учитывая изменчивость бинарной линии контура, по мере продвижения, ширина линии контура заменяется условием текущей ширины линии контура L_i со значениями не больше $2T_{ni}$. В случае определения неразрывной линии текущей ширины T_{ni} , продвижение линии восстановления X_L начинается от центра линии контура, после уточнения ширины в месте нахождения достигнутой точки границы методом определения ширины контура.

Если найден разрыв линии контура с максимальной величиной равной $3T_{min}$, после исследования окрестности радиусом $Z/16$, то при отсутствии других

линий в области радиусом $Z/16$, эту линию можно счи-

тать непрерывной т. е. восстановленной.

4. В случае появления утолщений и разветвлений, изменению могут быть подтверждены текущая ширина T_{ni} , а также длины линий в направлениях исследования $d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7, d8$. Это позволит проанализировать форму, приращение и направление линии контура. Уточнение производится исследованием окрестности ограниченной радиусом $Z/16$ от обнаруженного края линии контура.

Дальнейшее продвижение линии восстановления X_L будет происходить от крайней точки линии контура в момент последнего обнаружения его границы. Исследования изменений в области образованной радиусом $Z/16$, направляются на поиск возможных

пересечений или смежных областей примыкающих к линии контура.

Если обнаружена другая линия и прерывистость, то далее используется метод восстановления разветвлений линии контура описанный ниже.

5. Если величина продвижения линии восстановления по контуру больше $3T_{min}$ и равна $Z/16$, то этот участок контура считается прямым.

6. Восстановление продолжается с определения текущей ширины линии контура, т. е. с пункта 3.

В целом, контур будет считаться замкнутым при совпадении текущей координаты точки X_d по любой из осей n и/или m с начальной координатой пересечения линии исследования S_n с контуром, как показано на рис. 2.

Таким образом, в случае определения замкнутого восстановленного непрерывного контура дислокации, можно получить два признака: периметр контура и ширину линии контура.

Фактически, не все рассмотренные контуры можно отнести к неразрывным замкнутым.

Как показано на рис. 1, линии контура ямок травления дислокаций имеют различный характер нарушений структуры и подобия фигур дислокаций в плоскости бинаризованного изображения.

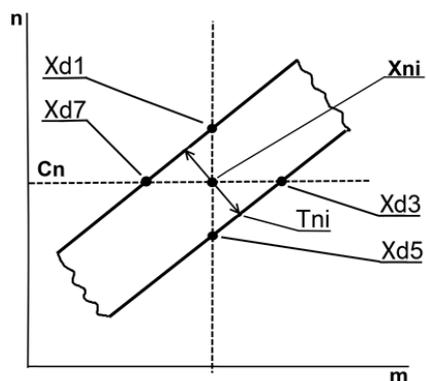


Рис. 4. Определение ширины T_{ni} на предполагаемой линии контура (показана линией со стрелками) от точки X_{ni} определяемой на пробной линии C_n по оси m на плоскости цифрового растрового изображения пластины GaAs, представленной осями координат m и n . X_{d7} и X_{d3} , X_{d5} и X_{d1} являются точками пересечения линий по направлениям $d7-d3$ и $d5-d1$ соответственно

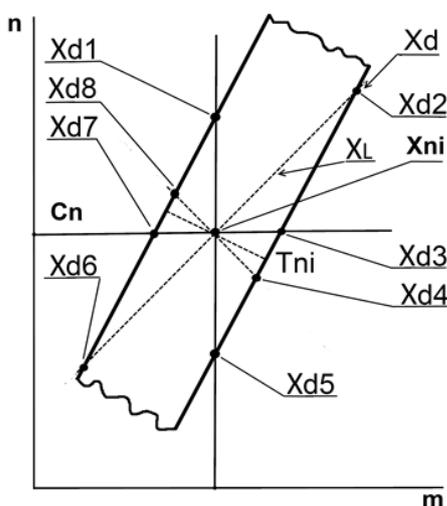


Рис. 5. Использование направлений исследования $d1$, $d2$, $d3$, $d4$, $d5$, $d6$, $d7$, $d8$ для восстановления линии контура L_i в направлении $d2$ из точки X_{ni} до X_{d2} на плоскости цифрового растрового изображения пластины GaAs представленной осями координат m и n . Ширина линии контура T_{ni} изображена штриховой линией, перпендикулярно к линиям границы контура. Граничная точка X_d линии восстановления X_L совпадает с точкой X_{d2} . Точки X_{d1} , X_{d2} , X_{d3} , X_{d4} , X_{d5} , X_{d6} , X_{d7} , X_{d8} являются точками пересечения линий по соответствующим направлениям

Поэтому необходим учёт ситуаций разветвления и прерывности линии контура.

Метод восстановления разветвлений после определения и восстановления смежных линий, позволяет найти смежные линии контура для возможных вариантов сочетания линий (рис. 6, $a-z$):

- непрерывная линия;
- прерывистая линия;

- разветвление линий;
- разветвление линий с разрывом в месте пересечения.

Для поиска линий прерывистого контура с целью восстановления, предлагается применять окружность исследования с диаметром $Z/8$ которая ограничивает

область поиска, но позволяет определить также соседние линии контура с учётом прерывистости и изменения направления. Обнаружение линий происходит в точках 1 и 2 линии контура, как показано на рис. 7, $a, б$, после чего могут быть найдены ближайшие точки к линии восстановления X_L от крайней точки X_d . Если разрыв между координатами точки X_d и ближайшими точками больше $3T_{min}$, то такая линия не считается продолжением линии исследуемого контура (рис. 7, $a, б$).

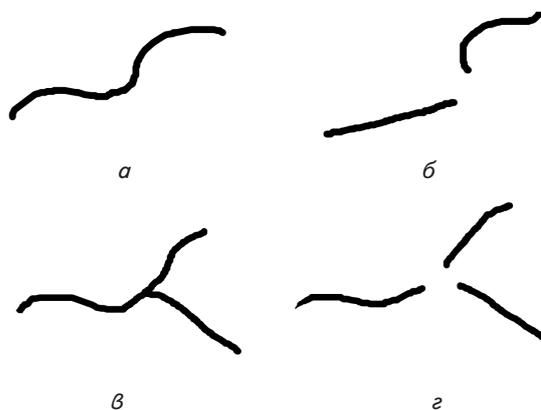


Рис. 6. Варианты исследуемых сочетаний линий контура для дальнейшего восстановления: a – непрерывная линия контура; $б$ – прерывистая линия контура; $в$ – разветвление линий контура; $г$ – разветвление линий с разрывом в месте пересечения линий контура

Следует отметить, что преимуществом использования восстановления линии контура попиксельным методом вместо использования квадратной сетки и шага дискретизации на квадратной сетке [5], является отсутствие необходимости пересчёта положения точки исследования к этой сетке.

Направлением продвижения на разветвлении принимается направление обусловленное изображением линии контура в методе восстановления разветвлений контура.

Найти возможные разветвления линии контура в случае применения направлений исследований: $d1$, $d2$, $d3$, $d4$, $d5$, $d6$, $d7$, $d8$ удастся, если анализировать изменение длины линий направления исследований. Кроме того, необходимо контролировать отклонение ширины контура от предыдущего значения ширины T_{ni} .

Расчёт ширины будет необходимо производить по формуле (4). По мере прохождения линии восстановления в случае поворота, утолщения, разветвления линии контура, будет зафиксировано наличие областей с интенсивностью $I=0$ и измерена разница длины линий исследования некоторых из восьми направлений исследования $d1-d8$. Приняв за значительную величину изменения длины направлений исследований $d1-d8$ большую $2T_{ni}$, можно определить наличие поворота, утолщения и разветвления. Непосредственное обнаружение контуров в ближайшей области подтверждается исследованием окрестности с диаметром $Z/8$.

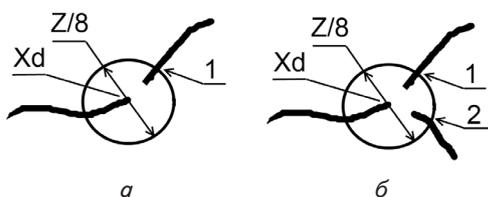


Рис. 7. Варианты исследования разрыва контура от крайней точки X_d с использованием для восстановления линии окружности с диаметром $Z/8$: *а* – с обнаружением линии контура в точке 1; *б* – с обнаружением линий контура в точках 1 и 2 для случая разветвления линий с разрывом в месте пересечения

Рассмотрим случай обнаружения разветвления линии контура (рис. 8).

В процессе восстановления контура линия X_L в точке 1 эквивалентной X_d обнаружит границу интенсивности $I=0$ и выделит направление исследования d_2 , как линию исследования X_L , имеющую наибольшее изменение протяжённости. Длина может быть определена по величине приращения координаты в системе координат с осями m и n по формуле (5). Максимальная длина линии исследования d_2 (точка 2 на рис. 8) обозначенная как линия X_{1-d_2} , определяется в системе координат с осями m и n по формуле (5). В случае величины приращения равной $Z/16$, этот участок линии считается прямым и длина $X_{1-d_2}=Z/16$. T_{ni} измеренная в точке 2 методом определения ширины контура по формуле (4), может иметь отличную от предыдущего измерения величину.

Продолжение исследования от точки 2 по направлениям d_1-d_8 линией X_3-d_5 , поможет обнаружить точку разветвления 4. После обнаружения разветвления контура линией исследования направления X_3-d_5 в точке 3 (рис. 8) методом восстановления линии контура, в точке 4 будет определён центр линии. Использование метода определения ширины контура по формуле (4). Дальнейшее определение линии контура в направлении d_4 из точки 4, позволит определить направление восстановления X_2-d_4 . Линия восстановления контура считается прямой, если длина $X_2-d_4=Z/16$.

Из двух направлений X_{1-d_2} и X_2-d_4 , равной приоритетности для дальнейшего восстановления, выбирается направление X_2-d_4 , так как X_{1-d_2} восстанавливается по методу [2] от смежной линии исследования $C_{(n+1)}$. Таким образом, X_L эквивалентно линии X_2-d_4 .

Далее выбирается линия с наибольшим отрицательным приращением координаты m , позволяющей продвигаться в направлении увеличения координаты n .

Метод восстановления разветвлений линии контура состоит из таких этапов:

1. Следование линии контура, используя метод восстановления линии контура.

2. Если в процессе восстановления контура дислокации определен разрыв, то обнаружение точки контура в случае отсутствия найденных утолщений и разветвлений, производится методом восстановления линии контура диаметром $Z/8$ (рис. 7). В случае

определения точки 1 (рис. 7) на линии со значениями ширины не большей $3T_{min}$, делается попытка исследования в направлении центра исследуемой окружности X_d с нахождением ближайших точек на разорванной линии по признаку (1). Т. е. если расстояние между точкой разрыва не больше $3T_{min}$, то считается, что эти линии в одном контуре. В противном случае, факт принадлежности данной линии контуру L_i не подтверждён.

3. Если происходит обнаружение нескольких линий, то делается попытка исследования этих линий в направлении центра исследуемой окружности с нахождением ближайших точек на разорванной линии по признаку (1). Если расстояние между точками разрыва не больше чем $3T_{min}$, то предполагается, что эти линии непрерывны и сходятся в один контур дислокации.

4. Если в процессе восстановления непрерывного контура определено разветвление линий или другие варианты их сочетания (рис. 7 *а, б*), то после исследования направлениями d_1-d_8 из точки 1 на рис. 8, выделится линия X_L-d_1 направления исследования d_2 до точки 2 на рис. 8. Протяжённость этой линии наибольшая из всех восьми направлений. Поэтому, далее она обозначается как линия исследования x_1-d_2 , с ограничением длины исследования не более $Z/16$ по

величине приращения. Линия исследования x_3-d_5 от точки 2 на рис. 8, получена в результате определения приоритетного направления исследования d_5 от точки 2 до точки 3 методом восстановления контура. Длина линии также не превышает $Z/16$. Этот участок

линии контура считается прямым. Дальнейшее следование по контуру методом восстановления линии происходит после определения направления линии исследования d_4 и получения линии восстановления x_2-d_4 от точки 4 на рис. 8. Здесь применяется метод определения ширины линии контура T_{ni} по формуле (4). Приоритет выбора из двух равнозначных направлений x_1-d_2 и x_2-d_4 , для восстановления выбирается по наибольшему отрицательному приращению координаты n , позволяющей продвигаться в направлении увеличения координаты m . Это определяется аналогичной методикой от смежной пробной линии $C_{(n+1)}$ (рис. 1), которая исследует ближайшие окрестности.

Таким образом, выбирая линию с наибольшим отрицательным приращением координаты n , позволяющей продвигаться в направлении увеличения координаты m (рис. 2), определяем продвижение линии восстановления контура x_2-d_4 , что обусловлено направлением исследования принятым в общем алгоритме [2].

5. Если в результате вышеописанных действий найдены пересечения линий контура с сочетающимися ветками без разрыва линии, то за их пересечение принимается повторение уже пройденных координат линией восстановления. Необходимым минимальным и достаточным условием пересечения линий восстановления является совпадение одной из координат. Вторая координата может различаться на линии восстановления уже проходившей в этой линии контура.

Если координаты линии восстановления проходят по уже исследованной линии или пройдены пробными

линиями, то делается вывод о взаимосвязи таких линий контуров.

Таким образом, используя метод восстановления разветвлений линии контура, возможно:

1. Определение точек схождения нескольких линий с признаками линии контура.

2. Восстановление разрывов с величиной не большей чем $3T_{\min}$ в линии контура.

3. Следование и учёт изменения направления линии контура в местах схождения нескольких кривых.

Предложенные методы восстановления линии дислокации позволяют реализовать:

1. Фиксирование каждой точки линии контура дислокации и определение ширины линии контура T_{ni} вышеописанным методом определения ширины.

2. Определение и фиксирование точек схождения нескольких линий контура.

3. Учёт изменения направления линии контура в местах схождения нескольких линий.

4. В случае восстановленного контура дислокации с замкнутой линией, возможно получение двух признаков: периметра контура и ширины линии контура.

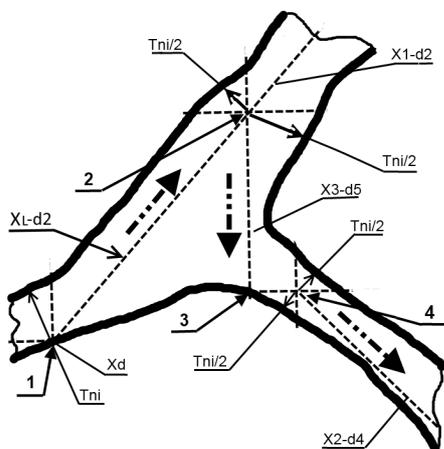


Рис. 8. Процесс восстановления линии контура в случае обнаружения разветвлений. После обнаружения границы линии контура в точке 1 и измерения ширины контура T_{ni} , направление исследования X_L-d2 в точке 2 получит протяжённую линию исследования X_3-d5 с обнаружением пересечения с линией контура в точке 3. Дальнейшее восстановление производится из точки 4 в направлении X_2-d4 . Штрихпунктирные указатели со стрелкой указывает выбор главных направлений восстановления контура

6. Обсуждение разработанных методов восстановления линии контура дислокации цифрового изображения пластины арсенида галлия

Преимущества предложенных методов восстановления линии контура ямок травления дислокаций дают возможность обнаруживать и исследовать линии характерной ширины и длины, что упрощает обработку изображения дислокаций. Число операций для обнаружения точек контура зависит только от количества линий контуров. Расчет координат точек непосредственно в пространстве пикселей изображения без

пересчёта геометрической координатной сетки снижает ошибку и количество операций обработки. Минимальное значение шага сетки соответствует 1 пикселю конкретного растрового изображения, поэтому нет необходимости пропорционального пересчёта точек раstra с уменьшением точности [2]. Таким образом:

1. Шаг дискретизации при следовании по контуру фигуре не влияет на правильность определения линии кривой контура и снижает неоднозначность трактовки фигуры в пространстве на квадратной сетке [18].

2. Обработка восьми направлений восстановления линии на минимальной площади 3×3 позволяет эффективнее реализовать восстановление линий контуров.

3. Использование окружности для изучения окрестности линии контура, упрощает определение в случае восстановления линии контура с длиной равной $Z/16$, позволяет уменьшить число итераций в срав-

нении с алгоритмами поиска перехода интенсивности. Например, алгоритма жука [12] и других подобных ему.

4. Методы восстановления линии контура дислокации используют пошаговое определение координат принадлежащих этой линии на основании пути пройденного пробной кривой в пределах существующей линии контура, что упрощает решение задачи. Использование математического аппарата кривых Безье для описания и восстановления линии контура, потребовало бы более сложные математические расчеты кривых, в том числе и уравнений высших степеней.

7. Выводы

В статье рассмотрена проблема восстановления линий контуров дислокаций на пластинах арсенида галлия. Автоматизация обнаружения контуров дислокаций является актуальной задачей и зависима от методов улучшения и выделения контуров фигур дислокаций цифрового растрового изображения плоскости пластины GaAs, поэтому восстановление контура решает эту задачу выделения контуров ямок травления дислокаций.

В работе усовершенствован метод определения ширины линии контура. Расчёт ширины геометрическим методом позволяет упростить определение и повысить точность вычислений. Согласно предложенному методу, после определения ширины линии, проверяют полученное значение на соответствие диапазону изменения от одного до трёх эталонных значений ширины линии контура. Такое ограничение является необходимой частью метода восстановления линии контура и метода восстановления разветвлений линии контура.

Впервые предложены следующие методы, позволяющие выделить линию контура предполагаемых ямок травления дислокаций пластины GaAs:

1. Метод восстановления линии контура, определяющий грань ямки травления дислокации по изменению направлений и текущей ширины линии.

2. Метод восстановления разветвлений линии контура, который исследует возможные сочетания линий.

Описанные методы восстановления – необходимая часть процесса выделения контуров для распознавания дислокаций в плоскости цифрового растрового изображения.

Предложенные методы восстановления контуров предполагаемых граней бинаризованного изображения дислокаций пластин GaAs используют для исследования области обнаружения контуров признак ширины линии контура после предварительной обработки. Методы восстановления линии контура ямок травления дислокаций имеют следующие преимущества.

1. Использование бинарного изображения контуров дислокаций позволяет обнаруживать и исследовать линии характерной ширины и длины, что упрощает дальнейшую обработку изображения дислокаций.

2. Число операций для обнаружения точек контура зависит от количества линий контуров.

3. Расчет координат точек контура непосредственно в пространстве пикселей изображения без пересчета в геометрическую координатную сетку, снижает ошибку, вносимую в определение положения границы контура. Минимальное значение шага сетки соответствует 1 пикселю конкретного растрового изображения, поэтому нет необходимости пропорционального пересчета точек раstra с уменьшением точности.

Литература

1. Самойлов, А. Н. Методы получения контуров на цифровых растровых изображениях с нечётким отображением дислокаций в пластинах GaAs [Текст] / А. Н. Самойлов, И. В. Шевченко // Компьютерно-інтегровані технології: 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]: матер. I Всеукр. наук.-прак. конф. / А. Н. Самойлов // «ІТ-Перспектива». – 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. Smith, S. M. SUSAN – A new approach to low level image processing [Text] / S. M. Smith, J. M. Brady // International Journal of Computer Vision. – 1997. – Vol. 23, Issue 34. – P. 45–78.
6. Rosten, E. Machine learning for high-speed corner detection [Text] / E. Rosten, T. Drummond // Proceedings of the European Conference on Computer Vision, 2006. – P. 430–443. doi: 10.1007/11744023_34
7. Harris, C. A combined corner and edge detector [Text] / C. Harris, M. Stephens // Alvey Vision Conference, 1988. – P. 147–151. doi: 10.5244/c.2.23
8. Schmid, C. Comparing and evaluating interest points [Text] / C. Schmid, R. Mohr, C. Bauckhage // Proceedings of the International Conference on Computer Vision, 1998. – P. 230–235. doi: 10.1109/iccv.1998.710723
9. Schmid, C. Evaluation of interest point detectors [Text] / C. Schmid, R. Mohr, C. Bauckhage // International Journal of Computer Vision. – 2000. – Vol. 37, Issue 2. – P. 151–172.
10. Lowe, D. Distinctive image features from scale-invariant keypoints [Text] / D. Lowe // International Journal of Computer Vision. – 2004. – Vol. 2, Issue 60. – P. 91–110. doi: 10.1023/b:visi.0000029664.99615.94
11. Bay, H. SURF: Speeded up robust features [Text] / H. Bay, T. Tuytelaars, L. Van Gool // Proceedings of the European Conference on Computer Vision, 2006. – P. 404–417. doi: 10.1007/11744023_32
12. Абламейко, С. В. Обработка изображений: технология, методы, применение [Текст] / С. В. Абламейко, Д. М. Лагуновский. – Минск: Амалфея, 2000. – 304 с.
13. Дуда, Р. Распознавание образов и анализ сцен [Текст] / Р. Дуда, П. Харт. – М.: Мир, 1978. – 507 с.
14. Freeman, H. A corner finding algorithm for chain coded curves [Text] / H. Freeman, L. Davis // IEEE Transactions on Computers. – 1977. – Vol. 26, Issue 3. – P. 297–303. doi: 10.1109/tc.1977.1674825
15. Bribiesca, E. Shape description and shape similarity for two dimensional regions [Text] / E. Bribiesca, A. Guzman // Paper presented at the 41h International Conference on Pattern Recognition, Kyoto, Japan, 1978.
16. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений [Текст] / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – Москва: Техносфера, 2006. – 616 с.
17. Epshtein, B. Detecting Text in Natural Scenes with Stroke Width Transform [Electronic resource] / B. Epshtein, E. Ofek, Y. Wexler. – Microsoft Corporation, 2009. – <http://research.microsoft.com/pubs/149305/1509.pdf> – Last accessed: 23.12.12.
18. Прэтт, У. Цифровая обработка изображений. Кн. 1 [Текст] / У. Прэтт. – М.: Мир, 1982. – 312 с.