

На правах рукописи

Бежанив

Беляков Олег Александрович

**МЕТОД ТРЕХМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВНУТРЕННЕЙ
СТРУКТУРЫ СЛИТКА МУЛЬТИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
КРЕМНИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН**

Специальность 01.04.01 - «Приборы и методы экспериментальной физики»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рязань – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина».

Научный руководитель: **Карabanов Сергей Михайлович**, доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы» Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рязанский государственный радиотехнический университет имени В.Ф. Уткина»

Официальные оппоненты: **Волков Степан Степанович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное казенное военное образовательное учреждение высшего образования «Рязанское гвардейское высшее воздушно-десантное ордена Суворова дважды Краснознаменное командное училище имени генерала армии В.Ф. Маргелова» Министерства обороны Российской Федерации, профессор кафедры автомобильной техники, г. Рязань

Анкудинов Александр Витальевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Лаборатории физико-химических свойств полупроводников Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, г. Санкт-Петербург

Ведущая организация: Калужский филиал федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Калуга

Защита состоится «28» января 2020 г. в 11 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.211.03 при ФГБОУ ВО «РГРТУ» по адресу: 390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «РГРТУ» и на официальном сайте <http://www.rsreu.ru>.

Автореферат разослан «___» декабря 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.211.03, к.ф.-м.н., доцент



В.Г. Литвинов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Прямое преобразование солнечной энергии в электрическую (фотоэлектрический эффект) является одним из основных направлений возобновляемой энергетики. Наиболее распространенный тип фотоэлектрических устройств преобразования энергии или солнечных элементов — это устройства на основе кристаллического кремния.

Используемый кремний по способу получения делится на моно- и мультикристаллический. На основе монокристаллического кремния создаются высокоэффективные солнечные элементы, за счет отсутствия дефектов в его кристаллической структуре. Мультикристаллический кремний является материалом с высоким содержанием дефектов и элементы на его основе имеют эффективность ниже, чем у монокристаллических солнечных элементов на 2,0-2,5%. Более низкая себестоимость, по сравнению с технологией получения монокристаллов, позволяет технологии мультикристаллического кремния быть лидером в отрасли на данный момент.

Основная задача, стоящая перед технологией мультикристаллического кремния, заключается в повышение эффективности получаемых солнечных элементов за счет снижения количества дефектов, возникающих в процессе направленной кристаллизации слитков. Особенность процесса направленной кристаллизации заключается в неравномерном распределении дефектов по высоте получаемого мультикристаллического слитка.

При использовании существующих методов исследования дефектов возможно получать информацию с плоскости продольных или поперечных срезов слитка кремния. Такие плоскостные методы дают ограниченное количество информации и не позволяют полноценно оценить качество проведенного процесса направленной кристаллизации. Потребность в получении слитков мультикристаллического кремния с минимальным количеством дефектов и их равномерным распределением по высоте приводит к необходимости разработки метода визуализации объемного распределения дефектов в слитках кремния. Поэтому, научно-техническая задача определения распределения дефектов в объеме слитка мультикристаллического кремния в настоящее время является актуальной.

Степень разработанности темы. В течение последнего десятилетия интенсивно развивается комплексный подход к исследованию условий кристаллизации мультикристаллического кремния с минимальным количеством дефектов кристаллической структуры. Однако остается нерешенной проблема обоснованного выбора условий процесса кристаллизации для получения кристаллов с низким и равномерным количеством дефектов по всему объему блоков кремния. Также, были получены убедительные экспериментальные доказательства высокой степени корреляции между наличием дефектов и снижением эффективности, а также других характеристик фотоэлектрических преобразователей. Вопросы определения дефектов в кристаллическом кремнии на основе методов цифровой обработки изображений в области фотоэлектрической промышленности рассмотрены в трудах преимущественно зарубежных авторов.

Цель и задачи диссертации. Целью диссертации является разработка метода визуализации внутренней структуры блока и слитка мультикристаллического кремния. Достижение поставленной цели требует решения следующих задач:

1. Разработать способ сортировки изображений фотолюминесценции пластин для восстановления порядка следования пластин в объеме блока кремния.
2. Разработать алгоритм цифровой обработки изображений фотолюминесценции пластин для формирования трехмерных изображений внутренней структуры блока и слитка.
3. Разработать способ выделения структурных дефектов в трехмерных изображениях внутренней структуры блока и слитка.
4. Разработать программно-аппаратный комплекс для автоматизированной визуализации расположения дефектов в структуре мультикристаллического кремния.

Научная новизна работы:

1. Разработан способ сортировки изображений фотолюминесценции пластин для восстановления порядка их следования в объеме блока кремния по нормированной производной функции распределения удельного электрического сопротивления пластин и вычисления линейных коэффициентов взаимной корреляции кольцеобразных участков изображений фотолюминесценции.
2. Разработана математическая модель для визуализации внутренней структуры слитка мультикристаллического кремния, включающая загрузку исходных изображений фотолюминесценции

пластин, удаление фона с изображений и центрирование извлеченных изображений пластин, восстановление расположения пластин по высоте блока, построение трехмерных изображений и выделение дефектов в результате пороговой фильтрации значения интенсивности фотолюминесценции.

3. Разработан метод реконструкции структуры слитка мультикристаллического кремния, включающий следующую последовательность операций: разделение слитка на блоки, разделение блоков на пластины, регистрация изображений фотолюминесценции поверхности пластин, восстановление порядка расположения пластин по высоте блока и трехмерная визуализация структуры блоков и срезов слитка кремния.

4. Создан программно-аппаратный комплекс для автоматизированной визуализации расположения поверхностных и объемных дефектов в структуре мультикристаллического кремния, позволяющий из трехмерных изображений выделять вертикальные сечения отдельных блоков и проводить сравнительный анализ нескольких различных блоков или слитков.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Сортировка изображений фотолюминесценции пластин по нормированной производной функции распределения удельного электрического сопротивления позволяет восстановить порядок их расположения по направлению распространения фронта кристаллизации.

2. Восстановление взаимного азимутального положения соседних изображений фотолюминесценции в блоке осуществимо с помощью вычисления линейных коэффициентов взаимной корреляции кольцеобразных участков изображений толщиной от 10 до 12 мм и внешним радиусом от 54 до 70 мм.

3. Формирование трехмерных изображений внутренней структуры слитка мультикристаллического кремния по изображениям фотолюминесценции поверхности пластин требует последовательного выполнения следующих операций: центрирование изображений на основе преобразования Радона; определение порядка следования изображений на основе нормированной производной функции распределения удельного электрического сопротивления пластин; выравнивание взаимного азимутального положения соседних пластин на основе вычисления линейных коэффициентов взаимной корреляции кольцеобразных областей изображений.

Методы исследований и достоверность результатов. В работе использованы методы цифровой обработки изображений фотolumинесценции кремниевых пластин. Для моделирования и проведения расчетов на ЭВМ применен пакет программного обеспечения Matlab. Экспериментальная часть диссертационной работы проводилась с помощью модуля фотolumинесценции HE-PL-02 фирмы Hennecke Systems, расположенного на производственной площадке ООО «ХЕЛИОС-Ресурс». Достоверность результатов подтверждается экспериментальными исследованиями и практическим внедрением.

Практическая значимость подтверждается созданием программно-аппаратного комплекса, позволившего визуализировать внутреннюю структуру слитка мультикристаллического кремния. Разработанный комплекс позволяет визуализировать расположение дефектов в слитках мультикристаллического кремния. Сравнительный анализ кристаллов с крупнозернистой и мелкозернистой структурой показал, что для фотоэлектрических преобразователей, созданных из пластин с мелкозернистой структурой, эффективность выше на 0,9%.

Вклад автора. Диссертация написана по материалам исследований, выполненных лично автором при его непосредственном участии или под его руководством. Автором выполнены исследования, определившие защищаемые положения и результаты.

Реализация результатов работы. Полученные экспериментальные результаты и разработанное программно-математическое обеспечение внедрены в ООО «ХЕЛИОС-Ресурс» в программно-аппаратном комплексе и технологической документации для мониторинга производства слитков и пластин мультикристаллического кремния.

Апробация работы. Результаты работы представлены на 37-ой международной конференции Spring Meeting of the European Materials Research Society (E-MRS) г. Ницца, Франция, 2019 г.; 36-ой международной конференции European PV Solar Energy Conference (EU PVSEC), г. Марсель, Франция, 2019 г.

Публикации. По результатам исследования опубликовано 5 работ: 3 статьи в журналах из перечня ВАК, 1 свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ, 1 работа входит в реферативные базы данных Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы (113 наименований) и приложений. Работа изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 77 рисунков и 5 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, определены степень разработанности темы, цели и задачи исследования, сформулированы научная новизна и основные положения, выносимые на защиту, обоснована практическая ценность работы, приведены данные о реализации, внедрении, апробации, сведения о публикациях, структуре и объеме работы.

В первой главе представлен обзор кристаллического кремния как материала для фотоэлектрических преобразователей. Исследованы условия проведения процесса направленной кристаллизации мультикристаллического кремния, типы дефектов кристаллической решетки, свойственные мультикристаллическому кремнию. Проведен анализ методов получения мультикристаллического кремния с различным размером зерна: от крупнозернистых до мелкозернистых.

Проведен анализ существующих методов контроля электрофизических параметров кристаллов кремния при производстве слитков и пластин мультикристаллического кремния. Выявлено, что используемые методы дают ограниченную информацию о содержании и распределении дефектов и не могут быть в своем неизменном виде применены для исследования объемного распределения дефектов в слитке кремния.

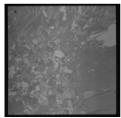
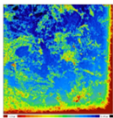
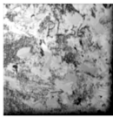
Анализ показал, что трехмерная визуализация распределения дефектов в слитке мультикристаллического кремния может быть осуществлена методами цифровой обработки изображений, полученных методом фотолюминесценции поверхности пластин. Метод фотолюминесценции сочетает в себе возможность получения пространственного распределения дефектов различного типа по пластине и время измерения одной пластины за несколько секунд.

На основе проведенного анализа сформулированы цель диссертационной работы и основные задачи исследования.

Во второй главе представлен разработанный метод трехмерной визуализации внутренней структуры мультикристаллического блока кремния. Решение поставленных задач достигнуто на основе применения следующей последовательности операций с изображениями фотолюминесценции поверхности пластин:

- преобразование Радона исходного изображения;
- сортировка изображений по нормированной производной функции распределения удельного электрического сопротивления пластин;
- вычисление линейных коэффициентов взаимной корреляции изображений.

Таблица 1 – Сравнение методов определения дефектов внутренней структуры мультикристаллического кремния

Метод	Инфракрасный	Фото проводимость	Фото люминесценция	Дифракция рентгеновских лучей
Пластины 157-157 мм				
Типы дефектов	Включения, Трещины, Размеры зерен	Дислокации, Диффузионное загрязнение металлами из тигля	Дислокации, Диффузионное загрязнение металлами из тигля, Рекомбинационно-активные границы зерен	Кристалло графическая ориентация зерен
Время измерения пластины	1-2 секунды	8-15 минут	1-2 секунды	От 2 до 5 часов
Обработка пластины	Не требуется	Не требуется	Не требуется	Полпирование поверхности

Алгоритм работы программы, реализующей метод представлен на рисунке 1.

Входные данные для работы программы является трехмерный массив, который содержит загруженные изображения фотолюминесценции (ФЛ) и текстовый файл с электрофизическими параметрами пластин.

Исследуемые пластины на исходных изображениях фотолюминесценции произвольным образом повернуты относительно границ изображения. Для выделения границ пластины на изображении

осуществляется сравнение всех элементов массива значений уровня яркости фотолюминесценции с пятикратным значением среднеквадратичного уровня яркости всего изображения. Все элементы массива, которые удовлетворяют этому условию приравниваются к нулю. Преобразование Радона используется для определения геометрических параметров выделенных границ пластины с последующим удалением фона и центрированием изображения.

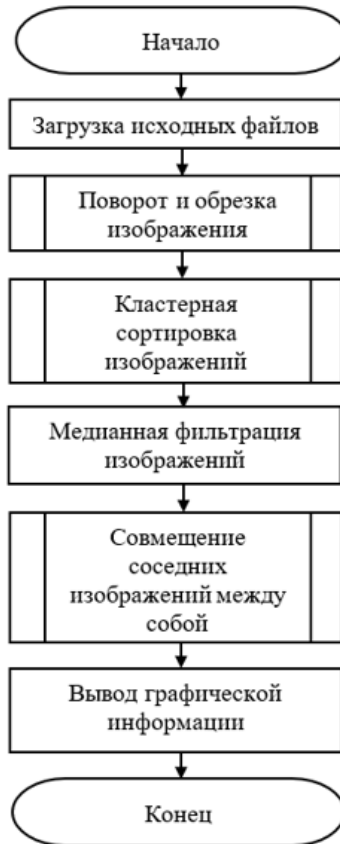


Рисунок 1 - Блок-схема алгоритма работы главной программы

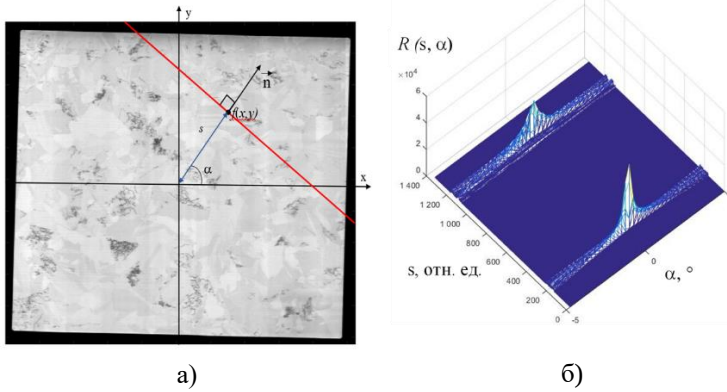


Рисунок 2 – (а) Преобразование Радона изображения фотолюминесценции пластины. (б) Изображение фотолюминесценции в пространстве Радона

Преобразование Радона представляет собой результат интегрирования функции двух переменных вдоль прямой, перпендикулярной вектору $\vec{n} = (\cos(\alpha), \sin(\alpha))$ и проходящей на расстоянии s от начала координат (рис. 2):

$$R(s, \alpha) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s \cos(\alpha) - \xi \sin(\alpha), s \sin(\alpha) + \xi \cos(\alpha)) d\xi, \quad (1)$$

$$\text{где } \begin{bmatrix} s \\ \xi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & \sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix},$$

$$f(x, y) = \int_0^{2\pi} d\alpha \int_0^{\infty} \frac{\omega d\omega}{4\pi^2} e^{i\omega(x\cos\alpha + y\sin\alpha)} \int_{-\infty}^{\infty} R(s, \alpha) e^{-i\omega s} ds. \quad (2)$$

Попытка сформировать продольный срез блока по изображениям ФЛ пластин, из которого они получены, опираясь только на информацию об их порядковом номере приводит к ложному результату. Порядковый номер изображений не отражает реального расположения пластин в блоке.

Для восстановления порядка расположения применяется сортировка изображений по значению удельного электрического сопротивления пластин. Дифференцирование скачкообразной функции распределения удельного электрического сопротивления от номера пластины выделяет разрывы функции (скачки), в которых производная принимает аномальное значение. Все номера пластин, входящие в

промежуток между выявленными выбросами производной, формируются в кластеры. Далее вычисляются средние значения удельного сопротивления среди пластин, входящих в один кластер. Порядок следования зарегистрированных пластин в блоке, когда функция распределения удельного сопротивления от их порядкового номера не терпит разрывов определяется после сортировки кластеров по величине среднего значения сопротивления и их объединения. Кластерная сортировка изображений проиллюстрирована на рисунке 3.

Для проверки работы алгоритма кластерной сортировки по значению удельного сопротивления было отобрано 30 блоков (17 тысяч пластин) из разных частей различных слитков. Полученные пластины были проведены через линию контроля в строго в соответствии с их расположением по высоте блоков. Затем порядковые номера были изменены случайным образом. Успешность работы алгоритма оценивалась долей ошибок, которая определяется количеством изображений с неверно определенным начальным порядковым номером к общему количеству изображений.

Для 26-ти блоков (87%) доля ошибок составила не более 2 % (в среднем 10 из 560 пластин). Для 4 блоков (13%) доля ошибок составила от 4 до 6 % (до 35 пластин).

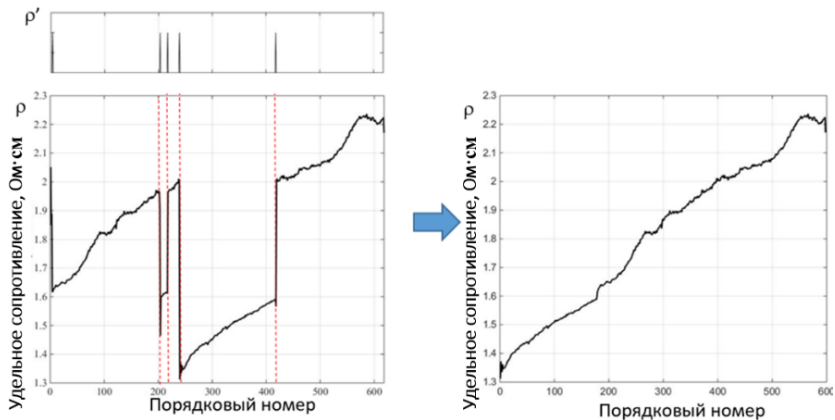


Рисунок 3 - Сортировка кремниевых пластин по величине удельного электрического сопротивления

Медианная фильтрация используется для последовательной обработки каждой точки изображения ФЛ, в результате чего образуется последовательность оценок. При этом применялось двумерное окно (апертура фильтра) с центральной симметрией и центром в текущей точке фильтрации.

Особенности раскладки пластин при регистрации изображений ФЛ приводит к их азимутальным поворотам на угол кратный 90° . В работе решается задача совмещения соседних изображений ФЛ пластин в блоке. Первый метод решения - аппроксимация изображений полиномом n -ого порядка с последующим вычислением коэффициентов взаимной корреляции между коэффициентами аппроксимации (рис. 4).

$$P(x, y) = c_1 x^n + c_2 y x^{n-1} + c_3 y^2 x^{n-2} + \dots + c_5 y^n, \quad (3)$$

где $c_1, c_2, \dots, c_n$ – коэффициенты аппроксимации.

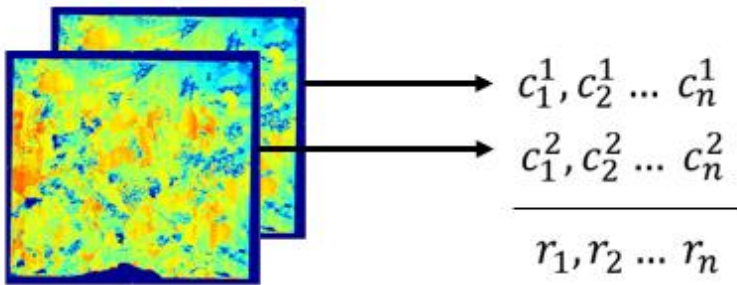


Рисунок 4 – Аппроксимация изображений фотолюминесценции

Наименьшая доля ошибочно повернутых пластин S_{err} была достигнута при использовании полинома 4-го порядка. Полученные значения приведены в таблице 2

Таблица 2.

Порядок полинома n	1	2	3	4	5
$S_{\text{err}}, \%$	12	9	5	4	7

В результате тестирования данного метода было выявлено, что он не применим для изображений без резкого градиента интенсивностей (пластины из центральной части слитка). Доля ошибочно повернутых изображений возросла до 15%.

Второй метод - вычисление линейных коэффициентов взаимной корреляции по участкам изображений (рис. 5). В качестве участка сравнения выбран кольцеобразный участок. Проведено исследования геометрических параметров кольцеобразного участка, при которых верный угол поворота вычислялся для всех типов пластин. Определено, что участок с геометрическими параметрами: радиус от 350 до 450 пк и толщина от 10 до 80 пк является универсальным участком корреляции. Исходя из цели сокращения времени обработки изображений предложено использовать диапазон толщины от 20 до 40 пк.

Доля ошибочно повернутых изображений ФЛ составила не более 3 % для всех исследуемых блоков.

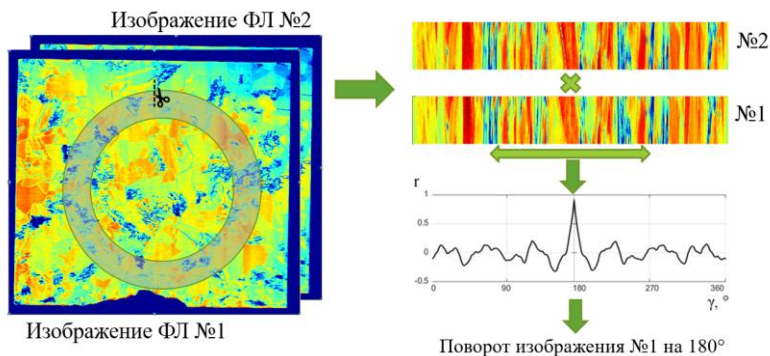


Рисунок 5 – Вычисление коэффициента корреляции и угла поворота изображения по участку сравнения

Показано, что графический вывод трехмерных изображений структуры блока, полученного по изображениям ФЛ поверхности пластин, осуществляется в виде продольного среза слитка, в виде трехмерного изображения структуры с тремя интерактивными плоскостями или томограммы и трехмерного изображения дефектов, выделенных с помощью пороговой фильтрации (рис. 6).

В третьей главе представлены результаты трехмерной визуализации внутренней структуры блоков мультикристаллического кремния (рис. 7, 8).

Для демонстрации работы метода исследовано два блока с разной кристаллической структурой. Блок А имел равномерную

мелкозернистую кристаллическую структуру, блок Б – неравномерную крупнозернистую структуру. Всего было обработано 1264 изображений.

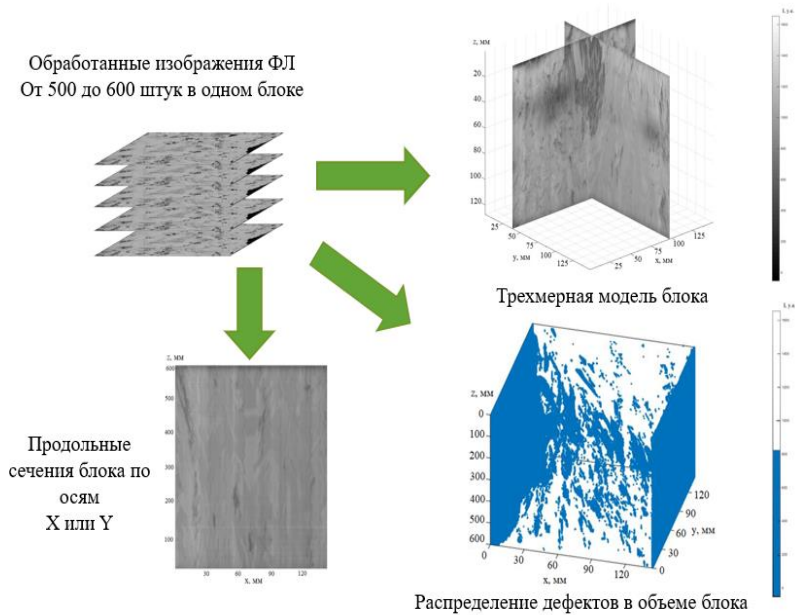


Рисунок 6 – Трехмерная визуализация дефектов внутренней структуры мультикристаллического кремния

Проведен анализ трехмерных изображений и срезов по содержанию дефектов, их размеров, места зарождения и последующего развития. Отмечены различия в наклоне зерен, зарождающихся со стороны кристаллизационного тигля. Показано, что крупнозернистая структура в себе содержит большее количество дефектов, чем мелкозернистая. Что подтверждает измеренная эффективность ФЭП, изготовленных из пластин с мелкозернистой структурой, выше на 0,9%, чем эффективность ФЭП, изготовленных из пластин с крупнозернистой структурой.

Показано трехмерное изображений сектора слитка, построенного из 5 блоков (рис. 9).

Программно-аппаратный комплекс, разработанный для визуализации дефектов в структуре мультикристаллического кремния, позволяет в автоматическом режиме создавать трехмерные изображения структуры блоков кремния.

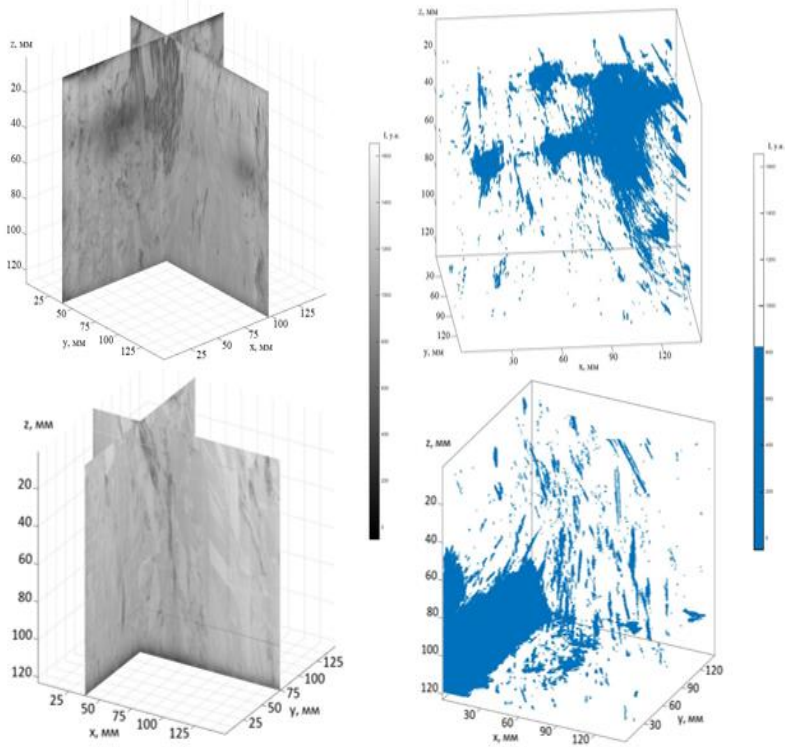


Рисунок 7 – Трехмерные изображения структуры и дефектов блока А (сверху) и блока Б (снизу)

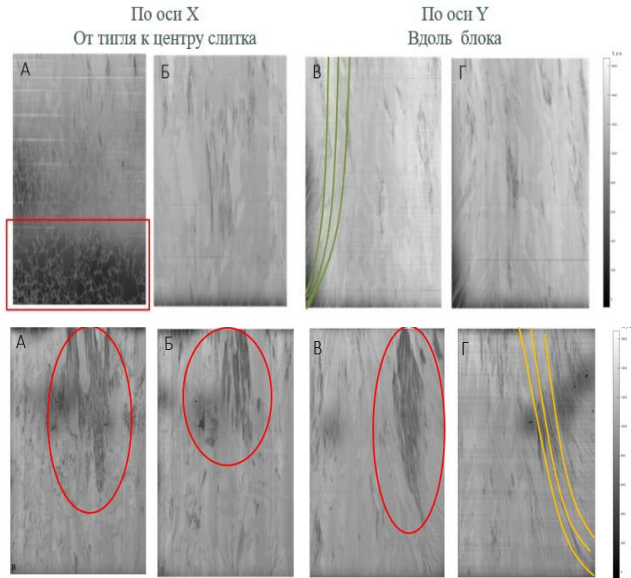


Рисунок 8 – Сечения трехмерных изображений блока А (сверху) и блока Б (снизу) с отмеченными дефектами

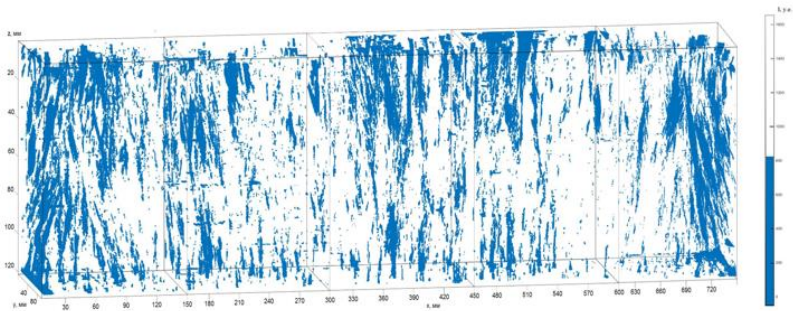


Рисунок 9 – Трехмерное изображение поперченного среза слитка

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1) Разработан способ сортировки изображений фотолюминесценции пластин для восстановления порядка следования пластин в объеме блока кремния до резки.

2) Разработан алгоритм цифровой обработки изображений фотолюминесценции пластин для формирования трехмерного изображения внутренней структуры блока и слитка.

3) Разработан способ выделения структурных дефектов в трехмерном изображении.

4) Разработано программно-математическое обеспечение (ПМО), осуществляющее построение интерактивных трехмерных изображений внутренней структуры блоков и срезов слитка с возможностью выделения участков, содержащих дефекты структуры и продольных сечений по осям X и Y.

5) ПМО позволяет визуализировать объемное распределение дефектов по слитку и направление роста зерен кристаллов. Определение мест зарождения и исчезновения дислокационных кластеров, позволяет устанавливать причины их появления. Это дает важные данные для изучения физики роста мультикристаллического кремния. Используя эту информацию возможно отрегулировать параметры процесса направленной кристаллизации и, таким образом, минимизировать образование дефектов в слитках мультикристаллического кремния.

6) При сравнительном анализе трехмерных изображений блоков с различной структурой, отличающихся зернистостью, получено экспериментальное подтверждение факта, что скорость размножения дислокаций значительно уменьшается при получении мелкозернистой структуры (метод HP mc-Si). Во время конкурентного роста кристаллитов высокое количество границ зерен с различной ориентацией останавливает рост дислокаций.

7) Разработан программно-аппаратный комплекс для автоматизированной визуализации расположения поверхностных и объемных дефектов в структуре мультикристаллического кремния, позволяющий в автоматическом режиме создавать трехмерные изображения структуры. Полученные результаты и разработанное программно-математическое обеспечение внедрены в ООО «ХЕЛИОС-Ресурс» в программно-аппаратном комплексе и технологической документации для визуализации дефектов при производстве слитков мультикристаллического кремния.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Работы, опубликованные в научных журналах, входящих в перечень ведущих рецензируемых журналов и изданий ВАК РФ:

1. Карабанов, С.М. Разработка метода трехмерной визуализации мультикристаллической структуры блоков кремния / С.М. Карабанов, А.Е. Серебряков, О.А. Беляков, Д.В. Суворов, А.С. Карабанов // Вестник РГРТУ. – 2019. - №2 (выпуск 68). – С. 105-110.
2. Серебряков, А.Е. Анализ распределения дефектов в блоке мультикристаллического кремния методом трехмерной визуализации внутренней структуры / А.Е. Серебряков, О.А. Беляков, // Вестник РГРТУ. – 2019. - №3 (выпуск 69). – С. 227-234.
3. Серебряков, А.Е. Сравнительный анализ методов вычисления взаимной корреляции при обработке изображений фотолюминесценции мультикристаллических пластин кремния / А.Е. Серебряков, О.А. Беляков, // Вестник РГРТУ. – 2019. - №3 (выпуск 69). – С. 221-226.

**Свидетельство о государственной регистрации программы
для ЭВМ:**

4. Компьютерная программа по цифровой обработке изображений «Разработка метода трехмерной визуализации мультикристаллической структуры блоков кремния»: свидетельство о государственной регистрации ПрЭВМ 2019618058 Рос. Федерация / Серебряков А.Е., Беляков О.А., Суворов Д.В., Карабанов С.М., Карабанов А.С.; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО «РГРТУ». - №2019616936; заявл. 10.06.2019; опубл. 26.06.2019.

Работы, опубликованные в изданиях, индексированных в базах данных Web of Science и Scopus:

5. Karabanov S.M., Belyakov O.A., Karabanov A.S., Serebryakov A.E., Suvorov D.V. The development of 3d visualization of ingot structure based on digital processing of photoluminescent wafer images of multicrystalline silicon // Proceedings of the EU PVSEC 2019. – 2019. – P. 345-348.

БЕЛЯКОВ Олег Александрович

**МЕТОД ТРЕХМЕРНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ВНУТРЕННЕЙ
СТРУКТУРЫ СЛИТКА МУЛЬТИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО
КРЕМНИЯ ПО ИЗОБРАЖЕНИЯМ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ
ПОВЕРХНОСТИ ПЛАСТИН**

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.11.19 г. Формат бумаги 60×84 1/16

Бумага офсетная. Печать трафаретная. Усл. печ.л.1,0.

Тираж 100 экз.

ФГБОУ ВО «РГРТУ им. В.Ф. Уткина»

390005, Рязань, ул. Гагарина, 59/1.

Редакционно-издательский центр РГРТУ.