УДК 004.41/.42

Р.В. Левченко

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОБЛАСТИ СКАНИРОВАНИЯ СОЛНЕЧНОГО ЭЛЕМЕНТА ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ЕГО ЭФФЕКТИВНОСТИ

Левченко Роман Васильевич, окончил магистратуру на кафедре «Автоматизация проектирования и дизайна» (АПД) Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» по направлению «Прикладная информатика», аспирант кафедры АПД НИТУ «МИСиС» по направлению «Информатика и вычислительная техника». Специализируется на разработке программного обеспечения экспресс-контроля качества эффективности полупроводников. [e-mail: karatays@yandex.ru].

Аннотация

Разработан метод диагностики фотосканирования солнечных элементов (СЭ) с помощью экрана монитора и подключенного к нему персонального компьютера. Одним из направлений применения метода фотосканирования является контроль качества в технологической цепочке полупроводниковых приборов. Метод состоит из аппаратной и программной частей. Аппаратная часть отвечает за получение показателя фотоответа в виде напряжения. Программная часть берет на себя получение, обработку, хранение и визуализацию данных.

Предложенное устройство имеет проблему ввода области сканирования СЭ. Данная проблема имеется на стадии позиционирования элемента в процессе диагностики. Устранение недостатка происходит путем внедрения программно-математического обеспечения поиска чувствительной области элемента в программное обеспечение.

Алгоритм поиска области сканирования представляет собой процесс засветки световым пятном в виде строк и столбцов. Значения фотонапряжения в этих областях сравниваются с величиной границы нечувствительности. В результате, программа получает область засветки эффективной области СЭ. Алгоритм также повышает скорость диагностики в случае полной потери эффективности некоторой зоны СЭ.

Ключевые слова: солнечная батарея, солнечный элемент, полупроводник, диагностика, автоматизация, программное обеспечение, метод фотосканирования.

doi: 10.35752/1991-2927-2021-2-64-111-118

THE ALGORITHM FOR SEARCHING THE SOLAR CELL SCANNING AREA TO DIAGNOSE ITS EFFICIENCY

Levchenko Roman Vasilevich, graduated from the Department of Computer-aided Design and Engineering at National University of Science and Technology MISIS with the Master's degree in Applied Informatics; Postgraduate Student of the Department of Computer-aided Design and Engineering at NUST MISIS majoring in Informatics and Computer Science; specialized in the field of software development for quality express-testing the semiconductor performance. e-mail: karatays@yandex.ru.

Abstract

The article deals with the method developed for diagnosing photo scanning of solar cells using a monitor screen and a personal computer connected to it. The photo-scanning method can be used as quality control in the technological chain of semiconductor devices. The method comprises hardware and software. The hardware part is used for obtaining photo-response in form of voltage. The software part ensures receiving, processing, storing and visualizing of data.

The proposed device has a problem of entering scanning area of the solar cells. This problem is revealed at stage of element positioning in the diagnostic process. The defect is eliminated by introducing a software and mathematical support for searching sensitive area of an element.

The algorithm of the scanning area search scanning is a process of exposure light spot in form of rows and columns. Photovoltage values in these areas are compared with the value of insensitivity limit. As a result, the program receives illumination area of the the solar cell effective region. The algorithm also increases the diagnostic speed in case of complete loss of efficiency in a some area of.

Keywords: solar battery, solar cell, semiconductor, diagnostics, automation, software, photoscanning method.

ВВЕДЕНИЕ

Солнечная энергетика на основе элементов на поликристаллическом и аморфном кремнии занимает прочную позицию в промышленном и бытовом секторах в основном из-за дешевизны производства. Однако пленочные солнечные элементы (СЭ) в отличие от монокристаллических обладают нестабильностью параметров и многочисленными дефектами, возникающими в процессе производства: проколы, неравномерность эффективности по рабочей площади, трещины, царапины активного слоя и прочие. Эти дефекты снижают коэффициент полезного действия солнечных батарей.

Показатель качества СЭ оценивается ускоренными тестами старения (PID test) и показателем коэффициента заполнения вольт-амперной характеристики (ВАХ) (Fill factor – FF). Показатель FF является одним из основных параметров, являющимся отношением реальной мощности элемента к заявленной.

PID-test и FF-оценки зависят от микроскопического состояния структуры СЭ. Дефекты возникают уже на стадии технологического процесса. Экономически целесообразно включать в технологическую цепочку оценку качества параметров СЭ, таких как локальную эффективность, наличие проколов и прочее.

Существует множество работ по исследованию локальной эффективности качества полупроводниковых приборов. Наиболее доступные и дешевые методы основаны на применении воздействия излучения света на активную область полупроводниковых элементов.

Российскими учеными Горюновым Н.Н. в соавторстве был разработан метод фотосканирования, на основе которого был создан ряд устройств для диагностики качества полупроводниковых изделий.

Устройства, разработанные авторами [1–3], представляют из себя объемную оптическую систему. В основе лежит излучатель света, фокусируемый на локальную область поверхности полупроводниковой структуры. В данном методе вывод о качестве состояния структуры элемента следует из изображения, полученного с помощью засветки микроскопическим световым пятном (СП) чувствительной области полупроводника. Изображение строится на основе данных о фототоке в виде областей различной яркости. Сканирование СП осуществляется разнообразными способами: проецированием экрана телевизионной трубки, развёрткой сфокусированного СП механическими устройствами.

Недостатками указанных устройств являются большие габариты, аналоговое изображение и необходимость синхронизации сканирования со снимка фотоответа. Кроме того, невозможно получить количественную обработку параметров изображения.

В [4] описано фотосканирующее устройство, позволяющее получать цифровой сигнал фотоответа в виде прямоугольной матрицы. Однако это устройство имеет достаточно большие габариты фокусирующей системы.

Описанные способы фотосканирования имеют общие недостатки в сложности реализации метода диагно-

стики и в размере устройства. Данные аналоги приспособлены для сканирования активной зоны электронных устройств малого размера, где рабочая область сканирования не превышает габариты работы СЭ 5х5 мм.

Анализ литературных источников показал, что устройств, позволяющих получить полную карту эффективности СЭ размерами 200х300 мм, не существует.

Метод фотосканирования СЭ с помощью засветки МОНИТОРОМ

В работах [5–8] описываются метод и устройство фотосканирования для диагностики эффективности СЭ. Данный метод уникален тем, что в качестве сканера активной области полупроводника применяется монитор персонального компьютера (ПК). Принцип представленной разработки заключается в создании на мониторе СП из одного или нескольких пикселей, которое перемещается по экрану. СЭ чувствительной поверхностью накладывается на экран монитора. Траектория движения СП представляет собой строку, после окончания которой пятно опускается ниже на величину высоты СП и снова повторяется. Фотоответное изображение записывается в прямоугольную матрицу. По заключению записи происходит визуализация полученных данных в виде двцветного изображения: монохром или цветная температура.

Метод фотосканирования разделяется на аппаратное и программное обеспечение (ПО).

АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ

В процессе фотосканирования СЭ получение данных ведется программируемым контроллером Arduino Uno R3. Это устройство является аналого-цифровым преобразователем с возможностью дополнительных программируемых функций.

Основные характеристики данного устройства:

- микроконтроллер ATmega328;
- напряжение питания 5 В;
- входное рекомендуемое напряжение 7–12 В;
- цифровой ввод-вывод 14 линий (6 поддерживают ШИМ);
- аналоговый ввод 8 линий;
- постоянный ток на линиях ввода-вывода 40 мА;
- постоянный ток на линии 3.3В 50 мА;
- flash-память 32 КВ;
- тактовая частота 16 МГц.

Arduino позволяет подключать функциональные модули. Была использована данная возможность для добавления к устройству ЖК-экрана MT-10S1. Экран применяется в качестве демонстрации получаемых данных об эффективности СЭ. Это позволяет на аппаратном уровне следить за процессом диагностики.

Звеном, находящимся между СЭ и контроллером Arduino, является селективный усилитель с синхродетектором на 11 Гц. Назначение данного устройства – минимизировать помехи (сигнал на иной от 11 Гц частоте), тем самым увеличить точность измерений.

Данное устройство настроено на мерцание светового пятна монитора с частотой 11 Гц. С такой же частотой снимается синхросигнал с порта компьютера, то есть контроллера Arduino. Амплитуда синхросигнала равна 5 В.

Устройство состоит из трех схематических блоков (рис. 1):

- I. усилитель предварительный;
- II. усилитель селективный;
- III. синхродетектор-выпрямитель.

На вход селективного усилителя подается прямоугольный сигнал фотоответа на частоте 11 Гц (рис. 2). Селективный усилитель выделяет из него основную синусоиду. Синхродетектор, представляющий собой интегратор, на выходе выделяет постоянную составляющую, пропорциональную фототоку засвеченной области.

ПО МЕТОДА ФОТОСКАНИРОВАНИЯ

Перемещение СП на мониторе управляется с помощью специального ПО. Оно представляет собой пользовательский интерфейс (рис. 3), в котором экспериментатор производит ввод настроек: количество СП в виде i -строк, j -столбцов; размер и цвет СП; позиционирование начала траектории СП в виде смещения от угла окна рабочей области засветки.

Имеется возможность запустить очередь экспериментов по диагностике, каждая из которых имеет идентичные настройки, где запуск последующей итерации не требует вмешательства пользователя. В данном случае выходные файлы сохраняются в одном местоположении, а к имени файла приписывается номер итерации. Это позволяет получать некоторую выборку данных об эффективности СЭ.

Интерфейс пользователя имеет текстовое поле, в котором возможно просмотреть текущие результаты диагностики. Эти выходные числовые данные хранятся в текстовом файле с расширением *.bat в виде прямо-

Рис. 2. Диаграммы выходных сигналов: а) на входе предварительного усилителя i_f , б) на выходе селективного усилителя u_{su} , в) на входе интегратора u_{sd} , г) на выходе синхронного детектора U_{cp}

угольной матрицы. Это позволяет производить математическую обработку данных с помощью математической САПР продукта MathCad. Осуществляется анализ матричной информации: минимизация ошибки измерения обнулением значений зоны нечувствительности; измерение локальных фототоков на уровне 1×10^{-8} А.

Рис. 1. Схема селективного усилителя на 11 Гц: I) усилитель предварительный, II) Усилитель селективный, III) Синхродетектор-выпрямитель

Рис. 3. Интерфейс экрана монитора: 1) область расположения СЭ, 2) область сканирования, 3) информационная область экрана монитора, 4) визуализация матрицы, 5) область отображения параметров

Визуализация значений эффективности СЭ в точках происходит в конце процесса сканирования. Изображение точечного рисунка отображается на панели интерфейса и сохраняется в формате *.jpg в конце цикла диагностики.

ПО было разработано на базе Microsoft Visual Studio на языке программирования С#. ПО может быть запущено на любом ПК, который работает на операционной системе Windows XP, Windows 7, 8 и 10.

ОТЛИЧИЕ ДАННОГО РЕШЕНИЯ ОТ АНАЛОГОВ

В аналогичных устройствах для засветки локальных областей применяется луч лазера, светодиода и т. п. Отличие разработанного метода в цифровом аналоге излучения пикселями монитора ПК. То есть преимущество в отсутствии механических частей (объемных оптических систем), где любое смещение СЭ приводит к существенному искажению считываемых данных. Разработанное решение является неподвижной плоской системой с четким расположением элементов излучения.

Монитор имеет возможность цифровой настройки цвета СП. В исследовании тонкопленочных СЭ большое значение имеет глубина проникновения. Например, красный, зеленый, синий цвета имеют различный коэффициент поглощения, что позволяет исследовать различную глубину полупроводниковой структуры.

Разработанное устройство фотосканирования позволяет сканировать пленочные СЭ с большой рабочей площадью (до формата листа А4). Это является значительным преимуществом перед описанными аналогами.

Возможность сканирования больших СЭ не уяляет точность диагностики элементов с малой рабочей площадью. Метод опробовался на элементах, основанных на перовските. Размеры данного элемента 30x30x3 мм (рис. 4). Для крепления к монитору создавался специальный контейнер с помощью трехмерного моделирования и дальнейшего прототипирования методом послойной заливки экструдированным расплавом (FDM) на 3D-принтере.

Рис. 4. СЭ на основе перовскита: а) область СЭ, б) контакт «-», в) контакт «+»

В перспективе планируется использовать OLED, QLED-экраны. Это позволит значительно снизить уровень темнового излучения монитора и повысить насыщенность цветов. Снижение темновой засветки увеличит точность диагностики в связи с повышением разницы величины фотоответа и темнового напряжения.

Предложенный метод фотосканирования имеет недостатки: визуальное перекрытие монитора в области засветки – корпусом СЭ. Это осложняет ввод местоположения области сканирования в ПО. В этом случае поиск области засветки СП осуществляется «на глаз»: вводятся первоначальные значения i -строк, j -столбцов, смещение от угла. Кнопка «Область» (рис. 3) засвечивает площадь, занимаемую совокупностью потенциальных СП. Далее происходит корректировка расположения корпуса СЭ относительно данной области или смещение зоны излучения.

Поиск завершится, когда область засветки монитора будет больше или равна рабочей области СЭ. В ситуации физического смещения СЭ требуется повторять алгоритм нахождения рабочей области.

АЛГОРИТМ ПОИСКА ОБЛАСТИ СКАНИРОВАНИЯ СЭ

Для устранения этого недостатка предлагается применить программно-математический алгоритм автоматизации поиска чувствительной области СЭ. Данная программа подразумевает применение значения фо-

тоответа диагностируемого элемента для отстранения нечувствительной области.

Алгоритм поиска чувствительной области (блок-схема на рисунке 5) состоит из трех основных подпрограмм: 1) поиск значения границы нечувствительности (Up); 2) цикл проведения засветки СЭ с помощью СП в виде строки или столбца, с дальнейшим сравнением данных фотоответа (U) и Up ; 3) поиск координат смещения от угла и количества строк (столбцов) засветки СП. Рассмотрим их подробнее.

1. Значение границы чувствительности. При запуске алгоритма программа берет значение параметров СП: цвет и размер в пикселях (px). Далее происходит расчет величины границы рабочего пространства ($i_{\max}, j_{\max}$) засветки монитора, который зависит напрямую от разрешения дисплея. К этому моменту СЭ присоединён к монитору, он подвергается засветке черного экрана монитора. Программа считывает полученное фотонапряжение и записывает его как темновое (Ut). Значение границы нечувствительности (Up) – это величина напряжения при излучении строки (столбца) СЭ, в которой происходит переход из нечувствительной области в чувствительную, рассчитывается по формуле (1):

$$Up \geq Ut * k, \quad (1)$$

где Up – граница зоны нечувствительности фотонапряжения в строке (столбце);

Рис. 5. Блок-схема алгоритма поиска чувствительной области для диагностики СЭ

U_t – темновое фотонапряжение;

k – коэффициент неэффективности, выведенный эмпирическим путем, равен величине 1.2.

2. Цикл засветки. Сравнение U и U_p . Величина данного цикла зависит от $i_{\max}, j_{\max}$ и габаритов СП. С верхней границы рабочего пространства происходит поочередная засветка строки за строкой и параллельная запись данных о фотоответе в виде напряжения $U(i)$. Эти данные записываются в программу в виде массива. По окончании засветки по строкам, СП меняет форму на столбец для получения фотоответа по столбцам $U(j)$.

3. Получение области чувствительности СЭ. По умолчанию программа считает, что вся рабочая область засветки монитора является чувствительной, а количество СП равно одному. После окончания цикла засветки происходит поиск и отсеивание строк (столбцов). В условиях, когда фотонапряжение (U) больше границы чувствительности (U_p), алгоритм переходит к следующему шагу цикла. В ситуации, когда $U < U_p$: проверяется, существует ли в ранних шагах цикла в сравнении $U > U_p$ значение истины. Если нет, то программа сдвигает область чувствительности на строку (столбец) ниже (правее) от текущего. В ином случае, количество СП будет равно текущему плюс один.

В конце алгоритма программа будет иметь координаты начала области чувствительности СЭ и количество i, j строк и столбцов засветки СП. Эти данные автоматически будут внесены в соответствующие поля для ввода. Для проведения диагностики потребуется провести остаточную настройку, например, ввод имени файла.

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА РАЗРАБОТАННОГО РЕШЕНИЯ

Существует ситуация физического смещения СЭ в плоскости относительно монитора в процессе или после окончания фотосканирования. Последствия приводят к потере корректной области сканирования СП. В этом случае потребуется заново проводить поиск зоны засветки. Разработанный алгоритм позволяет произвести поиск с минимальной потерей времени. Точность данного поиска позволяет повторить нахождение области с возможной ошибкой в ± 2 px к границам зоны нечувствительности (рис. 6). Расстояние смещения ΔS незначительно. Ошибка измерения и затраченное время не изменяется при большом (малом) значении ΔS .

Имеется ситуация, при которой присутствует некоторая зона полной потери эффективности СЭ. Она приводит к тому, что применение алгоритма поиска чувствительной области значительно повышает скорость диагностики. Причиной является сокращение зоны засветки СП относительно заявленной области, так как программа отсеивает нечувствительную зону.

Время, затраченное на выполнение алгоритма поиска чувствительной области, может быть рассчитано по формуле (2):

$$t = \left(\frac{Ws}{Wsp} + \frac{Hs}{Hsp} \right) * tsp. \quad (2)$$

где t – общее время поиска чувствительной области СЭ;
 Ws, Hs – ширина, высота общей зоны излучения монитора;

Wsp, Hsp – ширина, высота СП;

tsp – время на выполнение засветки одного СП, равное $\sim 2,77 * 10^{-2}$ с.

Ширина и высота общей зоны излучения зависят от разрешения дисплея. При неизменном мониторе, величина времени зависит напрямую от параметров СП. Как правило, данное время варьируется от 4 до 20 секунд для монитора, с разрешением 1680x1050 px. Время поиска области на порядок меньше времени процесса диагностики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритм поиска области сканирования СЭ для диагностики выполняет одновременно две функции:

1. устранение проблемы случайного перемещения;
2. уменьшение времени на поиск области сканирования.

В случае проколов или иных видов потери эффективности СЭ, алгоритм отсеивает области неэффективности, что повышает скорость диагностики. С повышением разницы между заявленной мощностью СЭ и реальной, отсеивается более значимая зона, ускоряя процесс диагностики.

Был проведен эксперимент, цель которого показать стабильность получения данных и величину времени поиска области сканирования. Были выбраны параметры СП: 2x2 px, 3x3 px, 4x4 px; цвет излучения – белый (код #FFFFFF. 255, 255, 255). Монитор ЖК, матрица TFT, разрешение – 1680x1050 px.

В первом ряде экспериментов происходила диагностика с помощью ручного поиска области засветки. Зона

Рис. 6. Схема, регистрирующая смещение СЭ, где ΔS – величина смещения в px

сканирования была найдена методом подбора. Во второй итерации экспериментов была диагностика с применением алгоритма поиска чувствительной области сканирования. Результаты диагностики данных экспериментов визуализированы и наглядно продемонстрированы на рисунке 7.

Общая область засветки монитора: 480x340 px – это значение, полученное из расчета разрешения дисплея монитора. То есть $Ws = 340$ px; $Hs = 480$ px. Время, затраченное на поиск автоматизированной области, рассчитано по формуле (2) и находится в таблице 1.

Таблица 1
Время, затраченное
на поиск области сканирования СЭ

Параметр СП: Ширина x Высота, px	Время на поиск чувствительной области, с
2x2	12
3x3	8
4x4	6

Для выявления значений имеется таблица усредненных данных о величине затраченного времени на диагностику двумя методами (табл. 2). Последним столбцом отображается значение разницы времени между методами – Δt .

Чувствительная область тестируемого СЭ равна ~ 55% (рис. 7). Разница площади зоны сканирования, найденная ручным методом и программным, относительно велика. В доказательство этому, можно заметить, что величина Δt (табл. 2) достигает значения времени процесса диагностики. Этот показатель означает ускорение процедуры диагностики тестируемого элемента в 2 и более раза.

Таблица 2
Средние значения затрат времени
на процесс диагностики

Размер СП, px	Диагностика ручным вво- дом области, t_1 , с	Диагностика автоматизиро- ванным поиском области, t_2 , с	Разница времени, Δt , с
2x2	137	52	85
3x3	56	23	33
4x4	34	17	17

Из рисунка 7 видно, что точность отображения зоны сканирования выше для программного поиска области. Выводы:

1. Поиск области сканирования может применяться как программный метод коррекции повторных результатов измерения. Повторяемость эксперимента позволит получить идентичные форму и параметры эффективности СЭ.

Рис. 7. Отображение экспериментальной матрицы в фоточувствительности СЭ: I) ручной ввод области, II) программный поиск области; размер СП равен: а) 2x2 px, б) 3x3 px, в) 4x4 px

2. Применение алгоритма позволяет сократить время поиска чувствительной области по сравнению с методом ручного подбора зоны сканирования.

3. Метод автоматизированного поиска повышает скорость диагностики в случае потери эффективности. Коэффициент ускорения зависит от величины падения работоспособности СЭ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.с. 630983 А СССР, МПК G01 N 21/88 ; G01 N 21/27. Устройство для выявления дефектов поверхности полупроводниковых приборов / Амазаспан В.Н., Саркисян В.С., Горюнов Н.Н. (СССР). 2455479/18-25 ; заявл. 23.02.77 ; опубли. 23.03.85. Бюл. № 11. 3 с.
2. А.с. 813202 СССР, МПК G01 N 21/27. Устройство дефектоскопического контроля планарных структур / Розиньков Н.С., Лонской И.И., Дубицкий Л.Г., Горюнов Н.Н. (СССР). 2639929/18-25 ; заявл. 07.07.78 ; опубли. 15.03.81. Бюл. № 10. 4 с.
3. А.с. 594467 СССР, МПК G01 R 31/26 ; G01 N 21/00. Устройство для оптического контроля интегральных схем / Лонской И.И., Горюнов Н.Н., Каверзнев В.А. (СССР). 2388207/18-25 ; заявл. 21.07.78 ; опубли. 25.02.78. Бюл № 7. 2 с.
4. Исследование качества полупроводниковых структур методом фотоответного изображения / В.Г. Григорьян, Н.Н. Горюнов, Ф.И. Маняхин, В.А. Бессонов, А.С. Кодак // Технологии электронной промышленности. 2005. № 1. С. 72–75.
5. Маняхин Ф.И., Левченко Р.В., Мокрецова Л.О. Метод фотоответного изображения для диагностики локальной эффективности солнечных батарей / Тр. 30-й Междунар. конф. по компьютерной графике и ма-

шинному зрению / Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН. СПб., 2020. Т. 1, № 30. С. 8–14.

6. Левченко Р.В., Маняхин Ф.И. Метод фотосканирования диагностики солнечных элементов // *Colloquium-Journal*. Варшава, 2018. Т. 1. № 13 (24). С. 50–53.

7. Маняхин Ф.И., Левченко Р.В., Мокрецова Л.О. Фотосканирующее устройство для дифференциального экспресс-контроля качества солнечных элементов // *Нейрокомпьютеры и их применение* : XVIII Всерос. науч. конф. Тез. докл. 2020. С. 242–243.

8. Левченко Р.В., Маняхин Ф.И., Мокрецова Л.О. Диагностика солнечных элементов методом фотосканирования // Тез. докл. XVII Всерос. науч. Конф. «Нейрокомпьютеры и их применение». М., 2019. С. 218-А.

REFERENCES

1. USSR Inventor's Certificate 630983 A, Int.Cl.: G01 N 21/88, G01 N 21/27. *Ustroistvo dlia vyavleniia defektov poverkhnosti poluprovodnikovyykh priborov* [Surface Damage Detector for Semiconductor Devices]. Inventors: Amazaspyan V.N., Sarkisyan V.S., Goryunov N.N. Application: no. 2455479/18-25. Date of filing 23.02.77. Date of publication: March 23, 1985. Bull. no. 11. 3 p.
2. USSR Inventor's Certificate 813202, Int.Cl. G01 N 21/27. *Ustroistvo defektoskopicheskogo kontrolya planarnyykh struktur* [An Instrument for Flaw Detection and Inspection of Planar Constructions]. Inventors: Rozinkov N.S., Lonskoy I.I., Dubitskiy L.G., Goryunov N.N. Application: no. 2639929/18-25. Date of filing: July 07, 1978. Date of publication: March 15, 1981. Bull. no. 10. 4 p.
3. USSR Inventor's Certificate 594467, Int.Cl. G01 R 31/26, G01 N 21/00. *Ustroistvo dlia opticheskogo kontrolya integralnykh skhem* [An Instrument for Optical Inspection of Integrated Circuits]. Inventors: Lonskoy I.I., Goryunov N.N., Kaverznev V.A. Application: 2388207/18-25. Date of filing: July 21, 1978. Date of publication: February 25, 1978. Bull. no. 7. 2 p.
4. Grigorian V.G., Goriunov N.N., Maniakhin F.I., Bessonov V.A., Kodak A.S. *Issledovanie kachestva poluprovodnikovyykh struktur metodom fotootvetnogo izobrazheniia* [The Researching of Semiconductor Structures Quality by the Photo-Answering Image Method]. *Tekhnologii v elektronnoy promyshlennosti* [Technologies in Electronic Industry], 2005, no. 1, pp. 72–75.
5. Maniakhin F.I., Levchenko R.V., Mokretsova L.O. *Metod fotootvetnogo izobrazheniia dlia diagnostiki lokalnoi effektivnosti solnechnyykh batarei* [The Photo-Answering Image Method for the Local Efficiency Diagnosis of Solar Cells]. *Tr. 30-i Mezhdunar. konf. po kompiuternoi grafike i mashinnomu zreniiu* [Proc. of the 30th Conf. on Computer Graphics and Machine Vision]. St. Petersburg, M.V. Keldysha Institute of Applied Mathematics of RAN Publ., 2020, vol. 1, no. 30, pp. 8–14.
6. Levchenko R.V., Maniakhin F.I. *Metod fotoskanirovaniia diagnostiki solnechnyykh elementov* [Photoscanning Method of Diagnostics of Solar Elements]. *Colloquium-Journal*, Varshava, 2018, vol. 1, no. 13 (24), pp. 50–53.
7. Maniakhin F.I., Levchenko R.V., Mokretsova L.O. *Fotoskaniruiushchee ustroistvo dlia differentsialnogo ekspress-kontrolya kachestva solnechnyykh elementov* [Photoscanner for Differential Express-Testing]. *Neirokompiutery i ikh primenenie. 18 Vseros. nauch. konf. Tez. dokl.* [Proc. of 18th Sci. Conf. on Neurocomputers and Application]. 2020, pp. 242–243.
8. Levchenko R.V., Maniakhin F.I., Mokretsova L.O. *Diagnostika solnechnyykh elementov metodom fotoskanirovaniia* [Solar Cell Diagnosis by Photoscanning Techniques]. *Tez. dokl. XVII Vseros. nauch. Konf. Neirokompiutery i ikh primenenie* [Proc. of 17th Russ. Sci. Conf. on Neurocomputers and Application]. Moscow, 2019, pp. 218-A.