ЛАБОРАТОРНАЯ

ТЕХНИКА

УДК 621.383

АППАРАТНО-ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР МЕТОДОМ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ОТКЛИКА С ЛОКАЛЬНЫМ ФОТОВОЗБУЖДЕНИЕМ

©2027 г. А. А. Казанков[a,b,*], В.А. Сергеев[a,], О. А. Радаев[a,***], И. В. Фролов[a]**

[a] *Ульяновский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук*

Россия, 432071, Ульяновск, ул. Гончарова, 48/2

[b] *Ульяновский государственный технический университет*

Россия, 432027, Ульяновск, ул. Северный Венец, 32

**E-mail: kazanaa1992@mail.ru*
***E-mail: sva@ulstu.ru*
****E-mail: info@ulireran.ru*

Поступила в редакцию 06.07.2026

После доработки 10.09.2026

Принята к публикации 19.10.2026

Приведены описание и характеристики разработанного аппаратно-программного комплекса (АПК) для диагностики полупроводниковых структур сканирующей фототоковой микроскопии. АПК предназначен для измерения профилей распределения фотоэлектрического отклика по площади исследуемой структуры путем сканирования лазерным лучом диаметром от 16 до 3000 мкм и длиной волны излучения 405, 460 или 520 нм и регистрации фотоотклика (фотоэдс или фототока) исследуемой структуры с минимальным шагом сканирования 10 мкм. В отличие от известных российских и зарубежных аналогов, АПК за счет приложения обратного смещения к объекту контроля и возможности регулировки диаметра лазерного луча в широких пределах позволяет измерять параметры фотоотклика многоэлементных полупроводниковых приборов, в том числе солнечных модулей и светодиодных матриц. Работа АПК апробирована на примере измерения профилей распределения фотоэлектрического отклика светодиодных матриц и многоэлементных фотодиодов. АПК может быть использован для неразрушающего контроля качества многоэлементных полупроводниковых структур.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, диагностика, фотовозбуждение, сканирование, фотоотклик, полупроводниковая структура, многоэлементная структура, неразрушающий контроль

1. ВВЕДЕНИЕ

Метод сканирующей фототоковой микроскопии используется для пространственного картирования фотоотклика (фототока или фотоэдс) полупроводниковых структур и полупроводниковых приборов (ППП). Метод основан на сканировании поверхности образца

сфокусированным лазерным излучением с энергией фотонов, превышающей ширину запрещенной зоны полупроводника. В результате локального поглощения света происходит генерация электронно-дырочных пар, которые в области пространственного заряда *p*–*n*-перехода разделяются встроенным электрическим полем, создавая фотоэдс (режим холостого хода) или фототок во внешней цепи (режим короткого замыкания) [1–5].

Для растрового (построчного) сканирования сфокусированного пятна лазерного излучения используются либо оптическая система зеркал для отклонения луча, либо столики для перемещения образца. Пространственное разрешение метода определяется дифракционным пределом Аббе:

$$d=\lambda/2N_{\mathrm{A}},$$

где λ – длина волны света, N_{A} – числовая апертура объектива. Для видимого диапазона света предел *d* составляет порядка 250 нм [1].

Благодаря высокой разрешающей способности, информативности и относительной простоте реализации метод сканирующей фототоковой микроскопии широко используется в практике физического эксперимента для исследований свойств и характеристик различных объектов: одномерных (нанотрубки, нановолокна) [1, 2] и двумерных (графен, металлические и полуметаллические 2D-материалы) материалов [1], дефектов (азотно-вакансионные центры) в монокристаллической подложке алмаза [3], дефектов однокристальных светоизлучающих и фотоприемных структур на основе различных полупроводниковых материалов [4, 5]. Для ППП регистрация фототока или фотоэдс в зависимости от координат лазерного пятна позволяет построить двумерную диаграмму (карту) распределения фотоэлектрического отклика по площади образца. Участки с пониженным откликом соответствуют областям с дефектами (например, дислокациями, примесными кластерами, нарушениями в *p*–*n*-переходе) [6, 7].

Варианты модификации базового метода сканирующей фототоковой микроскопии применительно к наноструктурам представлены в обзорной статье [8]. Стандартная сканирующая фототоковая микроскопия в дальней зоне предполагает использование микроскопа с объективом, имеющим большую числовую апертуру, для фокусировки лазера в дифракционно-ограниченное пятно (обычно размером около 300–500 нм), что позволяет картировать фотоотклик, исследовать процессы диффузии носителей заряда, внутренние электрические поля и неоднородности легирования.

Для повышения чувствительности метода сканирующей фототоковой микроскопии могут применяться модуляция (механическая или электрическая) лазерного луча и выделение сигнала фотоотклика синхронным детектированием. Это позволяет измерять очень слабые

сигналы (вплоть до пикоампер) на фоне шумов. Для повышения разрешающей способности и преодоления дифракционного предела используется сканирующая ближнепольная оптическая микроскопия. Лазерное излучение подается через сужающееся оптическое волокно или металлический зонд, что позволяет достичь нанометрового пространственного разрешения. Этот метод применяется, например, для изучения локального усиления фототока в наноструктурированных покрытиях солнечных элементов [6, 7].

Метод сканирующей фототоковой микроскопии применяется для диагностики дефектов полупроводниковых структур и ППП. Известна установка для сканирующей фотогальванической микроскопии (Scanning Photovoltage Microscopy) [9], предназначенная для исследования пространственного распределения фотоэлектрического отклика и визуализации локальных дефектов в полупроводниковых структурах с высоким пространственным разрешением. В качестве источника возбуждения используется непрерывный лазер с длиной волны 647 нм и оптической мощностью 200 мкВт. Лазерное излучение фокусируется на поверхность образца объективом с 50-кратным увеличением, формируя пятно площадью около 0.7 мкм² (эквивалентный диаметр составляет примерно 0.94 мкм), что обеспечивает пространственное разрешение порядка 1 мкм. Образец размещается на двухкоординатном *XY*-нанопозиционере, осуществляющем последовательное сканирование поверхности относительно неподвижного лазерного пятна. Регистрация фототока и фотоэдс осуществляется методом синхронного детектирования, а анализ пространственного распределения фотогальванического отклика позволяет выявлять области с нарушенной симметрией кристаллической структуры, локальными дефектами материала.

В работе [10] представлена установка фотоэлектрической интерференционной спектроскопии, использующая импульсное лазерное фотовозбуждение для исследования локализованных состояний, примесных уровней и дефектов в полупроводниковых материалах. Оптическая схема построена на базе интерферометра с использованием ультракоротких лазерных импульсов, что обеспечивает высокую энергетическую разрешающую способность и возможность исследования динамики процессов генерации и переноса носителей заряда. Для повышения точности измерений реализована стабилизация мощности возбуждающего излучения в течение каждого импульса, а регистрация фотоотклика осуществляется методом синхронного детектирования.

В качестве примера применения подобных установок на рис. 1 показана карта пространственного распределения фотоэлектрического отклика планарного органо-неорганического перовскитного солнечного элемента [7]. Полученная карта позволяет локализовать участки с различными уровнями фототока и оценить неоднородность

фотоэлектрических характеристик по площади исследуемого прибора, а также выявлять области деградации интерфейсов перовскитного солнечного элемента.

Рис. 1. Карта пространственного распределения фотоэлектрического отклика...

Общим недостатком рассмотренных измерительных установок является применение в большинстве из них высокоточных *XYZ*-нанопозиционеров с ограниченным диапазоном перемещений, который для используемых систем составляет от 100 до 500 мкм по каждой координате (реже до 1 мм). Несмотря на высокую точность позиционирования, такие системы ориентированы преимущественно на исследование отдельных микро- и наноструктур, они не позволяют выполнять сканирование образцов больших размеров. Вследствие этого область исследования, как правило, ограничивается лишь небольшим фрагментом поверхности полупроводниковой структуры.

Анализ литературных источников, включая обзорные статьи [1, 8, 11] с описанием развития экспериментальных установок и аппаратно-программных комплексов (АПК) различных поколений, также показал отсутствие сведений о применении метода сканирующей фототоковой микроскопии для диагностики многоэлементных ППП Современные многоэлементные ППП, например светодиодные матрицы, могут иметь габаритные размеры до 10×10 мм^2 и более и содержать десятки последовательно или последовательно-параллельно соединенных кристаллов. Ограниченный диапазон перемещений координатной системы большинства известных установок делает невозможным исследование всей площади таких изделий и построение полной карты пространственного распределения фотоэлектрического отклика.

Кроме того, в рассмотренных работах отсутствуют сведения о возможности регулирования диаметра лазерного пятна в широких пределах. Отсутствие регулировки ограничивает функциональные возможности измерительных установок при исследовании многоэлементных структур, поскольку для решения различных диагностических задач требуется как локальное фотовозбуждение отдельных областей кристалла с высоким пространственным разрешением, так и возбуждение кристалла целиком для оценки его интегральных фотоэлектрических характеристик с целью определения межкристального разброса.

Цель исследования заключалась в разработке АПК, реализующего методы сканирующей фототоковой микроскопии, предназначенного для диагностики как одно-, так и многокристальных ППП с возможностью приложения обратного электрического смещения, и его апробации на светодиодных матрицах и фотоэлементах.

2. ОПИСАНИЕ АППАРАТНОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСА

Структурная схема разработанного АПК представлена на рис. 2. Основные технические характеристики приведены в табл. 1. Центральным элементом АПК является контроллер Arduino DUE. Микроконтроллер выполняет функции координации работы всех узлов АПК и обеспечивает синхронизацию процессов позиционирования, фотовозбуждения и регистрации фотоэлектрического отклика. С помощью контроллера осуществляется задание начальных условий эксперимента, включая управление положением координатного позиционера и параметрами сканирования поверхности исследуемого объекта.

Таблица 1. Основные технические характеристики АПК

Наименование характеристики	Значения
Оптические характеристики	
Длины волн оптического возбуждения, нм	405; 465; 530
Мощность оптического излучения, мВт	≤ 30
Диаметр области засветки лазерным излучением, мм	0. 016–3
Блок задания электрического режима	
Диапазоны задания обратных напряжений, В	5–50 50–100 100–200 200–400
Шаг перестройки обратного напряжения, мВ	7.3; 25; 50; 100
Регистрирующее устройство	
Диапазон измерения фототока, мА	10^{-6}–1
Диапазон измерения фотоэдс, В	10^{-8} – 10
Значения скоростей сканирования, измерений/с	0.5; 1; 2
Позиционирующее устройство №1	
Перемещение образца в плоскости *XY* , мм	0–25
Перемещение образца по высоте установки *Z*, мм	0–12.5
Минимальный шаг перемещения (сканирования) по осям, мм	0.01
Угловая ориентация образца	0–360°
Позиционирующее устройство №2	
Перемещение образца в плоскости *X*, мм	0–180
Перемещение образца в плоскости *Y*, мм	0–300
Перемещение образца по высоте установки *Z* ,мм	0–60
Минимальный шаг перемещения (сканирования) по осям, мм	0.1

Рис. 2. Структурная схема аппаратной части разработанного АПК...

Arduino DUE формирует управляющие сигналы для источника питания лазерного диода, блока задания режима измерений и драйверов шаговых двигателей системы позиционирования. Это обеспечивает автоматизированное перемещение исследуемого образца относительно лазерного пятна по заданной траектории сканирования, включая режим построчного

перемещения типа “змейка”. Кроме функций управления, контроллер осуществляет прием и предварительную обработку результатов измерений, а также организует обмен данными с персональным компьютером посредством интерфейса USB. Передача экспериментальных данных в режиме реального времени позволяет выполнять оперативную визуализацию и обработку результатов измерений программными средствами управляющего персонального компьютера (ПК). Программное обеспечение контроллера разработано в среде Arduino IDE. В программном коде реализованы функции управления шаговыми двигателями, алгоритмы позиционирования исследуемого объекта, процедуры синхронизации измерений и обмена данными с управляющим ПК.

Одним из ключевых узлов АПК является оптическая система формирования и контроля параметров возбуждающего лазерного пучка, подробная схема которой представлена на рис. 3. Для наглядности на схеме возбуждающее лазерное излучение показано сплошными линиями со стрелками, указывающими направление его распространения, а излучение, отраженное от поверхности исследуемого образца, – штриховыми линиями.

Рис. 3. Структурная схема оптической системы разработанного АПК.

Оптическая мощность излучения лазерного диода стабилизируется с использованием встроенного фотодиода. Для повышения стабильности параметров излучения и снижения влияния температурных изменений дополнительно применяется термостатирование лазерного диода. Излучение лазерного диода проходит через апертурную диафрагму, предназначенную для ограничения поперечного размера пучка и формирования требуемых пространственных параметров излучения. Применение диафрагмы обусловлено существенным различием угловой расходимости излучения лазерного диода в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. После прохождения апертурной диафрагмы лазерное излучение поступает на светоделитель, после которого посредством объектива фокусируется на поверхности исследуемого образца. Сформированное лазерное пятно обеспечивает локальное фотовозбуждение исследуемой полупроводниковой структуры, в результате которого возникает фотоэлектрический отклик, регистрируемый измерительной системой АПК.

Отраженное от поверхности образца лазерное излучение используется для контроля пространственных параметров сформированной области засветки. После отражения от поверхности образца излучение возвращается к светоделителю и направляется в измерительный канал, где посредством дополнительной фокусирующей линзы формируется его изображение на фоточувствительной ПЗС-матрице SC5239S с разрешением 2560 × 1440 пикселей. Получаемое изображение содержит информацию о пространственном распределении интенсивности отраженного излучения, оно позволяет определять положение, форму и эффективный размер области засветки, а также контролировать ее расположение относительно элементов кристалла

исследуемого ППП. В составе АПК используется модуль IP-видеокамеры, включающий фоточувствительную матрицу SC5239S и контроллер GK7205. Передача изображения на ПК осуществляется по интерфейсу Ethernet. По результатам обработки изображения определяется текущий размер области засветки, а также контролируется его изменение в процессе сканирования поверхности исследуемого образца.

Отличительной особенностью разработанного АПК по сравнению с аналогичными установками [1, 4, 5, 11, 12] является возможность перестройки диаметра области засветки на поверхности исследуемого образца в широком диапазоне – от 16 мкм до 3 мм. Такой диапазон позволяет исследовать как локальные области кристаллов ППП (в том числе в составе многокристальных систем), так и области, размеры которых сопоставимы с размерами отдельных кристаллов или их групп. При формировании малых областей засветки их пространственные параметры могут контролироваться по изображению отраженного лазерного излучения, регистрируемому фоточувствительной матрицей. При увеличении диаметра области засветки ее размеры определяются путем сопоставления с характерными элементами структуры исследуемого образца, геометрические размеры которых известны или могут быть предварительно определены. В частности, в качестве масштабного ориентира могут использоваться геометрические размеры отдельных кристаллов полупроводниковой матрицы.

Полученная информация используется также для контроля положения фокальной плоскости оптической системы. При изменении расстояния между объективом и поверхностью образца из-за наличия рельефа исследуемой структуры или перемещения образца относительно оптической системы происходит компенсация расфокусировки путем изменения положения исследуемого образца вдоль оси *Z*.

Для экспериментального определения пространственного распределения интенсивности вместо исследуемого образца на координатном позиционере устанавливалась ПЗС-матрица SC223A с разрешением 1920×1080 пикселей и расстоянием между центрами соседних пикселей 2.9 мкм. Для предотвращения насыщения фоточувствительных элементов матрицы при регистрации лазерного излучения на ее поверхности размещался нейтральный светофильтр.

После установки матрицы осуществлялась ее засветка лазерным излучением с различными значениями диаметра сформированного пятна. Полученные распределения интенсивности использовались для оценки пространственных параметров области засветки и проверки возможности формирования пятна требуемого диаметра в заданном диапазоне. Диаметр области засветки определялся по уровню половины максимальной интенсивности зарегистрированного излучения (0.5 от максимального значения). На рис. 4 представлены

нормированные профили пространственного распределения интенсивности областей засветки при разных диаметрах лазерного пятна.

Рис. 4. Нормированные профили пространственного распределения интенсивности областей засветки...

Возможность регулировки диаметра пятна лазерного излучения позволяет реализовать два режима работы комплекса: режим интегральной засветки отдельных кристаллов и режим локального сканирования с высоким пространственным разрешением. Первый режим работы обеспечивает возможность оценки разброса интегральных фотоэлектрических характеристик между элементами многокристальных ППП, а второй – возможность исследования пространственного распределения фотоотклика в пределах отдельных кристаллов.

Для позиционирования исследуемых образцов в составе АПК предусмотрены два координатных устройства с микрометрическими винтами. Позиционирующее устройство № 1 предназначено для работы с компактными светодиодными матрицами с активной областью размером до 25×25 мм^2, оно оснащено поворотным столиком, позволяющим изменять ориентацию образца для обеспечения его выравнивания относительно осей перемещения. Позиционирующее устройство № 2 используется для исследования крупногабаритных матриц с активной областью размером до 300×180 мм^2. Оба устройства обеспечивают точное перемещение исследуемой матрицы, закрепленной в контактном устройстве, в процессе сканирования.

Дополнительная возможность исследования многоэлементных ППП достигается за счет реализованной в АПК функции подачи обратного смещения на исследуемый образец. Электрическая часть комплекса включает блок задания режима, предназначенный для установки и стабилизации обратного напряжения, подаваемого на исследуемую структуру.

При исследовании многоэлементных ППП, в частности светодиодных матриц с последовательным соединением кристаллов, существенное значение приобретает выбор режима электрического смещения исследуемого объекта. Для повышения чувствительности метода фотоэлектрического отклика с локальным фотовозбуждением к локальным неоднородностям *p*–*n*-переходов и активной области кристаллов исследования проводятся при приложении обратного напряжения. В связи с этим в составе АПК разработан блок задания режима обратного смещения. К блоку предъявляется ряд требований. Во-первых, он должен обеспечивать формирование обратного напряжения, достаточного для создания необходимой ширины области пространственного заряда во всех последовательно соединенных кристаллах исследуемой матрицы. Во-вторых, выходное напряжение должно иметь высокую стабильность, поскольку нестабильность режима смещения приводит к изменению регистрируемого фотоэлектрического отклика и уменьшению повторяемости результатов измерений.

Особое внимание при разработке блока уделено обеспечению безопасного режима работы исследуемых структур. Известно, что локальные дефекты *p*–*n*-переходов способны инициировать развитие микроплазменного пробоя, который при дальнейшем увеличении обратного тока может перейти в тепловой пробой. Поэтому блок задания режима содержит узел ограничения обратного тока, исключающий повреждение исследуемого образца в процессе диагностики. Функциональная схема блока задания режима представлена на рис. 5. Основу цифровой части экспериментальной установки составляет контроллер Arduino Nano, обеспечивающий считывание установленных значений обратного напряжения с основного контроллера АПК (Arduino Due), преобразование их в стимулирующие воздействия (напряжение) на тестируемый ППП, измерение отклика на тестовые воздействия в виде обратного тока, оцифровку данных и передачу их обратно на основной контроллер. Поддержание режима ППП реализовано по схеме параллельного регулятора напряжения. Параллельный регулятор напряжения выполнен на транзисторе VT_1 с применением усилителя ошибки DA_1. Цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) преобразует цифровые сигналы микроконтроллера в аналоговый управляющий сигнал на усилитель ошибки, на основании которого осуществляется задание обратного напряжения на исследуемом ППП.

Рис. 5. Функциональная схема блока задания режима...

Параллельный регулятор напряжения получает напряжение $U_{\text{пит}}$ от импульсного источника питания, который выдает следующие дискретные значения выводных напряжений: 50, 100, 200, 400 В. Максимальная величина обратного тока задается переключателем S_1, позволяющим выбрать безопасное ограничение уровня тока в зависимости от исследуемой структуры. Для контроля величины выходного обратного тока через исследуемый ППП используется высокоточный резистор-шунт R_7. Аналого-цифровой преобразователь (АЦП) осуществляет преобразование аналоговых сигналов (обратное напряжение и напряжение, пропорциональное обратному току) в цифровые для дальнейшей обработки микроконтроллером. Источник опорного напряжения, выполненный на микросхеме REF198, формирует фиксированное напряжение величиной 4096 мВ с высокой точностью поддержания ± 2 мВ, необходимое для работы ЦАП и АЦП.

Регистрация фотоэлектрического отклика осуществляется в режиме холостого хода (измерение фотоэдс) или в режиме короткого замыкания (измерение фототока). При работе с обратным смещением исследуемой структуры используется режим измерения фототока.

В качестве регистрирующего устройства используется цифровой мультиметр RIGOL DM3058E, обеспечивающий точное измерение фотоотклика от исследуемой светодиодной матрицы. Передача измеренных данных к основному управляющему контроллеру

осуществляется по интерфейсу RS-232, что позволяет реализовать централизованный автоматизированный сбор и обработку экспериментальной измерительной информации.

3. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОЙ ЧАСТИ КОМПЛЕКСА

Программное обеспечение (ПО) АПК обеспечивает управление процессом измерения, сбор, обработку и визуализацию экспериментальных данных. Макрос сбора данных разработан на языке программирования высокого уровня VBA Visual Basic for Applications. Выбор данного инструмента обусловлен его доступностью, простотой реализации пользовательского интерфейса, а также удобством организации обмена данными с внешними устройствами, в частности с микроконтроллером Arduino DUE. Использование Microsoft Excel в качестве основы ПО АПК позволяет реализовать интуитивно понятный пользовательский интерфейс, упростить процедуру задания параметров эксперимента и обеспечить высокую наглядность представления результатов. Существенным преимуществом является наличие встроенных инструментов для обработки данных, построения графических зависимостей и последующего анализа результатов без необходимости привлечения специализированных программных пакетов или углубленных знаний в области программирования.

Работа с АПК осуществляется следующим образом. На ПК запускается ПО сбора данных, после чего исследуемая светодиодная матрица закрепляется на позиционирующем устройстве. Пользователь задает начальные условия эксперимента (параметры сканирования, режим измерения, диапазоны перемещения и др.) через соответствующие элементы интерфейса. После задания параметров запускается процесс сканирования поверхности образца. В ходе измерений регистрируемые значения фотоэлектрического отклика поступают в оперативную память ПК и автоматически записываются в соответствующие ячейки электронной таблицы. На основе получаемых данных в реальном времени формируются графики распределения фотоотклика, что обеспечивает оперативный визуальный контроль хода эксперимента и позволяет своевременно выявлять аномалии измерений. По завершении измерительного цикла пользователю предоставляется возможность сохранения результатов в формате Microsoft Excel. Это обеспечивает удобство хранения данных, их последующую обработку, а также расчет параметров исследуемого объекта с использованием встроенных средств анализа. Таким образом, разработанное ПО обеспечивает автоматизацию измерений, повышение воспроизводимости результатов и удобство работы с экспериментальными данными.

4. ОПИСАНИЕ МЕТОДИКИ ИЗМЕРЕНИЙ

Методика измерений заключается в следующем. Перед началом измерений исследуемый объект закрепляется в специально разработанном контактном устройстве, установленном на

координатном позиционере. Конструкция контактного устройства обеспечивает надежную фиксацию образца, электрическое подключение его выводов и возможность быстрой замены. При необходимости угловое положение образца корректируется с помощью поворотного столика. На ПК выполняется инициализация связи с микроконтроллером Arduino DUE по интерфейсу USB. На следующем этапе пользователь задает параметры эксперимента: режим измерения, величину смещения, размеры области сканирования, шаг перемещения координатной системы, параметры фотовозбуждения и режим регистрации фотоэлектрического отклика. В зависимости от условий эксперимента измерения могут выполняться в режиме регистрации фотоэдс либо фототока.

После ввода параметров проводятся подвод системы позиционирования в начальную точку и настройка диаметра лазерного пятна. Контроль размеров области фотовозбуждения осуществляется по изображению, формируемому на ПЗС-матрице системы визуализации. При необходимости выполняются дополнительная фокусировка оптической системы и корректировка положения исследуемого образца.

При работе АПК в первом режиме (режим интегральной засветки кристаллов) вычисляются координаты центров кристаллов, которые записываются в память контроллера. Далее осуществляется последовательный проход пятна возбуждения между центрами кристаллов, предварительно на каждом кристалле выполняются фокусировка и контроль диаметра пятна, после чего выполняется измерение фототока.

При работе АПК во втором режиме (режим локального сканирования с высоким пространственным разрешением) после завершения настройки контроллер на основании введенных шага и области сканирования формирует управляющие сигналы для драйверов шаговых двигателей системы позиционирования и источника питания лазерного диода. Сканирование поверхности исследуемой структуры выполняется автоматически по траектории типа “змейка”, обеспечивающей последовательное покрытие всей исследуемой области при минимизации времени холостых перемещений. Измеренные значения фототока или фотоэдс передаются по интерфейсу RS-232 в микроконтроллер Arduino DUE, после чего отправляются на ПК для последующей обработки. ПО выполняет запись результатов измерений в электронную таблицу, визуализацию экспериментальных данных и построение карт пространственного распределения фотоэлектрического отклика.

После завершения сканирования происходит сохранение результатов измерений, построенных графиков и распределений фотоотклика. Полученные данные используются для последующего анализа неоднородностей параметров исследуемой структуры, выявления дефектных областей и оценки степени деградации ППП.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Апробация разработанного АПК выполнена на серийно выпускаемых многоэлементных светодиодных и фотодиодных структурах различных типов, различающихся количеством и конфигурацией кристаллов. В частности, исследованы светодиодные матрицы типа ILO-01FF5-13NW-EC211 (DURIS S 8, Intelligent LED Solutions), содержащие десять последовательно соединенных кристаллов, а также матрицы типа CREE XHP70, включающие четыре кристалла с последовательным соединением.

Выбор указанных объектов обусловлен их широким применением и различиями в архитектуре, что позволяет оценить возможности АПК при диагностике структур с различными числом элементов и плотностью их компоновки.

Экспериментальные исследования проводились во втором режиме работы АПК при локальном фотовозбуждении с минимальным размером пятна, а также в режиме поочередной засветки кристаллов матрицы целиком с фиксацией электрического отклика (фототока). В качестве примера на рис. 6 показана диаграмма распределения фотоэлектрического отклика светодиодной матрицы типа ILO-01FF5-13NW-EC211 при длине волны возбуждающего излучения 405 нм в режиме измерения фототока при обратном смещении величиной 70 В.

Рис. 6. Профиль распределения фотоэлектрического отклика по поверхности светодиодной матрицы...

С целью апробации первого режима АПК проведены измерения фототока и фотоэдс на образце светодиодной матрицы ILO-01FF5-13NW-EC211 при длине волны возбуждающего излучения 405 нм каждого из кристаллов целиком (диаметр пятна оптического излучения равен диагонали кристалла матрицы). Измерения проводились без подачи напряжения обратного смещения. Результаты представлены в виде гистограммы на рис. 7. Определено, что уровень фотоэлектрического отклика неоднородный в пределах кристаллов матрицы, а различие средних значений уровня фотоотклика между кристаллами матрицы составляет до 40%.

Рис. 7. Гистограмма распределения фотоэлектрического отклика при последовательном фотовозбуждении кристаллов...

С помощью разработанного АПК также выполнено исследование неоднородностей фотоэлектрических параметров и разброса чувствительности между элементами структуры четырехквадрантного фотодиода ФДК-142-01. При измерениях катоды всех четырех секций фотодиода были соединены параллельно. Для уменьшения влияния рассеяния лазерного излучения при сканировании защитное стекло фотодиода было демонтировано. На рис. 8 приведена карта распределения фототока по поверхности кристалла фотодиода ФДК-142-01 при отсутствии внешнего напряжения смещения ($U_{см} = 0$). Из полученных результатов следует, что увеличение фототока наблюдается в промежуточных областях между чувствительными

элементами фотодиода (области *1–4*). Наибольшее значение фототока, достигающее 4.67 мкА, зафиксировано в центральной части кристалла (область *5*). По периметру кристалла расположено охранное кольцо (область *6*), в котором при воздействии лазерного излучения также наблюдается повышение фотоэлектрического отклика. Максимальное значение фототока в данной области составляет 4.48 мкА. В пределах каждой чувствительной области квадрантного фотодиода (области *1–4*) отмечается снижение чувствительности в центральной части соответствующего квадранта, проявляющееся в уменьшении величины регистрируемого фототока.

Рис. 8. Профиль распределения фотоэлектрического отклика фотодиода...

Для подтверждения диагностических возможностей метода и представленной установки у светодиодных матриц ILO-01FF5-13NW-EC211 измерены и аппроксимированы ватт-амперные характеристики кристаллов по методике и с использованием средств измерений, представленных в работе [13, 14]. Для светодиодных матриц типа ILO-01FF5-13NW-EC211 установлено наличие корреляции между параметром q [14] аппроксимирующей ватт-амперную характеристику кристаллов функции, обратно пропорциональным квадратному корню из концентрации структурных дефектов кристаллов светодиодной матрицы, и величиной фотоотклика (коэффициент корреляции Пирсона от –0.45 до –0.75). Это свидетельствует о том, что уменьшение значения параметра q, связанное с увеличением влияния дефектных состояний и рекомбинационных процессов в структуре, сопровождается ростом регистрируемого фототока и фотоэдс. Полученные данные подтверждают возможность использования параметров фотоэлектрического отклика в качестве информативных диагностических признаков дефектности и неоднородности ППП и полупроводниковых структур. Экспериментальная апробация подтверждает высокую информативность метода фотоэлектрической диагностики с локальным фотовозбуждением и его применимость для контроля многоэлементных светоизлучающих структур различной архитектуры.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от известных измерительных установок, реализующих метод сканирующей фототковой микроскопии, разработанный АПК благодаря функции задания обратного смещения на контролируемом ППП и возможности регулировки диаметра лазерного луча в широких пределах обеспечивает проведение как интегральной диагностики, так и диагностики с пространственным разрешением многоэлементных ППП, позволяя выявлять как неоднородности фотоэлектрического отклика в пределах отдельных кристаллов, так и различия этого отклика между кристаллами ППП.

Полученные экспериментальные результаты подтверждают возможность эффективного выявления с помощью разработанного АПК как межкристальных, так и внутрикристальных неоднородностей параметров ППП различных типов. Построение карт пространственного распределения фотоэлектрического отклика обеспечивает наглядную визуализацию дефектных областей и может быть использовано для оценки качества светодиодных матриц, а также для прогнозирования их надежности.

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН (FFWZ-2025-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kasirga T. S.* Phys. Rev. Appl. 2026. V. 25. № 5. P. 057001. https://doi.org/10.1103/8fvn-y8sj
2. *Buchs G., Bagiante S., Steele G.A.* Nat. Commun. 2014. V. 5. P. 4987. https://doi.org/10.1038/ncomms5987
3. *Nakamura S., Morioka N., Mizuochi N., Mizukami S., Morishita H.* Appl. Phys. Lett. 2025. V. 127. № 22. P. 224003. https://doi.org/10.1063/5.0286279
4. *Baranovskiy M. V., Glinskii G. F., Mironova M. S.* Semiconductors. 2013. V. 47. P. 58. https://doi.org/10.1134/S1063782613010053
5. *Sergeev V.A., Vasin S.V., Frolov I.V., Radaev O.A.* Meas. Tech. 2018. V. 61. № 9. P. 914. https://doi.org/10.1007/s11018-018-1524-0
6. *van Gorkom B.T., van der Pol T.P.A., Datta K., Wienk M.M., Janssen R.A.J.* Nat. Commun. 2022. V. 13. P. 349. https://doi.org/10.1038/s41467-021-27560-6
7. *Yao Y., Wang G., Wu F. et al.* RSC Advances. 2017. V. 7. № 68. P. 42973. https://doi.org/10.1039/C7RA06423C
8. *Graham R., Yu D.* Mod. Phys. Lett. B. 2013. V. 27. № 25. P. 1330018. https://doi.org/10.1142/S0217984913300184
9. *Cheon C.-Y., Sun Z., Cao J. et al.* Npj 2D Mater. Appl. 2023. V. 7. P. 74. https://doi.org/10.1038/s41699-023-00435-8
10. *Ogawa Y., Tahara H., Kanemitsu Y.* J. Appl. Phys. 2024. V. 135. No. 24. Art. 243101. https://doi.org/10.1063/5.0207057
11. *Zhuo G.-Y., Banik S., Kao F.-J., Ahmed G. A., Kakoty N. M., Mazumder N., Gogoi A.* Microsc. Res. Tech. 2022. Vol. 85, No. 11. P. 3495–3513. https://doi.org/10.1002/jemt.24212

12. *Kazankov A., Sergeev V., Frolov I., Radaev O.* Proceed. VIII International Conference on Information Technology and Nanotechnology (ITNT). Samara, RF. 2022. С. 22. https://doi.org/10.1109/APEDE53724.2022.9912896
13. *Сергеев В.А., Радаев О.А., Фролов И.В* ПТЭ. 2023. № 6. С. 103. https://doi.org/10.31857/S0032816223060071
14. *Фролов И.В.* РЭНСИТ. 2024. Т. 16. № 4. С. 441. https://doi.org/10.17725/rensit.2024.16.441

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис. 1. Карта пространственного распределения фотоэлектрического отклика планарного органо-неорганического перовскитного солнечного элемента [7]

Рис. 2. Структурная схема аппаратной части разработанного АПК

Рис. 3. Структурная схема оптической системы разработанного АПК

Рис. 4. Нормированные профили пространственного распределения интенсивности областей засветки при диаметре лазерного пятна 16 мкм (**а**), 100 мкм (**б**) и 3 мм (**в**)

Рис. 5. Функциональная схема блока задания режима

Рис. 6. Профиль распределения фотоэлектрического отклика по поверхности светодиодной матрицы типа ILO-01FF5-13NW-EC211

Рис. 7. Гистограмма распределения фотоэлектрического отклика при последовательном фотовозбуждении кристаллов типа ILO-01FF5-13NW-EC211 целиком

Рис. 8. Профиль распределения фотоэлектрического отклика фотодиода ФДК-142-01 с пространственным разрешением

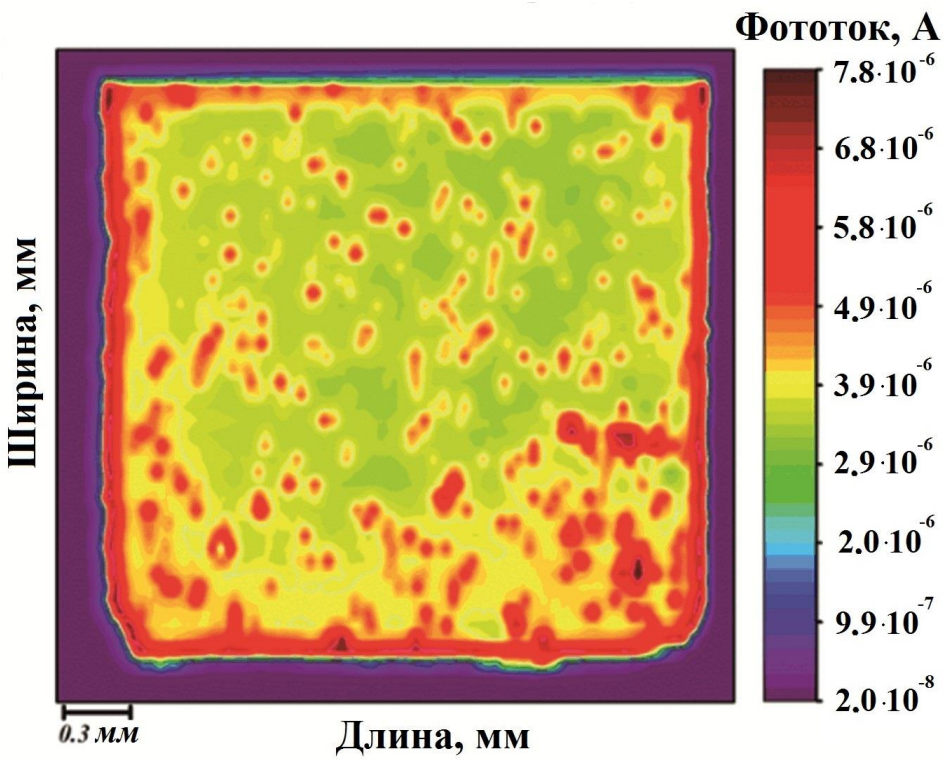

Фототок, А
7.8·10-6
6.8·10-6
5.8·10-6
4.9·10-6
3.9·10-6
2.9·10-6
2.0·10-6
9.9·10-7
2.0·10-8
Ширина, мм
0.3 мм
Длина, мм

Рис. 1.

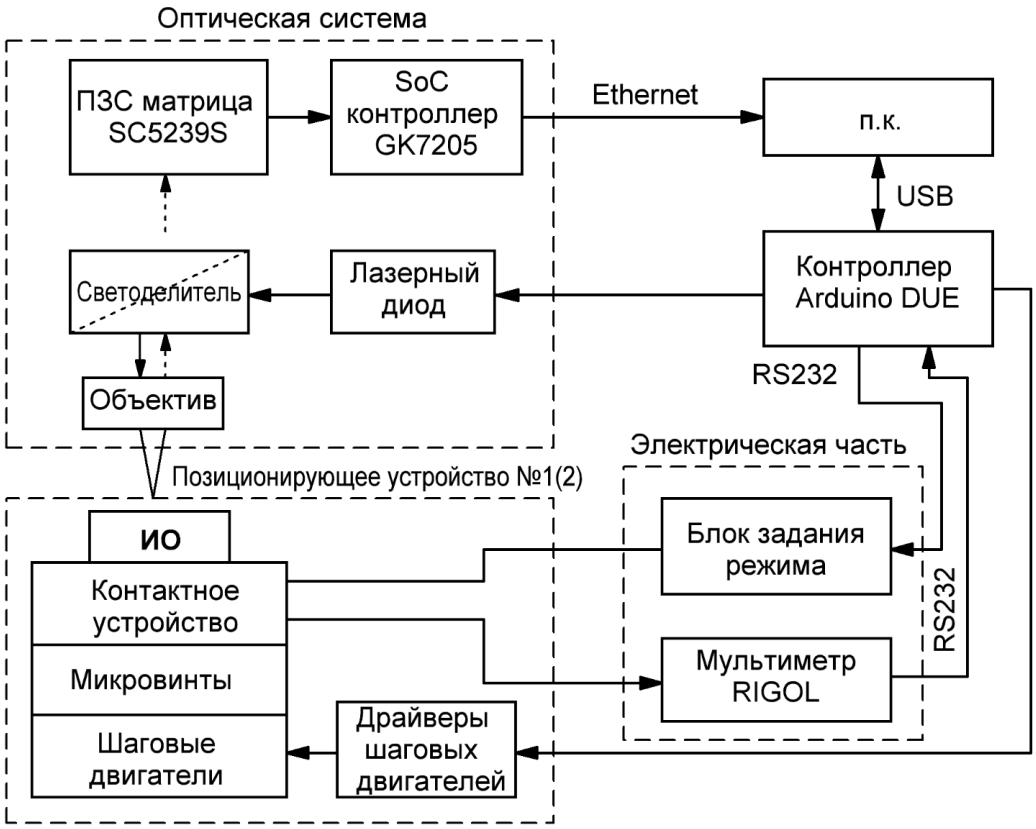

Оптическая система
ПЗС матрица SC5239S
SoC контроллер GK7205
Ethernet
п.к.
USB
Светоделитель
Лазерный диод
Контроллер Arduino DUE
RS232
Объектив
Электрическая часть
Позиционирующее устройство №1(2)
ИО
Блок задания режима
Контактное устройство
Микровинты
Мультиметр RIGOL
RS232
Шаговые двигатели
Драйверы шаговых двигателей

Рис. 2.

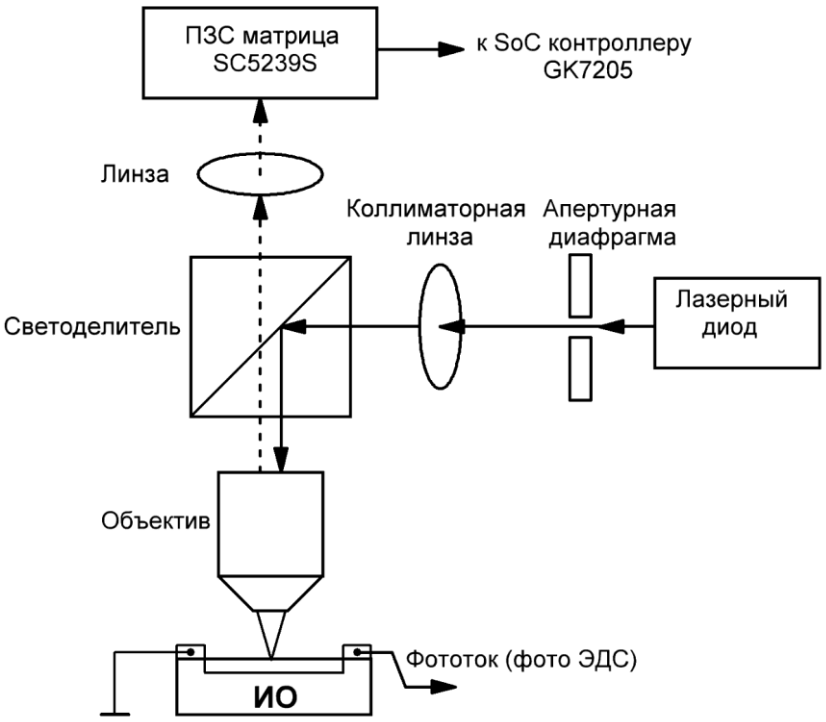

ПЗС матрица
SC5239S
к SoC контроллеру
GK7205
Линза
Коллиматорная
линза
Апертурная
диафрагма
Светоделитель
Лазерный
диод
Объектив
Фототок (фото ЭДС)
ИО

Рис. 3.

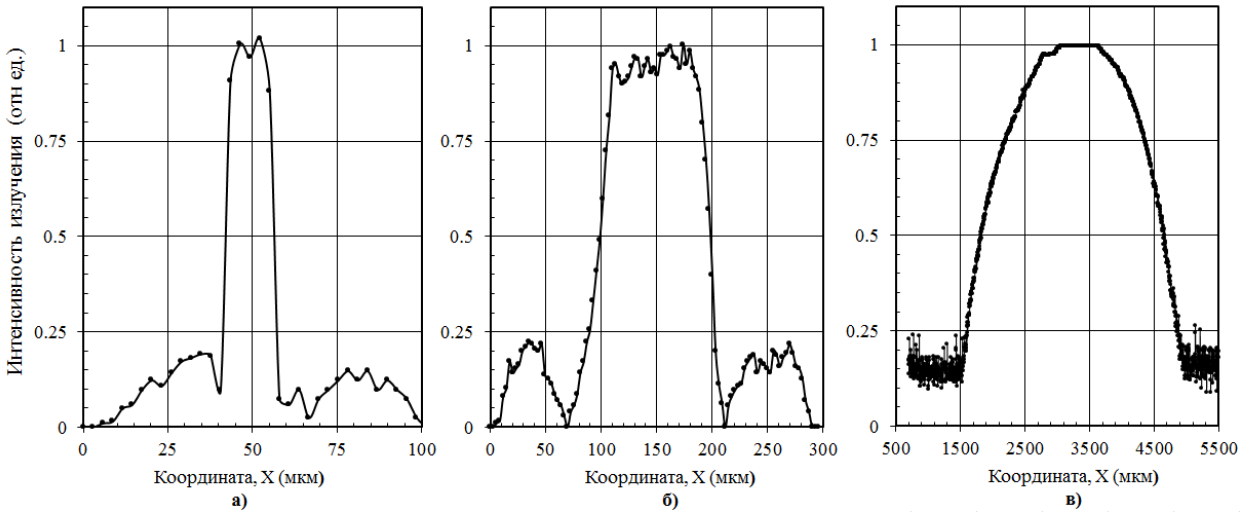

Интенсивность излучения (отн ед.)
1
0.75
0.5
0.25
0
0
25
50
75
100
Координата, X (мкм)
а)
0
50
100
150
200
250
300
Координата, X (мкм)
б)
500
1500
2500
3500
4500
5500
Координата, X (мкм)
в)

Рис. 4.

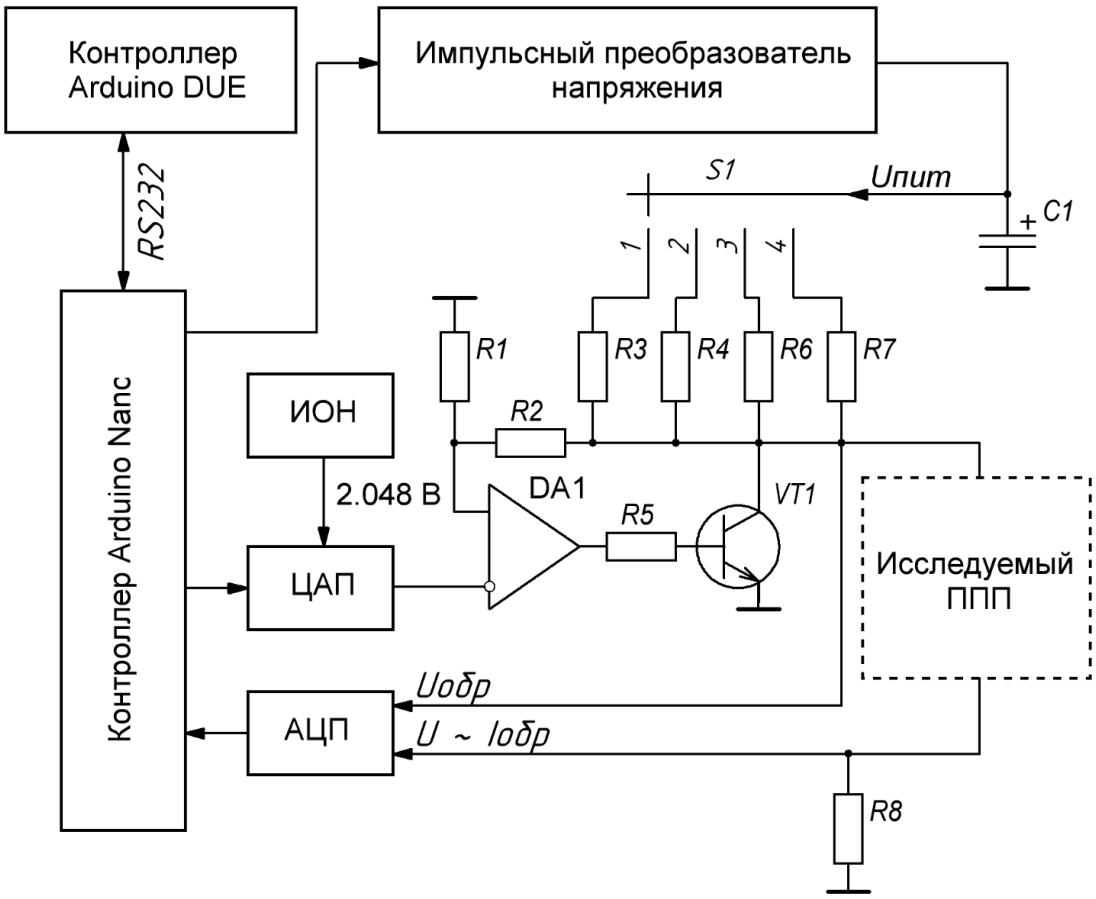

Контроллер
Arduino DUE
Импульсный преобразователь
напряжения
RS232
S1
Uпит
C1
1
2
3
4
R1
R3
R4
R6
R7
R2
ИОН
2.048 В
DA1
R5
VT1
Контроллер Arduino Nanc
ЦАП
Исследуемый
ППП
Uобр
АЦП
U ~ Iобр
R8

Рис. 5.

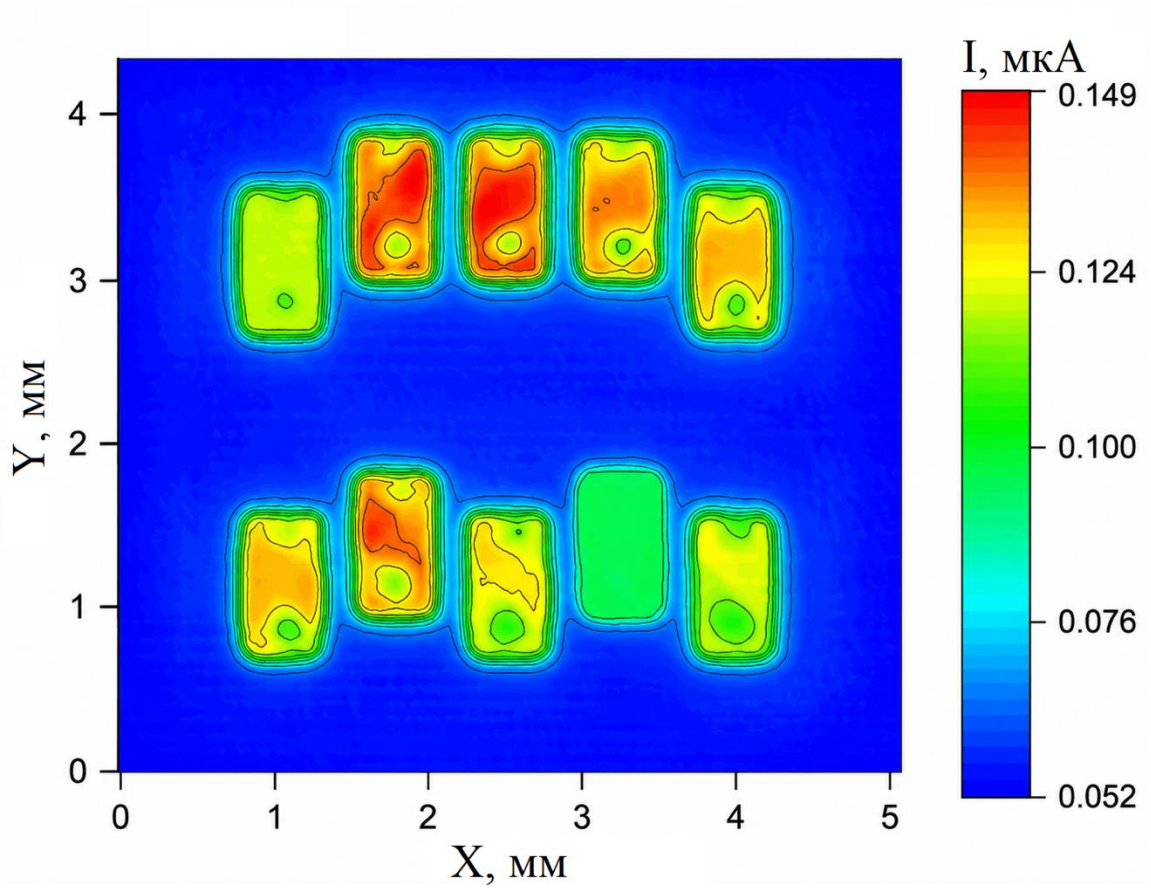


Рис. 6.

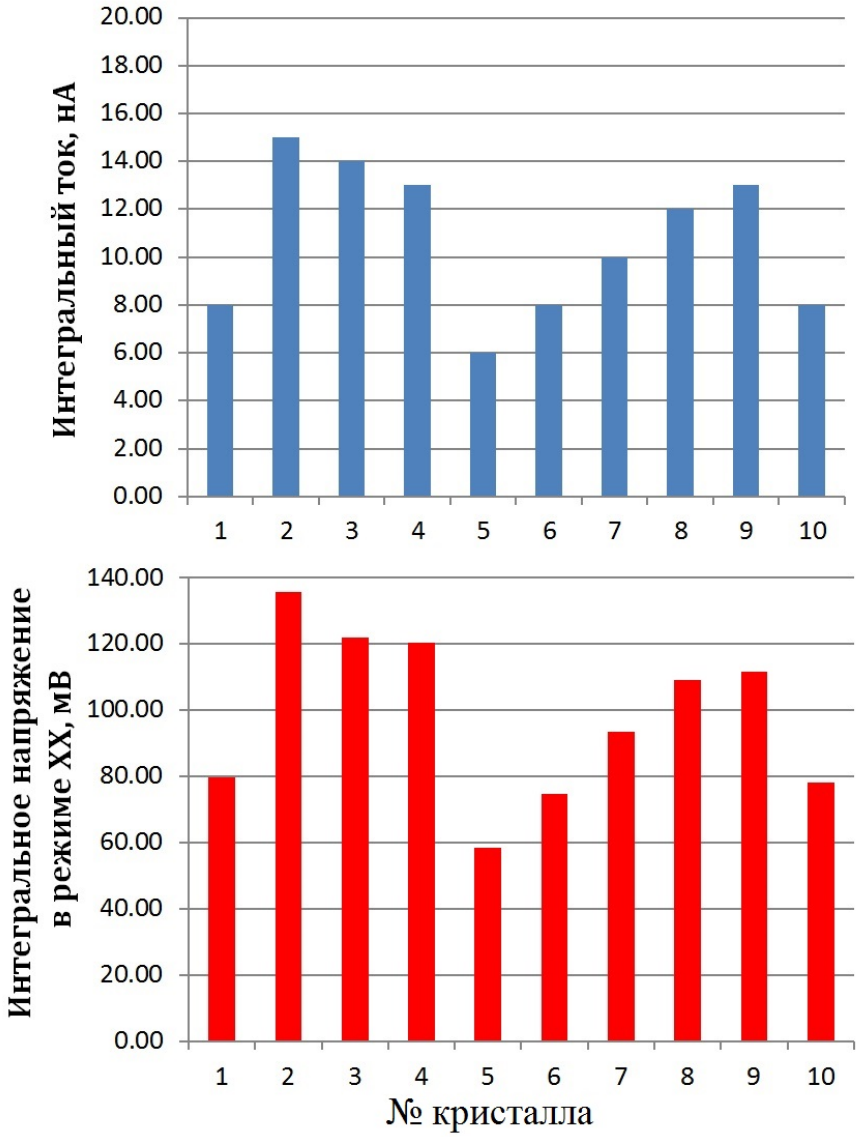

Интегральный ток, нА
20.00
18.00
16.00
14.00
12.00
10.00
8.00
6.00
4.00
2.00
0.00
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Интегральное напряжение в режиме XX, мВ
140.00
120.00
100.00
80.00
60.00
40.00
20.00
0.00
№ кристалла

Рис. 7.

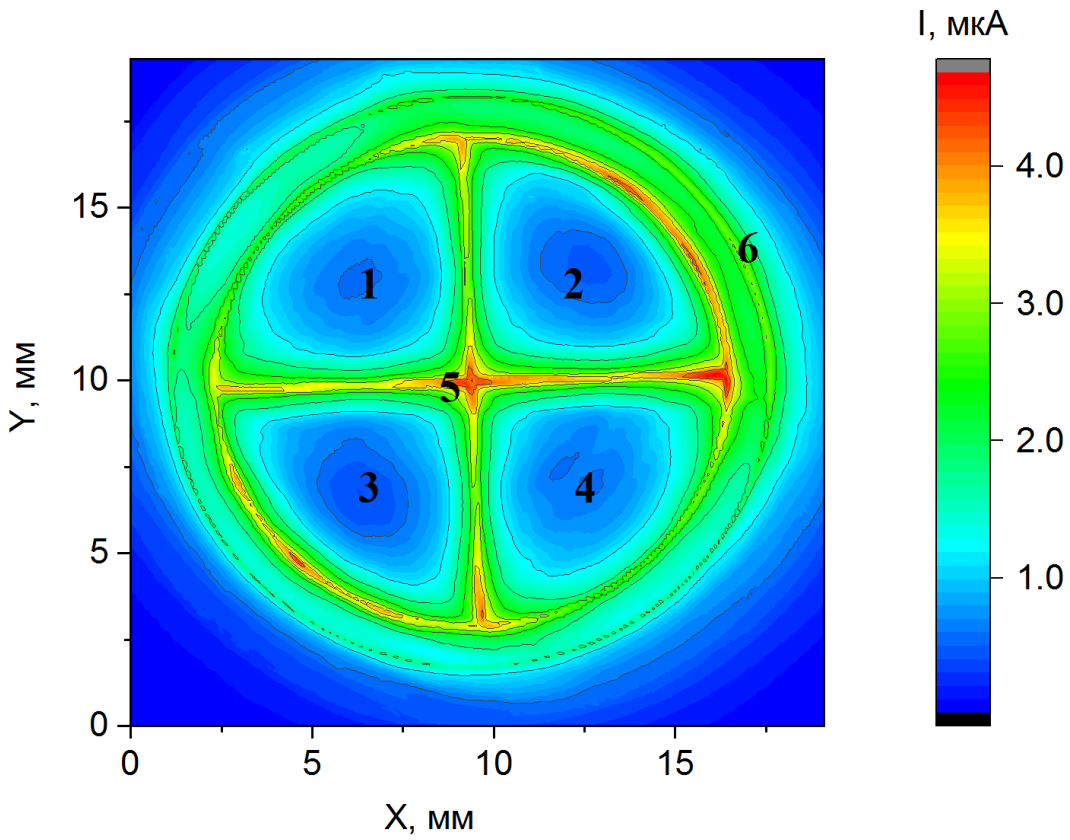


Рис. 8.