

Универсальная зондовая установка для межоперационного контроля фотоэлектрических характеристик фотоприемников

А. А. Батиева, В. Ю. Кузнецов, А. В. Полесский, В. К. Тресак

Приведены результаты разработки установки, предназначенной для межоперационного контроля фотоприемников и фотоприемных устройств на основе Si, Ge, InGaAs I-go поколения, предназначенных для приема лазерного излучения, на стадиях производства до резки пластины на отдельные фоточувствительные элементы. Установка позволяет проводить измерения темнового тока, токовой чувствительности, разброса чувствительности, коэффициента фотоэлектрической связи в нормальных климатических условиях.

Ключевые слова: фотоприемное устройство, измерение параметров, методики измерения, фотоэлектрическая связь, оптико-электронные системы

Введение

Одной из актуальных задач, возникающих в процессе изготовления фотоприемников (ФП) и фотоприемных устройств (ФПУ), предназначенных для приема лазерного излучения, является задача контроля качества изделия. Обеспечение межоперационного контроля позволяет проводить отбраковку на ранних стадиях производства, что повышает процент выхода годных изделий и позволяет снизить затраты на последующие операции.

В связи с необходимостью увеличения объема производства ФП и ФПУ на основе Si, Ge и InGaAs в АО «НПО «Орион», была поставлена и выполнена задача создания универсальной зондовой установки, реализованной на отечественной элементной базе. Целью данной статьи является описание данной зондовой установки и представление её основных характеристик.

Решаемые задачи

Разработанная универсальная зондовая установка для межоперационного контроля позволяет проводить экспресс-измерения следующих основ-

ных фотоэлектрических параметров неразделенных фоточувствительных элементов (ФЧЭ) на пластине в нормальных климатических условиях:

- темнового тока;
- токовой чувствительности;
- разброса чувствительности;
- коэффициента фотоэлектрической связи.

Измерения фотоэлектрических параметров зондовой установкой реализованы в соответствии с методами 1.1, 1.11, 1.17 ГОСТ 17772-88 [1]. Для обеспечения малого размера (порядка 30 мкм) зондирующего пятна был исследован ряд технических решений в части построения оптической схемы установки. Наиболее распространенным способом подсветки контролируемых неразделенных ФЧЭ является применение специальных осветительных зондов, имеющих в своем составе оптическое волокно. Однако обеспечение величины зондирующего пятна 30 мкм требует применения высокоточной механики и накладывает дополнительные требования к квалификации оператора, поэтому применение данного метода в нашем случае признано нецелесообразным. В связи с этим было принято решение о создании специализированной трехканальной оптической системы, позволяющей обеспечить требуемый размер зондирующего пятна.

Разработка функциональной схемы установки

Для решения поставленной задачи была разработана функциональная схема зондовой установки, учитывающая недостатки установок-аналогов. Соответствующая схема приведена на рис. 1.

Батиева Анастасия Александровна, инженер 2 кат.
Кузнецов Виталий Юрьевич, инженер.
Полесский Алексей Викторович, главный метролог, к.т.н.
Тресак Виктория Константиновна, инженер.
АО «НПО «Орион».
Россия, 111538, Москва, ул. Косинская, 9.
E-mail: orion@orion-ir.ru, av22236@bk.ru

Статья поступила в редакцию 15 января 2018 г.

© Батиева А. А., Кузнецов В. Ю., Полесский А. В., Тресак В. К., 2018

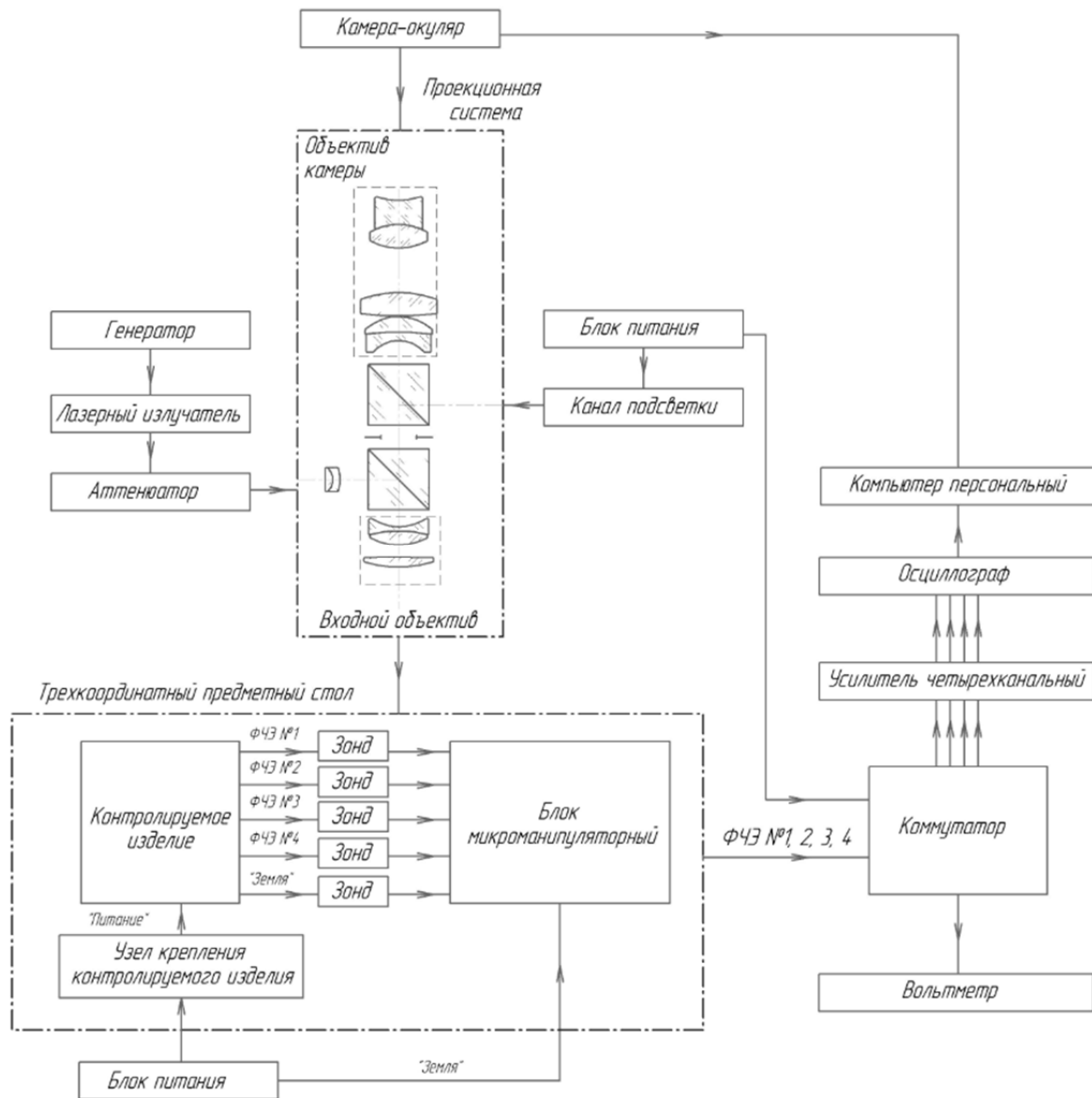


Рис. 1. Функциональная схема зондовой установки для межоперационного контроля фотоэлектрических характеристик фотоприемников.

Оптическая система установки должна осуществлять формирование зондирующего пятна в плоскости контролируемой площадки фотодиода (канал зондирования), формировать изображение на матрице камеры-окуляра для вывода на экран ПК (канал визуализации); также в конструкции должен быть блок подсветки для удобства работы оператора (канал подсветки), поскольку внешнего освещения обычно недостаточно.

Существенным фактором, влияющим на построение оптической системы, является коэффициент отражения поверхности ФЧЭ. В связи с этим, для функционирования установки необходимо совмещение трех каналов, которое реализовано через единый оптический вход и светоделительные элементы (куб-призмы). С целью унификации и обеспечения простоты юстировки

оптических блоков, совмещение каналов производится в параллельных пучках лучей. Такое техническое решение позволяет осуществлять независимую смену оптических элементов установки, например, применять типоразмерный ряд объективов с различными линейными увеличениями для контроля всех типов структур.

В качестве источника излучения в канале зондирования использован лазерный диод с волоконным выходом с длиной волны 1,064 мкм. Управление лазерным диодом осуществляется генератором Г5-84. Такое построение канала позволило обеспечить формирование оптических зондирующих импульсов длительностью от 2 нс и мощностью не менее 1 мВт. Регулировка выходной мощности лазерного излучения осуществляется при помощи оптического аттенюатора.

Основным функциональным элементом канала подсветки является светодиод мощностью 1 Вт, максимум излучения которого приходится на длину волны 850 нм. В канале предусмотрена возможность регулировки уровня яркости подсветки.

Канал визуализации представляет собой проекционную систему, состоящую из двух объективов: входного объектива и объектива камеры.

Типоразмерный ряд применяемых входных объективов позволяет наблюдать контролируемую площадку размером 5×5 мм либо 10×10 мм с высокой степенью детализации.

Трехкоординатный предметный стол обеспечивает перемещение контролируемой пластины в горизонтальной плоскости по двум осям на расстояние до 80 мм и в вертикальном направлении до 50 мм. Также в конструкции столика предусмотрена возможность перемещения в вертикальной плоскости на фиксированное расстояние для обеспечения быстрого переключения между контролируемыми ФЧЭ на пластине. С помощью иглолок микроманипуляторов осуществляется контактирование с последующим съемом сигнала с каждой из площадок диода. Каждая из фоточувствительных площадок поочередно облучается зондирующим пятном.

Для подачи на пластину напряжения смещения величиной до 200 В в составе установки используется специальное электроизолированное позолоченное основание, снабженное защитным кожухом.

С целью уменьшения погрешности измерений (в первую очередь, величины разброса токовой чувствительности) в составе установки предусмотрен один измерительный канал, а для контроля параметров многоэлементных фотоприемников используется специализированный коммутатор.

Для обеспечения автоматизации измерений в состав установки включен персональный компьютер (ПК) со специализированным программным обеспечением. Все измерительные приборы, входящие в состав установки, кроме генератора, имеют интерфейс для связи с ПК.

Разработка оптической схемы установки

Расчет параметров оптической системы зондовой установки был проведен исходя из требований на размер наблюдаемого объекта, который составляет $2y = 10 \times 10$ мм. Наводку на контролируемую площадку необходимо осуществлять с точностью 0,1×0,1 мм, поэтому в разрабатываемой схеме необходимо было реализовать увеличение, которое позволит спроецировать область размером 0,1×0,1 мм в 10×10 элементов. Таким образом,

формат матрицы приемника должен быть равен 1000×1000 элементов. Оптимальным для решения поставленной задачи является типовой формат матриц 1280×1024. Исходя из полученных требований, в качестве камеры-окуляра (приемника излучения – далее ПИ), при помощи которой будет осуществляться контроль контактирования иглолок микроманипуляторов и образца, была выбрана камера Levenhuk T130 NG 1,3М, имеющая следующие характеристики:

- разрешение 1280×1024;
- количество пикселей 1,3 Мпкс;
- шаг пикселей 3,6 мкм;
- размер фотоприемной матрицы (величина изображения) 4,6×3,7 мм.

Исходя из величин изображения и предмета (контролируемой площадки), требуемое линейное увеличение системы составило 0,37^x [2]. Величина относительного отверстия объектива камеры канала визуализации была выбрана из следующего условия: пятно рассеяния объектива не должно превышать размера одного элемента матрицы. В результате расчета и с учетом выбранного спектрального диапазона величина относительного отверстия составила 1:2,3. По конструктивным соображениям было принято техническое решение о расположении апертурной диафрагмы в центре системы, что позволило обеспечить примерное равенство световых диаметров линз во всех каналах. В качестве светоделительных элементов были использованы куб-призмы, поскольку данные оптические элементы не вносят дополнительных aberrаций и позволяют упростить процесс юстировки.

Расчет величин фокусных расстояний оптических блоков проекционной системы – входного объектива и объектива камеры – был проведен из условия ограничения максимального углового поля объективов величиной 4°, поскольку при большем поле зрения существует вероятность получения неравномерной освещенности в плоскости изображения [3]. Таким образом, величины фокусных расстояний входного объектива и объектива камеры составили 105 мм и 35 мм соответственно, а диаметр апертурной диафрагмы 15 мм. Также в установке предусмотрен сменный объектив с линейным увеличением 0,7^x и фокусным расстоянием 50 мм, применение которого позволяет осуществлять контроль ФЧЭ малых размеров.

Расчет оптических параметров блоков (радиусов, толщин и материалов) и последующая оптимизация проекционной системы были проведены с использованием специального программного обеспечения (ПО). Входной объектив и объектив камеры представляют собой оптические системы,

преобразующие бесконечно удаленные предметы в изображение на конечном расстоянии; у обеих оптических систем зрачок расположен в параллельных пучках лучей и существенно вынесен относительно оптических элементов [4]. По этим причинам наиболее подходящими исходными приближениями являются оптические системы окуляров, работающие в обратном ходе лучей. За основу оптической схемы входного объектива была принята схема Кельнера [5]. Такой вариант построения оптической системы является довольно простым и состоит из двух компонентов (одиночной линзы и склейки), имеет вынесенный входной зрачок и обеспечивает необходимую величину относительного отверстия. После оптимизации параметров системы и приведения значений радиусов линз к стандартному ряду была получена система, обладающая МТФ, близкой к дифракционной. В системе также выдержано требуемое фокусное расстояние и увеличен задний отрезок из соображений эргономики.

Для объектива камеры за основу была выбрана оптическая система окуляра Эрфле [5], которая представляет собой пятиэлементную оптическую систему, состоящую из двух ахроматических склеек и одиночной линзы. Системы такого типа имеют большой вынос зрачка, удобны в использовании и

обладают требуемой величиной относительного отверстия. При оптимизации этой системы основной задачей было получение заднего отрезка величиной 16–18 мм, что обусловлено присоединительным размером камеры (стандарт C-mount).

Сменный входной объектив представляет собой оптическую систему симметричного типа, состоящую из двух пар склеенных линз, обеспечивающих хорошую коррекцию aberrаций при малом воздушном промежутке. Фокальные отрезки и суммарная толщина примерно одинаковы, что позволяет иметь большее удаление входного зрачка, чем в системе Кельнера.

Главным элементом канала зондирования является оптическая система, представляющая собой двухлинзовый склеенный объектив и обеспечивающая формирование бесконечно удаленного изображения. При работе с входным объективом система формирует зондирующее пятно диаметром не более 30 мкм в плоскости ФЧЭ.

Принципиальная схема полученной проекционной оптической системы зондовой установки представлена на рис. 2. Качество изображения данной оптической схемы можно оценить с помощью числа Штреля [6], которое составляет 0,86 (ошибка волнового фронта менее $\lambda/25$) в спектральном диапазоне 0,85–0,95 мкм.

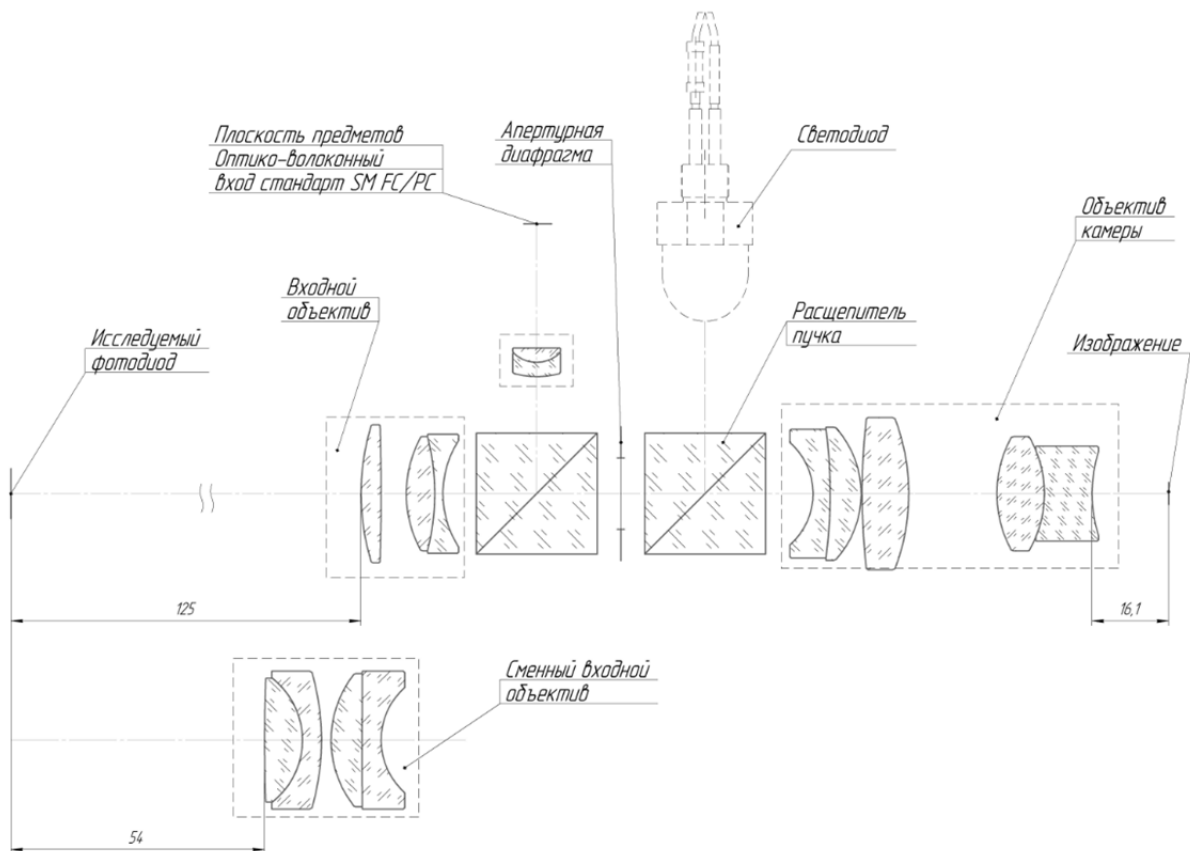


Рис. 2. Принципиальная схема оптической системы зондовой установки.

Разработка электронных блоков и программного обеспечения установки

Основную часть электронных узлов и блоков установки составляют стандартные средства измерения: генератор, блок питания, осциллограф, вольтметр. Такое решение является оптимальным при контроле ФП и ФПУ I поколения и полностью соответствует требованиям методик и схем измерения из нормативной документации.

К вновь разработанным элементам электронных узлов и блоков относится коммутатор, выполненный на основе герконовых реле, и узел съема сигнала, состоящий из контактных зондов, закрепленных на микроманипуляторах.

Для автоматизации процесса измерения было разработано специализированное ПО [7]. Программа предназначена для вычисления ряда пара-

метров фотодиода, а именно: чувствительности, пороговой мощности и коэффициента фотоэлектрической связи. Также ПО осуществляет отображение осциллограммы, сохранение вычисленных и измеренных данных в текстовый файл. Вычисление параметров происходит на основании информации о сигналах с осциллографа и вольтметра при облучении фоточувствительной площадки контролируемого фотодиода зондирующим пятном лазера. Программа имеет вид, типичный для программ, работающих в среде Windows. Внешний вид программного обеспечения приведен на рис. 3.

Конструкция разработанной установки позволяет осуществлять быструю, удобную фиксацию, контактирование и съем измеряемых изделий. Установка обслуживается одним оператором.

Внешний вид разработанной установки приведен на рис. 4.

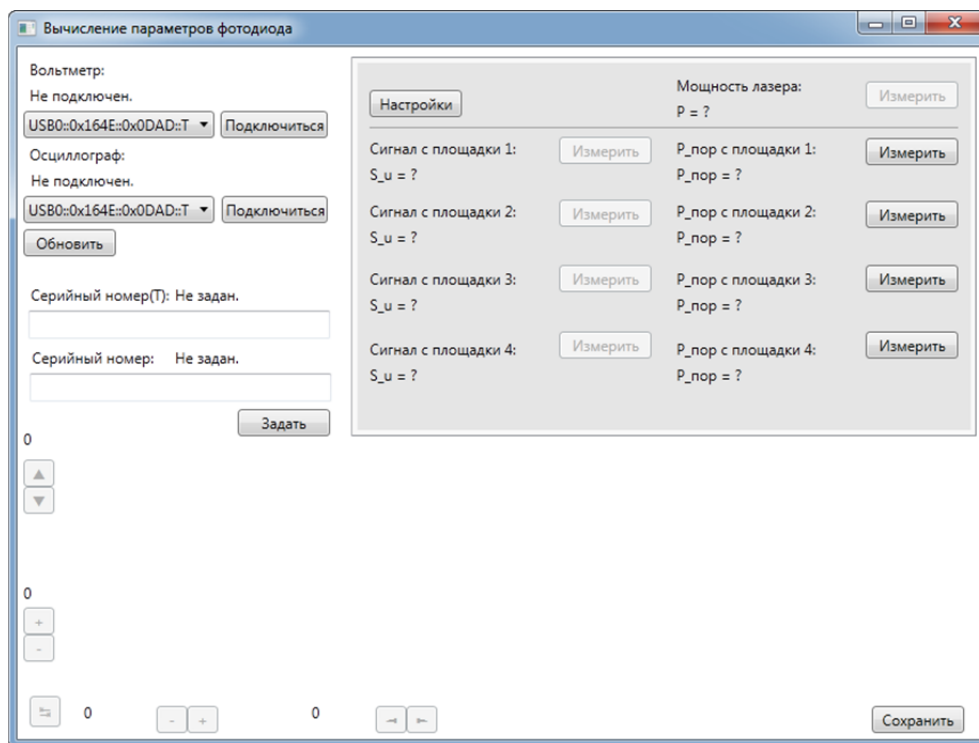


Рис. 3. Главное окно приложения пользовательского управления.

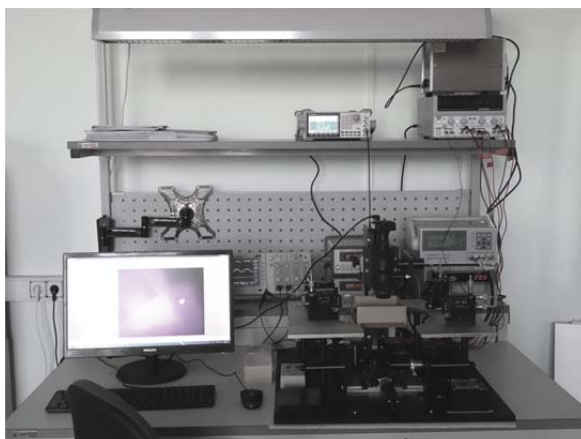


Рис. 4. Внешний вид зондовой установки для межоперационного контроля фотоэлектрических характеристик фотоприемников.

Основные технические характеристики установки приведены в таблице.

Таблица

Основные технические характеристики установки

Наименование параметра, единица измерения	Значение
Длина волны излучателя, мкм	1,064±0,005
Максимальная мощность излучения*, мВт, не менее	1
Длительность импульса излучения, нс, не менее	20
Диапазон частоты повторения импульсов излучения, кГц	0,5–10
Диапазон коэффициента ослабления аттенюатора, дБ, не менее	0–50
Линейное увеличение системы с входным объективом $f' = 105$ мм, крат	0,37
Линейное увеличение системы с входным объективом $f' = 50$ мм, крат	0,7
Передний отрезок входного объектива $f' = 105$ мм, мм	125
Передний отрезок входного объектива $f' = 50$ мм, мм	54
Размер зондирующего пятна**, создаваемый оптической системой, мкм, не более	30
Диапазон перемещения зондов-иголок по осям x, y, z , мм, не менее	8
Величина напряжения смещения, В, не более	180

* В постоянном режиме излучения.

** Концентрация энергии в пятне рассеяния 80 %.

Заключение

Приведены основные результаты разработки установки, предназначенной для межоперационного контроля фотоприемников и фотоприемных устройств на основе Si, Ge, InGaAs I-го поколения, предназначенных для приема лазерного излучения, на стадиях производства до резки пластины на отдельные фоточувствительные элементы

Разработанная зондовая установка соответствует современным требованиям, а именно: обеспечивает измерение всех необходимых фотоэлектрических параметров, имеет высокую унификацию и удобный интуитивно понятный пользовательский интерфейс. Установка содержит в своем составе ПК и позволяет проводить измерения, обрабатывать данные и формировать отчеты в автоматическом режиме.

Методика измерений, реализованная в зондовой установке, полностью соответствует ГОСТ 17772-88. Внедрение разработанной зондовой установки позволит повысить процент выхода годных изделий за счет отбраковки на ранних стадиях производства, а также снизить требования к уровню квалификации оператора и сократить вре-

мя измерения фотоэлектрических параметров выпускаемых изделий.

Дальнейшим этапом развития данной разработки является проработка решений, направленных на повышение степени автоматизации не только процессов измерения, но и работы установки в целом.

ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 17772-88. Приемники излучения и устройства приемные полупроводниковые фотоэлектрические. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам, 1988.
- Заказнов Н. П., Кирюшин С. И., Кузичев В. И. Теория оптических систем. – М.: Машиностроение, 1992.
- Русинов М. М. Композиция оптических систем. – М.: Машиностроение, 1989.
- Дубовик А. С., Апенко М. И., Дурейко Г. В. и др. Прикладная оптика. – М.: Недра, 1982.
- Русинов М. М. Техническая оптика. – М.: Машиностроение, 1979.
- Запрягаева Л. А., Свешникова И. С. Расчет и проектирование оптических систем. – М.: Логос, 2000.
- Кузнецов В. Ю., Полесский А. В. Программное обеспечение для измерения параметров фотодиода. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2017614353 от 12.04.2017.

Universal test-bench for measurements of the photoelectric characteristics of photodetectors

A. A. Batsheva, V. Y. Kuznetsov, A. V. Polesskiy, and V. K. Tresak

Orion R&P Association
9 Kosinskaya str., Moscow, 111538, Russia
E-mail: orion@orion-ir.ru; av22236@bk.ru

Received January 15, 2018

Consideration is given to the results of the development of the universal test-bench designed for the technological control of photodetectors and photodetector devices based on Si, Ge, InGaAs. The technological control of the high-speed and hi-sensitivity pin-photodetectors is realized at the production stages before a plate is cut into individual photosensitive elements. The universal test-bench allows to measurement the dark current, current sensitivity, current sensitivity spread, pixel cross-talk under room conditions.

Keywords: photodetector, measurement parameters, methods, coefficient of pixel crosstalk, optoelectronic system.

REFERENCES

1. GOST 17772-88 (USSR State Committee of Standards, Moscow, 1988) [in Russian].
2. N. P. Zakaznov, S. I. Kiryushin, and V. I. Kuzichev, *Theory of Optical Systems* (Mashinost., Moscow, 1992) [in Russian].
3. M. M. Rusanov, *Composition of Optical Systems* (Mashinost., Moscow, 1989) [in Russian].
4. A. S. Dubovik, M. I. Apenko, G. V. Dureiko, et al., *Applied Optics* (Nedra, Moscow, 1982) [in Russian].
5. M. M. Rusinov, *Technical Optics* (Mashinost., Moscow, 1979) [in Russian].
6. L. A. Zapryagaeva and I. S. Sveshnikova, *Calculation and Projection of Optical Systems* (Logos, Moscow, 2000) [in Russian].
7. V. Yu. Kuznetsov and A. V. Polesskiy, *Software for Measurement of Photodiode Parameters* (Certificate of State Registration of Software No. 2017614353, April 12, 2017) [in Russian].