

5. Cole, K.S. Dispersion and absorption in dielectrics I. Alternating current characteristics / K.S. Cole, R.H. Cole // J. Chem. Phys. — 1941. — V. 9, — P. 341–351.
6. Davidson, D.W. Dielectric relaxation in glycerol, propylene glycol, and nPropanol / D.W. Davidson, R.H. Cole // J. Chem. Phys. — 1951. — V. 19, — P. 1484–1490.
7. Koops, G. G. On the dispersion of resistivity and dielectric constant of some semiconductors at audiofrequencies / G.G. Koops // Phys. Rev. — 1951. — V. 83, — P. 121–124.
8. Magnetic domain-wall induced ferroelectric polarization in rare-earth orthoferrites AFeO_3 ($A = \text{Lu}, \text{Y}, \text{Gd}$): first-principles calculations / W. Wang [et al] // J. Mater. Chem. — 2019. — V. 7. — P. 10059–10065.
9. D. Johnson, Software ZView 3.2, Southern Pines: Scribner Associates, Inc, 2009.

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТОПРИЕМНИКОВ И ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ МУЛЬТИСПЕКТРАЛЬНОГО ИСТОЧНИКА ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**В. В. Малютина-Бронская, С. А. Сорока, Д. В. Сенькевич, О. В. Ермаков,
О. А. Гребенщиков, А. В. Нестерёнок**

*ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
пр. Независимости, 68-1, 220072 Минск, Беларусь,
e-mail: malyutina@oelt.basnet.by*

Представлен автоматизированный лазерный испытательный комплекс для тестирования перспективных видов полупроводниковых фотоприемников, который позволяют испытывать все основные параметры фотоприемников под действием лазерного излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра в соответствии с существующими стандартами. Автоматизация и модульное исполнение комплекса позволяют сократить время испытаний фотоприемников. В качестве источника лазерного излучения представлен мультиспектральный источник, включающий набор из девяти лазеров с откалиброванной мощностью излучения 2 мВт.

Ключевые слова: фотоприемник; лазерный источник излучения, автоматизированный комплекс, фотоэлектрические характеристики.

AUTOMATED COMPLEX FOR INVESTIGATION OF PHOTODETECTORS AND PHOTO-SENSITIVE MATERIALS ON THE BASIS OF A MULTISPECTRAL LASER SOURCE

**V. V. Malyutina-Bronskaya, S. A. Soroka, D. V. Senkevich, O. V. Ermakov,
O. A. Grebenshchikov, A. V. Nestsiaronak**

*SSPA "Optics, optoelectronics and laser technology",
Nezalezhnosti Ave. 68-1, 220072 Minsk, Belarus,
Corresponding author: V. V. Malyutina-Bronskaya (malyutina@oelt.basnet.by)*

An automated laser test complex for testing promising types of semiconductor photodetectors is presented, which will allow testing all the main parameters of photodetec-

tors under the action of laser radiation in the visible and near infrared spectral ranges in accordance with existing standards. Automation and modular design of the complex allows reducing the time of testing photodetectors. As a source of laser radiation, a multispectral source is presented, including a set of nine lasers with a calibrated radiation power of 2 mW.

Key words: photodetector; laser radiation source, automated complex, photoelectric characteristics.

ВВЕДЕНИЕ

Среди оптоэлектронных приборов фотоприемники или фотоприемные устройства (ФПУ), используются для широкого круга применений – от телекоммуникаций до прецизионных измерений в области оптической радиометрии. В последнее десятилетие фотозлектроника быстро развивается, появляются быстродействующие, многоспектральные, матричные, и другие ФПУ [1]. Особый класс занимают лавинные ФПУ и полупроводниковые фотоумножители – фотодетекторы регистрации слабых оптических сигналов, в том числе работающие в режиме регистрации одиночного фотона [2]. Таким образом, указанные тенденции задают специфические требования к измерительному оборудованию с расширенными функциональными возможностями измерений характеристик и параметров ФПУ [3–6].

Помимо обеспечения высоких метрологических характеристик, разрабатываемый стенд должен соответствовать современным требованиям: обеспечивать измерение максимально возможного количества параметров с высокой точностью, быть автоматизированным, иметь высокую унификацию и удобный, интуитивно понятный пользовательский интерфейс. Проблемой при создании оборудования измерения параметров фотоприемных устройств нового поколения является отсутствие стандартизированных методик измерения, которые можно было бы реализовать в измерительной аппаратуре. Решение данной проблемы достигается за счет корректировки методик измерения фотоприемных устройств первого поколения, приведенных в ГОСТ 17772-88 [7].

Настоящая работа была направлена на создание автоматизированного испытательного комплекса для измерения основных характеристик кремниевых ФПУ в соответствии с действующими национальными и международными стандартами с использованием лазерного источника излучения с нормированной мощностью излучения на выходе.

СОСТАВ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА

Исходя из поставленной цели в создание комплекса лег модульный подход. Блок-схема модульного лазерного испытательного комплекса представлена на рис. 1.

В состав комплекса входят следующие модули: оптический, модуль термостатирования и позиционирования, модуль электроники.

Оптический модуль (ОМ): включает в себя модуль позиционирования (МП) для размещения испытуемого ФПУ, лазерный источник излучения (ЛИИ), состоящий из мультиспектрального источника лазерного излучения (МСИЛИ) для измерения абсолютной спектральной чувствительности. Внешний вид МСИЛИ показан на рис. 2, а. Импульсные источники лазерного излучения (405 нм, 550 нм и 900 нм);

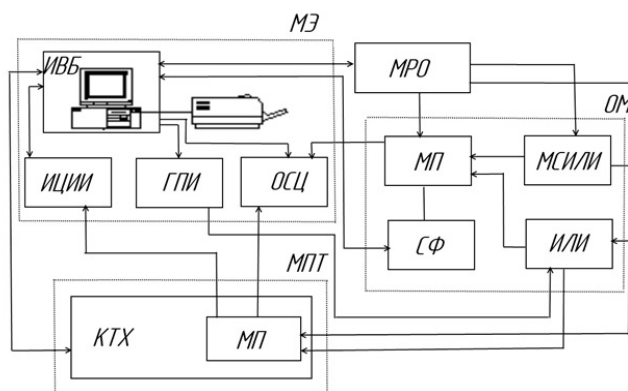


Рисунок 1. Структурная схема автоматизированного базового лазерного комплекса (АБЛИК):
МРО – место рабочее оператора, **МЭ** – модуль электроники (ИВБ- информационно-
 вычислительный блок, ИЦИИ – интерактивный цифровой источник- измеритель,
 ГПИ – генератор произвольного импульса, ОСЦ – осциллограф), **ОМ** – оптический модуль
 (МП – модуль позиционирования, МСИЛИ – мультиспектральный источник лазерного
 излучения, ИЛИ – татирования (КТХ – камера тепла и холода, МП – модуль позиционирования)

Разработанный для данного комплекса МСИЛИ с длинами волн в диапазоне 405–1100 нм на базе полупроводниковых лазеров типа LDI представляет собой 9 лазерных диодов с длинами волн 405, 450, 520, 660, 780, 808, 905, 980 и 1064 нм с общим оптоволоконным выводом и с платами управления. Для питания лазерных диодных модулей используются модули управления со стабилизацией тока накачки и температуры лазерных диодов. Для отвода выделяющейся теплоты лазерные диодные модули крепятся к внешнему радиатору. Оптические волокна от 9 лазерных диодов собраны в оптическом комбайнере в выходном разъеме. Центры волокон располагаются в пределах окружности диаметром 600 мкм (рис. 2, б).

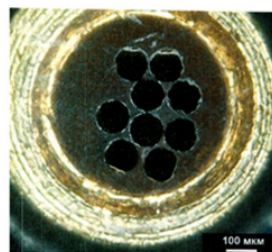


Рисунок 2. Внешний вид мультиспектрального лазерного источника излучения

Оптические волокна являются одномодовыми для соответствующих длин волн оптического излучения и выходное излучение имеет профиль близкий к гауссовому. Лазерные диоды в составе источника установлены на выходную оптическую мощность 2.0 мВт. В процессе эксплуатации допускается изменение мощности на величину до $\pm 10\%$ от исходной.

Дополнительно комплекс укомплектован спектрофотометром (СФ), предназначенным для проведения измерений относительной и абсолютной спектральной чувствительности фотоприемных устройств. Измерение относительной спектральной чувствительности ФПУ производят на установке, структурная схема которой приведена на рис. 3. Спектральная чувствительность исследуемого ФПУ регистрируется с помощью механически перестраиваемого по длинам волн монохроматора, имеющего шаговый двигатель.

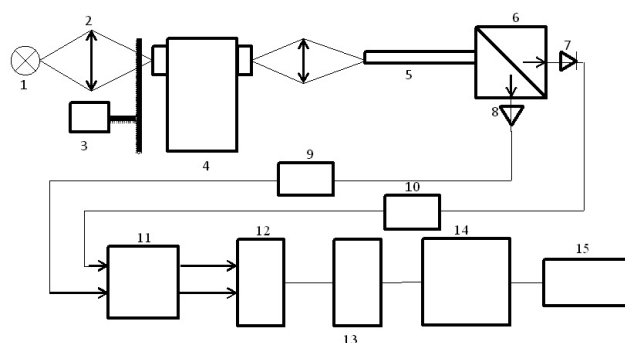


Рисунок 3. Структурная схема установки для измерения спектральной чувствительности – спектрофотометр «СпектроТест»: 1 – галогенная лампа накаливания; 2 – собирающая линза; 3 – модулятор с частотой модуляции 177 Гц; 4 – монохроматор, работающий в диапазоне 300–1100 нм, с дисперсией 5 нм/мм; 5 – оптическое волокно; 6 – светоделительный кубик; 7 – эталонный фотодиод; 8 – исследуемый фотодиод; 9, 10 – аналого-цифровые преобразователи; 11 – цифровой двухканальный фильтр; 12 – интерфейс Ethernet; 13 – компьютер; 14 – программное обеспечение для регистрации спектра; 15 – вывод графиков (EXCEL)

Метод измерения спектральной чувствительности ФПУ основан на сравнении спектральных чувствительностей исследуемого ФПУ с опорным приемником излучения, относительная и абсолютная спектральная чувствительность которого известна. При прохождении света, через спектрально-неселективный светоделитель, 50% света проходит через наклоненное под углом 45° зеркало на исследуемый фотодиод, а 50 % отражается под углом 90° на эталонный. Регистрация сигналов с фотоприемников происходит с помощью аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Для уменьшения собственных шумов приемно-усилительного тракта использовалась цифровая фильтрация сигналов с АЦП, на частоте модуляции, которая задается модулятором. Зарегистрированные данные попадают в компьютер, с помощью Ethernet интерфейса. Прибором управляет программа nVision, с которой, после регистрации спектра, данные передаются в EXCEL для дальнейшей обработки. Опорный канал на ФПУ с калиброванной спектральной чувствительностью работает на 50 % основного пучка и подключен все время. В качестве эталонного ФПУ был взят фотодиод, откалиброванный ФГУП «ВНИИОФИ» по методу калибровки МК-М4-05-2010 «Фотоприемники».

Модуль термостатирования и позиционирования (МТП) состоит из камеры тепла и холода (КХТ) для обеспечения измерений в диапазоне температур от минус 60 °С до + 60 °С. Модуль позиционирования (МП), который позволяет размещать испытуемый ФПУ внутри камеры тепла и холода и одновременно. МП предназначен для размещения испытуемого объекта (ФПУ) внутри камеры тепла и холода и его позиционирования относительно оптического излучения подаваемого с МСИЛИ или импульсных лазеров. С помощью разработанного МП происходит соосное согласование ФПУ и источника лазерного излучения. Система позиционирования встроена в деверь КХТ. Внешний вид МП показан на рис. 4.

Модуль электроники (МЭ) предназначен для подачи на испытуемый ФПУ контрольного напряжения заданной амплитуды, длительности и формы импульса, регистрации выходного фототока фотоприемника, обработки сигналов, обеспечения синхронности измерений, анализа переходных и шумовых характеристик фотоприемника, контроля температуры фотоприемника, автоматического расчета эксплуатационных характеристик фотоприемника – темнового тока, фототока, уровня шумов – шум-фактора, коэффициента умножения.



Рисунок 4. Внешний вид модуля позиционирования: вид сбоку (а) и вид спереди (б)

В состав модуля электроники входит: ИВЦ – информационно-вычислительный блок, ИЦИИ – интерактивный цифровой источник – измеритель, ГПИ – генератор произвольного импульса, ОСЦ – осциллограф. ИЦИИ – калибратор-измеритель напряжения и силы тока и предназначен для воспроизведения и измерения напряжения и силы постоянного тока, а также для измерения сопротивления. ГПИ предназначен для формирования сигнала и управления источниками излучения, подаваемого на ФПУ (возможность задавать частоту, длительность и форму сигнала от ИЛИ). ОСЦ предназначен для измерения характеристик выходного сигнала с ФПУ и контроля формируемого сигнала ГПИ. ИВЦ обеспечивает управление комплексом с помощью персонального компьютера для визуализации, обработки и передачи результатов измерений в локальной компьютерной сети. Для комплекса возможно использование разработанного программного обеспечения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для измерения основных фотоэлектрических параметров и характеристик ФПУ был разработан мультиспектральный лазерный источник излучения видимого и ближнего инфракрасного диапазонов спектра, который вошел в состав автоматизированного испытательного комплекса для тестирования перспективных видов полупроводниковых фотоприемников. Методики измерения параметров полупроводни-

ковых фотоприемников разработаны в соответствии с ГОСТ-17772-88 «Приемники излучения полупроводниковые фотоэлектрические и фотоприемные устройства».

Данный комплекс можно использовать в образовательных и научно-исследовательских целях. Новые технические решения, используемые при создании комплекса, позволят отечественным разработчикам и производителям фотоприемных устройств анализировать свойства новых полупроводниковых материалов, эффективно оценивать параметры разрабатываемых приборов, что является актуальным для обеспечения конкурентоспособности отечественной оптоэлектронной базы на рынках СНГ и мира.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Твердотельная фотоэлектроника. Современное состояние и прогноз развития (обзор к 50-летию факультета физической и квантовой электроники Московского физико-технического института) / Бурлаков И.Д. [и др.] // Успехи прикладной физики. - 2014. - Т. 2. - № 5. - С. 509 – 513.
2. Кремниевый фотоумножитель. Новые возможности / С. Клемин [и др.] // ЭЛЕКТРОНИКА: Наука, Технология, Бизнес. - 2007. - № 8. - С. 80–86.
3. Атгухов А.А. Автоматизированный стенд для измерения параметров фоточувствительных структур ультрафиолетового диапазона / А.А. Атгухов [и др.] // Приборы и техника эксперимента. – 2010. - № 3. – С. 159–160.
4. Патрашин А.И. Исследование метода измерения квантовой эффективности и темнового тока фоточувствительных элементов матричных ФПУ/ А.И. Патрашин [и др.] // Успехи прикладной физики. – 2013. – № 1. – С. 69–74.
5. Исследование характеристик фотодиода: методические указания к лабораторным работам / Московский государственный институт электроники и математики. Кафедра «физические основы электронной техники»: сост. Ю.А. Мома, В.Н. Тюшагин (рец. А.П. Лысенко, О.Д. Кнаб) – Москва: МГИЭМ, 2003.
6. Балиев Д.Л. Автоматизированный стенд для измерения основных параметров МФПУ на основе InGaAs / Д.Л. Балиев [и др.] // Прикладная физика. – 2014. - № 6. – С. 93–98.
7. Приемники излучения полупроводниковые. Фотоэлектрические и фотоприемные устройства. Методы измерения фотоэлектрических параметров и определения характеристик: ГОСТ 17772-88. – Взамен ГОСТ 17772-79: введ. в РБ 30.06.1989. – Минск: Беларус. гос. ин-т стандартизации и сертификации, 2013. – 65 с.

МОДИФИКАЦИЯ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ КРЕМНИЯ И СТЕКЛА ИОННО-ЛУЧЕВЫМ РАСПЫЛЕНИЕМ ТИТАНА И КОБАЛЬТА

О. М. Михалкович¹, С. М. Барайшук², О. Г. Бобровиц³

¹⁾ *Белорусский государственный педагогический университет имени Максима Танка, ул. Советская, 18, 220050 Минск, Беларусь, e-mail: phyzbobber@tut.by*

²⁾ *Белорусский государственный аграрный технический университет, пр. Независимости, 99, 220023 Минск, Беларусь, e-mail: bear_s@yandex.ru*

³⁾ *Белорусский государственный технологический университет, ул. Свердлова, 13а, 220050 Минск, Беларусь, e-mail: olegbobrovich@yandex.ru*

Изучены морфология и гидрофильность поверхности металлических (Ti и Co) пленок на кремнии после облучения ионами He^+ и на стекле осажденных в условиях ассистирования собственными ионами. Показано, что облучения кремния ионами He с энергиями в диапазоне 10–40 кэВ и флюенсе 10^{14} см^{-2} не вызывает изменения мор-