

## Разработка и изготовление автоматизированного комплекса для определения фотоэлектрических характеристик солнечных элементов

В. И. Нуждин, Д. А. Коновалов, В. Ф. Валеев, А. Л. Степанов

Лаборатория радиационной физики, группа информационной безопасности, телекоммуникационных и сетевых технологий, группа нанооптики и наноплазмоники

Разработан и изготовлен автоматизированный комплекс для определения фотоэлектрических характеристик полупроводниковых элементов. Данный комплекс позволяет измерять ток короткого замыкания, напряжение холостого хода, вольтамперную характеристику и оценить оптическую прозрачность солнечных электрических преобразователей в ручном и автоматическом режимах.

В настоящее время основу солнечной энергетики составляют модули солнечных электрических преобразователей (СЭП). Для характеристики СЭП международным сообществом разработан стандарт IEC 60904-9 [1], в котором даются определения параметрам фотоэлектрических модулей и средствам для их измерения. Для определения параметров СЭП выпускаются промышленные дорогостоящие комплексы, состоящие из имитатора солнечного света и измерительного блока с активной нагрузкой, например, такие, как на странице [2]. Подобные комплексы предназначены для характеристики крупногабаритных СЭП размерами до 150×150 мм. Их можно использовать как в производственных, так и в лабораторных условиях. Однако, для изучения опытных компактных образцов СЭП, размеры которых не превышают 10×10 мм применение таких дорогих и громоздких комплексов технически и экономически неоправданно. В настоящей работе приводится описание оригинального разработанного и изготовленного в КФТИ ФИЦ КазНЦ РАН автоматизированного комплекса для измерения фотоэлектрических параметров опытных тонкопленочных образцов СЭП малых размеров. С помощью созданного комплекса реализована возможность измерения в ручном и автоматическом режимах тока короткого замыкания, напряжения холостого хода, вольтамперной характеристики (ВАХ) и оптической прозрачности СЭП. Наличие ручного режима позволяет

использовать комплекс для обучения студентов при выполнении учебных лабораторных работ.

На рис. 1 представлена функциональная схема разработанного комплекса. Под действием потока оптического излучения от стабильного источника света в результате фотовольтаического эффекта на контактах СЭП появляется разность потенциалов – фото-ЭДС, и через сопротивление нагрузки  $R_n$  начинает протекать электрический ток. Значения фото-ЭДС и тока протекающего через нагрузку измеряются, соответственно, вольтметром  $V$  и амперметром  $A$ . Часть светового потока, прошедшая через образец СЭП попадает на фотодиод, служащий

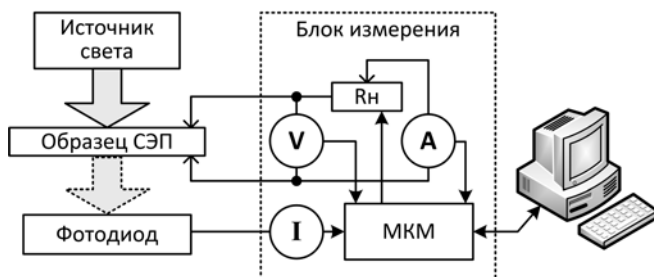


Рис. 1. Функциональная схема автоматизированного комплекса для определения фотоэлектрических характеристик солнечных элементов.

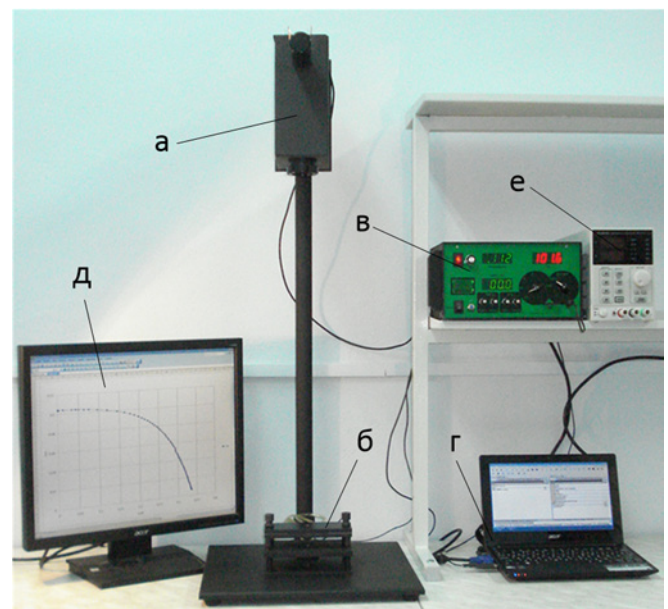


Рис. 2. Фотография автоматизированного комплекса для определения фотоэлектрических характеристик солнечных элементов: (а) – осветительно-проекционная система, (б) – оптический столик для крепления образцов, (в) – устройство измерения фотоэлектрических характеристик СЭП, (г) – компьютер, (д) – монитор, (е) – установка для измерения вольтамперных характеристик полупроводниковых элементов [3].

датчиком для измерения прозрачности образца. Величина пропускание образца измеряется прибором I.

Изменяя сопротивление нагрузки  $R_n$  от бесконечности до нуля, можно определять такие характеристики СЭП, как напряжение холостого хода, ток короткого замыкания, максимальная электрическая мощность, а также вольтамперная и нагрузочная характеристики. Цифровые измерительные приборы V, A и I (рис. 1) содержат в своём составе нормирующие усилители-преобразователи. Электрические сигналы с выходов этих усилителей подаются на входы аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) микроконтроллерного модуля (МКМ). МКМ осуществляет управление сопротивлением нагрузки  $R_n$ , измерением, а также запись значений напряжения и тока автономно или под управлением от компьютера.

На рис. 2 приведена фотография разработанного автоматизированного комплекса. Осветительно-проекторная система (а) расположена на вертикальной штанге над оптическим столиком для крепления образца (б). В качестве источника света используется галогеновая лампа OSRAM 64642 HLX 150 W-24 V G6.35, характеризующаяся сплошным спектром излучения чёрного тела. Охлаждение лампы осуществляется принудительной вентиляцией. Диаметр светового пятна в плоскости анализируемого образца равен 10 мм.

Оптический столик, предназначенный для крепления образца в заданной точке освещения, показан на рис. 3. Он содержит основание 1, нижнюю 2 и верхнюю 3 контактные пластины, между которыми располагается образец 4. Основание и контактные пластины, содержат центрированные отверстия, предназначенные для прохождения света. Под отверстием в основании расположен фотодиод 5 (ФД 24 К) закреплённый прижимным кольцом 6, винтами 7 и закрыт экранирующей крышкой 8. Для термостабилизации фотодиода и анализируемого образца основание и контактные пластины содержат водяные протоки 9, в которые через штуцера 10 подаётся дистиллированная вода определённой температуры. Диэлектрические изоляторы 11 резьбовой частью прикреплены к нижней контактной пластине, а к основанию крепежными винтами 12. Верхняя контактная пластина является съёмной. Прижим

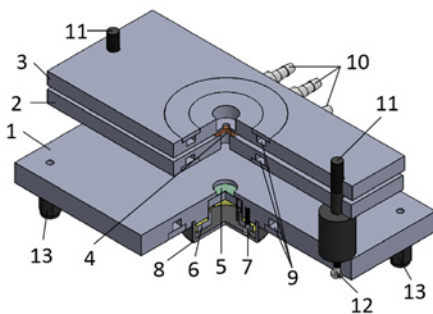


Рис. 3. Оптический столик для крепления образцов: 1 – основание, 2 – нижняя контактная пластина, 3 – верхняя контактная пластина, 4 – образец, 5 – фотодиод, 6 – прижимное кольцо, 7 – винт, 8 – экранирующая крышка, 9 – водяные протоки, 10 – штуцер, 11 – диэлектрический изолятор, 12 – крепежный винт, 13 – ножка.

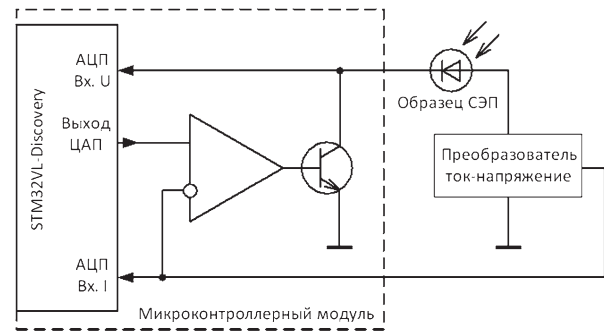


Рис. 4. Упрощённая схема получения ВАХ солнечного элемента.

верхней контактной пластины к образцу осуществляется барашками (не показано). Подсоединение проводников к контактным пластинам, а также к фотоэлементу 5 не показано. Основание снабжено ножками 13.

Устройство измерения фотоэлектрических характеристик СЭП выполнен в отдельном корпусе ((в) на рис. 2) и содержит блок стабилизированного питания источника света, МКМ, три цифровых измерительных прибора с усилителями-преобразователями, жидкокристаллический дисплей (ЖК), органы управления, коммутационные разъёмы, а также слот для карты памяти стандарта SD.

МКМ предназначен для измерения экспериментальных ВАХ СЭП в автоматическом режиме.

В состав МКМ входят:

1. микроконтроллерная отладочная плата STM32VL-Discovery;
2. управляемая нагрузка на базе источника тока управляемого напряжением;
3. графический ЖК индикатор;
4. слот для SD карты.

МКМ работает под управлением микроконтроллерной программы, написанной на языке C. На рис. 4 представлена упрощённая схема измерения ВАХ СЭП с помощью МКМ. Управляющая программа МКМ последовательно устанавливает на выходе ЦАП напряжение от 0 до неко-

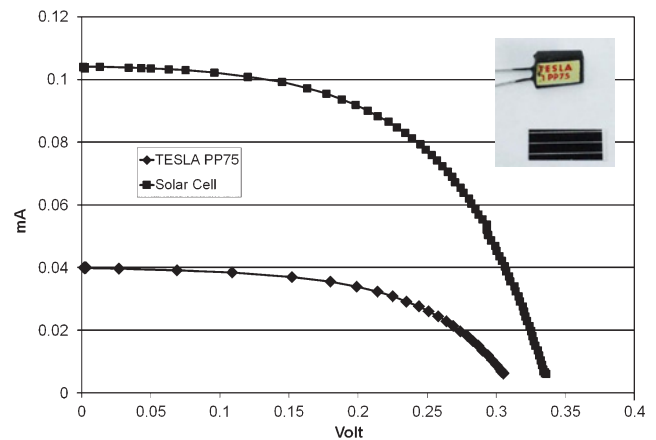


Рис. 5. Результаты измерений ВАХ тестовых фотопреобразователей

того значения (определяется автоматически для каждого конкретного образца), соответствующего току короткого замыкания СЭП и производит опрос входных каналов АЦП. Данные полученные с АЦП пересчитываются в соответствующие физические величины, выводятся на экран ЖК индикатора в виде графика, а также в виде текстовой таблицы передаются в последовательный порт МКМ и записываются в файл на SD карту. Подключение к компьютеру осуществляется с помощью преобразователя USB-RS232. При этом также МКМ может функционировать автономно без подключения к компьютеру и без SD карты.

Созданный оригинальный комплекс имеет следующие технические характеристики:

- диапазон измеряемого напряжения (точность): 0–2 В (1 мВ);
- диапазоны измеряемого тока (точность): 0–20 мкА (0.01 мкА); 0–0.2 мА (0.1 мкА); 0–2 мА (1 мкА);
- точность измерения оптической прозрачности образца: 0.1%;

- диапазон стабилизации температуры оптического столика для крепления образца: от 15 до 35 °С;
- режимы измерения ВАХ: ручной; автоматический под управлением компьютера.

В качестве примера на рис. 5 показаны результаты измерений ВАХ тестовых фотопреобразователей – промышленных фотодиода (TESLA PP75) и солнечного элемента (Solar Cell), полученные с помощью разработанного комплекса.

Работа выполнена при финансировании РНФ № 17-12-01176.

## Литература

1. IEC 60904-9: Photovoltaic devices – Part 9: Solar simulator performance requirements, ed. 2, Publication Date 2007-10-16.
2. <http://sphotronics.ru/catalog/simulyatory-solnechnogo-sveta/solar-iv-series>
3. Коновалов Д.А., Нуждин В.И., Валеев В.Ф., Степанов А.Л.: Создание установки для измерения вольтамперных характеристик полупроводниковых элементов. Казанский физико-технический институт им. Е. К. Завойского 2017. Ежегодник. Казань: КФТИ КазНЦ РАН 2018. с. 96–97.