СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ И АНАЛИЗА ДАННЫХ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОТОПРИЕМНИКОВ И ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.В. Лобанок, И.Д. Щербич, А.С. Семенович, М.А. Павлышко, И.А. Романов

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь E-mail: <u>lobanokMV@bsu.by</u>

На базе монохроматора МДР-12 и микроконтроллера STM32 предложено аппаратное и программное решение для автоматизации измерений фотопроводимости и электролюминесценции. Предложена реализация дистанционного управления и анализа спектральных данных посредством протокола MQTT и микроконтроллера ESP32. Определена спектральная зависимость фототока гетероструктур SiC/Si.

Ключевые слова: микроконтроллеры; гетероструктуры; фототок; беспроводная связь.

Разработка и промышленное производство фоточувствительных многоспектральных приборных структур и ИК-фотоприемников требует проведения промежуточного контроля фотоэлектрических параметров, которые определяют характеристики конечных приборов [1]. Фотодетекторы, функционирующие в фотогальваническом режиме и отличающиеся низкими уровнями темновых токов, а также способностью к самостоятельной работе без внешнего электропитания, представляют особый интерес. Такие фотодетекторы особенно важны для систем, включающих в себя обширные массивы детекторов и использующих беспроводную оптическую связь [1,2].

В работе представлено аппаратно-программное решение для автоматизации системы на базе монохроматора МДР-12, которое позволяет исследовать спектральные зависимости фототока, а также электролюминесценцию. Одна из трудностей в разработке измерительного оборудования для параметров фотоприемников нового поколения заключается в недостатке унифицированных измерительных процедур, пригодных для внедрения в измерительные системы. Данную проблему можно решить, модифицируя существующие методы измерения для фотоприемников, описанные в стандарте ГОСТ 17772-88.

Монохроматор МДР-12 построен по схеме Черни-Тернера. В зависимости от типа измерения оптическая схема измерителя меняется. В случае измерения фотоотклика и фотопроводимости используется следующая схема. Источник света (вольфрамовая лампа СИ6-100, которая излучает пучок света в спектральном диапазоне 0,38-3,5 мкм) через конденсор освещает входную щель монохроматора. Диспергированный свет параболическим объективом и поворотным зеркалом собирается в плоскости выходной щели, а затем попадает на исследуемый образец. Управление поворотным зеркалом происходит с помощью шагового двигателя, управляемого контроллером, а сигнал с образца проходит усиление на операционном усилителе и считывается через АЦП в контроллере STM32. Измерение других фотоэлектрических характеристик происходит по схеме спектрометра, представленной на рис. 1. В качестве детектора используется фотоумножитель ФЭУ-100.



Рис. 1. Структурная схема спектрометра на основе малогабаритного монохроматора

Алгоритм работы спектрометра включает вращение дифракционной решетки шаговым двигателем с заданной скоростью во время сканирования спектра. Достигаемый диапазон измерений составил 0,3-2,0 мкм с шагом 20 нм. Стоит отметить, что спектральное разрешение системы зависит от ширины выходной щели, скорости сканирования и фильтрации. Наличие богатой периферии микроконтроллера STM32F401 позволит в будущем реализовать систему цифровой фильтрации данных методом синхронного детектирования.

Для минимизации внешнего влияния на измерительную систему (засветка, тепловой шум, механические колебания) предложена реализация удаленного управления системой и анализа данных фотоэлектрических характеристик исследуемых структур с помощью аппаратно-программной платформы, представленной на рис. 2, на базе микроконтроллера ESP32 с использованием протокола прикладного уровня MQTT[3]. В используемую схему измерений (рис. 1) был добавлен микроконтроллер ESP32 для реализации беспроводного канала связи с измерительным стендом.

В качестве управляющего модуля выбрана процессорная система на кристалле ESP32, которая при малом энергопотреблении обладает достаточной вычислительной мощностью и богатством периферийных интерфейсов. Система поддерживает весь стек протоколов стандартов Wi-Fi

802.11n и Bluetooth 4.2, обеспечивая дополнительный функционал сопряжения периферийных датчиков через интерфейсы SPI/SDIO или I²C/UART. Кристалл системы включает в себя 32-разрядный процессор Tensilica Xtensa LX6 и контролеры Bluetooth BLE, Wi-Fi которые позволяют подключить разнообразные цифровые датчики (сенсоры) и легко организовать беспроводную связь с использованием доступных интернет протоколов. Для реализации режима синхронизации внутренних часов можно модернизировать протокол сообщения MQTT добавив метку времени отправки пакета для анализа задержи передачи, по аналогии с алгоритмом PTP протокола.



Рис. 2. Структурная схема аппаратной платформы

Для проведения функционального тестирования созданного макета было разработано тестовое программное обеспечение, которое состоит из двух частей: микропрограммы для узловых устройств и программного модуля для локального сервер – брокера MQTT сообщений.

Программные модули созданы на языке программирования «верхнего» уровня C++ с использованием программы-транслятора Visual Code. Для конфигурирования режимов работы модулей с датчиками и внешними устройствами использовались опубликованные на условиях лицензии свободного программного обеспечение (GPL - General Public License) библиотеки сообщества инженеров и радиолюбителей. Локальный Брокер – это открытая реализация Mosquitto Mqtt-Server который легко запускается на любом Raspberry устройстве. В нашем случае сервер был запущен на одноплатном компьютере Raspberry Pi 3. В качестве удалённой облачной системы была использована отрытая платформа HiveMq с возможностью хранения безликих данных эксперимента (бесплатно в течении суток). Эта платформа сможет обеспечивать управление и передачу данных по запросу от специализированного web-сервера для накопления и анализа статистики эксперимента с настроенными профилями [3].

В ходе работы был получен и подвергнут обработке в программе Origin массив экспериментальных спектров фототока для гетероструктур SiC/Si с необходимым разрешением и точностью. На рис. 3 приведена спектральная зависимость фототока гетероструктуры SiC/Si, полученной методом быстрой вакуумно-термической обработки кремния [1].



Рис. 3. Спектральная зависимость фототока гетероструктуры SiC/Si, полученная с помощью платформы HiveMq

Для определения влияния поглощения в слоях SiC и Si-подложке на спектре представлена аппроксимация функцией с несколькими лоренциалами. Гетероструктура SiC/Si генерирует фототок в диапазоне 650-1000 нм, а изменение генерируемого тока связано с влиянием кремниевой подложки и дефектов на границе раздела [1]. Из анализа следует вывод, что гетеропереход 3C-SiC/Si может быть использован в качестве многоспектрального фотодетектора

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. *М.В. Лобанок, Н.В. Полонский, П.И. Гайдук.* Фотоэлектрические характеристики гетероструктур SiC/Si. Журнал прикладной спектроскопии. 2023. №5 (90). С.775-779.
- 2. *N. Youngblood, C. Chen, S. Koester, M. Li.* Waveguide-integrated black phosphorus photodetector with high responsivity and low dark current. Nature Photon 2015; (9): C. 247-252.
- 3. Семенович А.С. Масштабируемый ІоТ тренажер спортсмена. Сборник научных работ студентов Республики Беларусь «НИРС 2020». С. 143-144.