

АВТОМАТИЗАЦИЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СПЕКТРОВ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ НА БАЗЕ ПЛАТФОРМЫ NETDUINO

© 2022 г. А. Л. Филатов^{а,*}, О. А. Бышевский-Конопко^а, Н. Г. Яременко^а,
М. В. Карачевцева^а, Е. М. Кораблев^а

^а Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН
Россия, 141190, Фрязино Московской обл., пл. Введенского, 1

*e-mail: a.filatov@fireras.su

Поступила в редакцию 05.08.2021 г.

После доработки 26.08.2021 г.

Принята к публикации 02.09.2021 г.

Предложена и реализована система автоматизации спектрального комплекса на базе монохроматора МДР-23 с использованием платы Netduino 2. При разработке программного обеспечения использовались следующие пакеты: Microsoft Visual Studio, SDK.NET Micro Framework и Netduino SDK. Для решетки 1200 штрихов/мм при максимальной скорости развертки спектра 28 нм/мин шаг позиционирования составляет 0.2 нм. Созданная система автоматизации применялась при проведении спектральных исследований фотолюминесценции широкого класса полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами и для исследования системы оптической связи. Продемонстрирована работоспособность системы и приведены достигнутые параметры.

DOI: 10.31857/S0032816222010037

Фотолюминесцентная спектроскопия является одним из наиболее информативных методов исследования полупроводниковых гетероструктур с квантовыми ямами. Анализ спектров фотолюминесценции с привлечением современных теоретических моделей позволяет получить сведения о многих фундаментальных свойствах гетероструктур: о зонной структуре, об энергии двумерных состояний и их заполнении, о процессах коллективного взаимодействия носителей, о процессах дефектообразования и т.д. [1, 2]. В наших работах фотолюминесцентные исследования гетероструктур проводились с помощью автоматизированного спектрального комплекса на базе монохроматора МДР-23, спектральный диапазон которого (0.2–2 мкм) достаточен для изучения широкого класса полупроводниковых материалов.

Для автоматизации спектральных измерений долгое время успешно применялся кейт КАМАК, связанный с персональным компьютером (ПК) с помощью интерфейсной карты стандарта ISA. Затем началось применение микроконтроллерных систем. Так, в статье [3] для сопряжения блока КАМАК с компьютером по шине USB предлагалось вместо интерфейсной карты использовать систему, разработанную на базе микроконтроллера AT89C5131A либо модуля DLP-USB245M. При этом пользователь должен сам определить алгоритм взаимодействия компьютера с контрол-

лером и “защитить” соответствующие микропрограммы в эти устройства, что существенно усложняет программное исполнение работы. В работе [4] приведен пример сопряжения монохроматора МДР-23 и фотоумножителя (ф.э.у.) с компьютером при помощи внешнего модуля E14-440, подключенного по шине USB. Монохроматор оборудован блоком управления шаговым двигателем (БУШД), обеспечивающим скорость поворота решетки примерно 0.1 нм/с, и реперным устройством для считывания длин волн. Программа для ПК в цикле сохраняла в памяти пять оцифрованных аналоговых сигналов с ф.э.у. плюс считанное с цифровых выходов реперного устройства значение номера текущей метки. Минимальный интервал следования меток составлял 1 нм, поэтому предлагаемое техническое решение не может обеспечить необходимую в наших экспериментах точность регистрации длины волны 0.2 нм.

Для автоматизации спектральных установок с монохроматорами МДР-23 [5] и МДР-12 [6] были специально разработаны модули на базе микроконтроллеров ATmega85385 и PIC18F448-IP соответственно, в которых интегрированы 10-разрядные аналого-цифровые преобразователи (а.ц.п.). Для управления шаговым двигателем в этих модулях использовались специально подобранные полевые транзисторы.

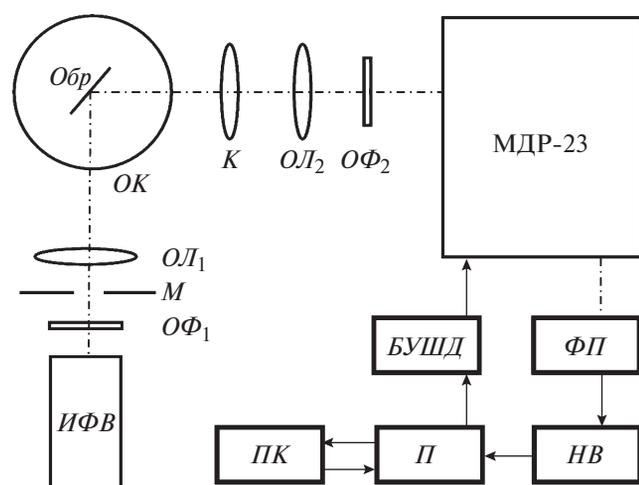


Рис. 1. Блок-схема установки для спектральных измерений фотолюминесценции. ИФВ – источник фото-возбуждения, $ОФ_1$, $ОФ_2$ – оптические фильтры, М – механический модулятор, $ОЛ_1$, $ОЛ_2$ – оптические линзы, Обр – исследуемый образец, ОК – оптический кристалл, К – коллиматор, МДР-23 – монохроматор, ФП – фотоприемник, НВ – селективный нановольтметр Униран 237, П – плата Netduino 2, БУШД – блок управления шаговым двигателем, ПК – персональный компьютер.

В данной работе нами была поставлена задача разработать систему автоматизации на базе платы Netduino 2, использующей микроконтроллер STM32F205RF [7]. Этот микроконтроллер был выбран, в первую очередь, так как в него интегрированы 12-разрядные, а не 10-разрядные а.ц.п. Такое техническое решение позволило расширить динамический диапазон измерений и избежать необходимости переключения коэффициента усиления сигнала во время отдельного измерения. Программировать микроконтроллер STM32F205RF можно как на отладочной плате [8], так и непосредственно в Netduino 2 [9]. В нашем случае было целесообразно использовать Netduino 2, поскольку программисту удобнее писать две программы (одну для микроконтроллера, другую – для интерфейса) в одной среде разработки Microsoft Visual Studio.

Блок-схема спектральной установки, в которой плата Netduino 2 используется для связи монохроматора МДР-23 и фотоприемника с компьютером, приведена на рис. 1. Поворот решетки монохроматора осуществляется четырехфазным индукторным шаговым двигателем ШДР-711 через БУШД по двум сигнальным линиям. На первый из шестнадцати цифровых выходов Netduino 2 подаются периодические П-образные импульсы со скважностью 4. Частота импульсов определяется выбранными скоростью развертки спектра и видом решетки, заданными техническими характеристиками шагового двигателя и синусного ме-

ханизма. БУШД преобразует импульсы в четыре взаимно сдвинутых на четверть периода сигнала, которые усиливаются и подаются на соответствующие обмотки шагового двигателя. Уровень сигнала 0/1 на второй линии задает прямое/обратное направления поворота решетки монохроматора. Автоматическая, обеспечиваемая кнопочным интерфейсом БУШД, скорость развертки спектра для решетки 1200 штрихов/мм находится в пределах от 0.2 до 40 нм/мин в режиме измерений и до 80.0 нм/мин в режиме быстрого поворота дифракционной решетки при ее возврате в исходное положение. Опытным путем было определено, что при скорости, большей 30 нм/мин, возникает расхождение между расчетной и фактической длинами волны излучения на выходе монохроматора. Один аналоговый порт Netduino 2 используется для оцифровки данных с выхода селективного нановольтметра. Прием/передача данных между Netduino 2 и ПК происходит при помощи интерфейсной платы COM-USB адаптера.

На этапе программирования через штатный USB-порт платы из ПК в микроконтроллер Netduino 2 загружается специально подготовленная циклически работающая программа, осуществляющая следующие операции: прием/передачу данных по UART, управление двумя цифровыми и одним аналоговым портом. В процессе работы, приняв команду о начале измерения, которая содержит информацию о направлении поворота решетки монохроматора, скорости развертки спектра и количестве измеряемых точек N , плата Netduino 2 устанавливает уровень 0/1 на вторую линию управления БУШД, после чего N раз в цикле генерирует рассчитанное количество П-образных импульсов, выполняет а.ц.п.-преобразование сигнала с аналогового порта и передает полученный результат в ПК.

Вид экрана ПК при работе программы для регистрации спектров фотолюминесценции представлен на рис. 2. В верхней части экрана расположены элементы, с помощью которых задаются параметры измерения спектров: начальная и конечная длины волны, тип и направление поворота дифракционной решетки, шкала усиления нановольтметра. При начале цикла измерений программа вычисляет количество измеряемых точек, посылает соответствующие управляющие команды в Netduino 2, после завершения измерений получает результаты измерений и рисует график. Длина волны на выходе монохроматора зависит от типа решетки: для решетки 1 (1200 штрихов/мм) она соответствует показаниям счетчика, для решетки 2 (600 штрихов/мм) показания счетчика нужно умножать на два. Диапазон оси ординат от 0 до 4097 соответствует полному диапазону 12-разрядного а.ц.п. Перед запуском измерения (кнопка “Старт”) необходимо вручную с помощью кнопочного интерфейса БУШД установить

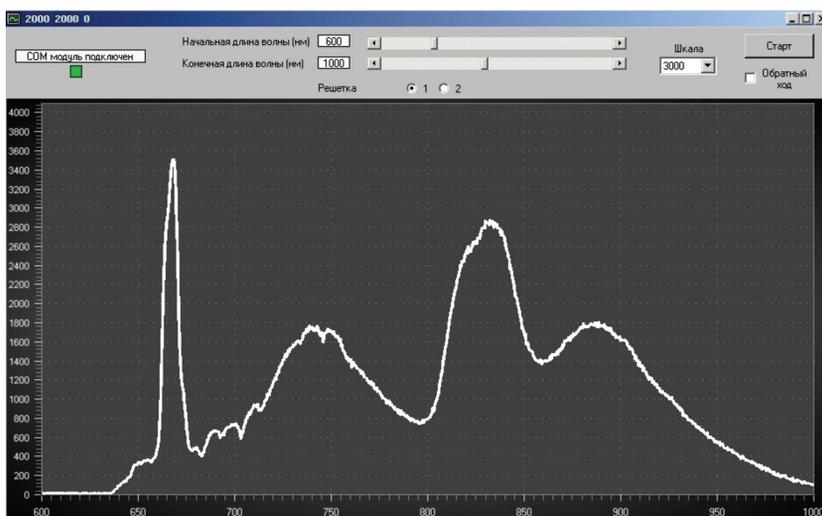


Рис. 2. Вид экрана ПК при завершении программы для регистрации спектров.

показание счетчика монохроматора в соответствии с начальным значением: начальная длина волны — для прямого хода, конечная — для обратного. После завершения измерения каждого спектра рекомендуется проверить соответствие заданного финального значения длины волны по показанию счетчика монохроматора. Спектр разворачивается со скоростями 28 нм/мин и 14 нм/мин соответственно для решеток 1 (1200 штрихов/мм) и 2 (600 штрихов/мм).

Для контроля качества передачи данных в процессе измерения спектра в верхнем левом углу экрана отображаются три числа: первое число — количество уже измеренных точек, второе число — планируемое количество измеряемых точек, третье число — количество точек, данные от которых не поступили. При отсутствии поступивших данных на экране отображается амплитуда сигнала, соответствующая значению при предыдущей длине волны. Цвет верхнего левого квадрата (зеленый/красный) под надписью “СOM модуль подключен” указывает на наличие/отсутствие связи между платой Netduino 2 и ПК. После завершения измерения спектра данные сохраняются в файле. В файл записывается амплитуда сигнала с учетом шкалы нановольтметра, которая до начала измерений выбирается так, чтобы максимальный уровень выходного сигнала превышал половину шкалы а.ц.п.

Разработанная на базе платы Netduino 2 система управления монохроматором МДР-23 предусматривает обработку исходных спектров с помощью программы, позволяющей проводить следующие операции: перестроение на шкалу энергий (для удобства анализа и идентификации полос), исключение фоновой засветки, учет спектральных характеристик монохроматора, фотоприем-

ника и фильтров, нормировку спектров. Созданная система дает возможность полностью использовать функционал монохроматора [10] и может быть полезна разработчикам спектральных систем.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яременко Н.Г., Карачевцева М.В., Страхов В.А. // Доклады Академии наук. 2011. Т. 437. № 3. С. 321.
2. Yaremenko N.G., Strakhov V.A., Karachevtseva M.V. // Semiconductors. 2019. V. 53. P. 1975. <https://doi.org/10.1134/S1063782619150144>
3. Тубольцев Ю.В., Чичагов Ю.В., Хилькевич Е.М., Сумуткин В.Д. // ПТЭ. 2010. № 1. С. 87.
4. Баринев Ю.А. // ПТЭ. 2015. № 4. С. 147. <https://doi.org/10.7868/S0032816215040291>
5. Крамынин С.П., Зобов Е.М., Зобов М.Е. // Журнал прикладной спектроскопии. 2015. Т. 82. № 2. С. 313.
6. Небесный А.Ф., Ашууров М.Х., Нам И.В., Нуритдинов И. // ПТЭ. 2018. № 3. С. 156. <https://doi.org/10.7868/S0032816218030138>
7. https://www.st.com/content/st_com/en/products/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus/stm32-high-performance-mcus/stm32f2-series/stm32f2x5/stm32f205rf.html
8. <https://arduino-master.ru/stm32/stm32-mikrokontroler-dlya-nachinayushhih-posle-arduino/>
9. <http://wiki.amperka.ru/netduino:установка-и-настройка>
10. Филатов А.Л. // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 1. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.01.50452.18432>