

Лукашов А.С., Вдовкин В.А., Трофимова Е.С., Пустоваров В.А.

ПРОГРАММНАЯ И АППАРАТНАЯ МОДЕРНИЗАЦИЯ КОМПЛЕКСА УПРАВЛЕНИЯ УСТАНОВКОЙ ФОТОЛЮМИНЕСЦЕНТОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Аннотация. Описана аппаратно-программная модернизация установки фотолюминесцентной спектроскопии, изготовленной в лаборатории физики твёрдого тела Уральского Федерального университета. Разработан новый аппаратно-программный комплекс управления и рассмотрена элементная база, удовлетворяющая поставленным задачам. Приведены результаты тестов, которые указывают на успешность модернизации. Реализованные технические решения могут быть использованы для автоматизации спектроскопических измерений в различных лабораториях.

Ключевые слова: аппаратно-программный комплекс, установка фотолюминесцентной спектроскопии, трансимпедансный усилитель, шаговый двигатель, интенсивность люминесценции, счетчик импульсов, температурные измерения.

Abstract. The hardware and software upgrade of the custom-built photoluminescence spectroscopy setup, installed in the Laboratory of Solid State Physics in Ural Federal University. A new hardware and software package for managing the installation has been developed and the element base that meets the tasks set has been considered. The results of tests that indicate the success of the upgrade are presented. The implemented technical solutions can be used to automate spectroscopic measurements in various laboratories.

Keywords: hardware and software package, photoluminescence spectroscopy unit, transimpedance amplifier, stepper motor, luminescence intensity, pulse counter, temperature measurements.

Введение

Созданный в лаборатории физики твёрдого тела фотолюминесцентный (ФЛ) спектрометр уже много лет активно используется в учебном процессе и в научной деятельности.

Используемая в настоящее время версия установки была создана в 2008 г. с применением шаговых двигателей (ШД) неоправданно высокой мощности, что при длительной работе приводило к перегреву силовых коммутаторов и к сбоям в работе блока управления ШД. Была поставлена задача модернизации установки путём применения новых аппаратных решений, использования современных маломощных ШД.

Аппаратная часть

На этой установке, собранной с применением отдельных типичных блоков и приборов, возможно проведение измерений следующих спектров:

- фотолюминесценции (область энергий 1,0 – 5,5 эВ);
- возбуждения фотолюминесценции (2,5 – 6,0 эВ);
- отражения (2,0 – 6,0 эВ).

Возможно исследование конденсированных сред, т. е. как твердых тел, так и жидкостей, с применением специальной кварцевой кюветы, вставляемой в криостат вместо кристаллодержателя.

При работе с кристаллами рабочий диапазон температур составляет 80 – 600 К. В качестве источников возбуждения применяются: дейтериевые лампы мощностью 30 или 400 Вт со сплошным спектром излучения в УФ-области, ртутная лампа ДРК–120 с линейчатым спектром, лазер типа ЛГИ–21. Регистрация люминесценции проводится фотоэлектронными умножителями типа ФЭУ–106 или R6358-10, R5208 (охлаждаемый для ИК диапазона) фирмы Hamamatsu, работающими в одноэлектронном режиме.

Стоит отметить, что все измерения проводятся в автоматизированном режиме, управление монохроматором и запись спектра на ПЭВМ осуществляет аппаратно-программный комплекс (АПК), оператор лишь задает параметры записи спектра и условия эксперимента [3].

Результаты модернизации наглядно можно представить на сравнении структурных схем старого варианта установки и нового (рисунок 1).

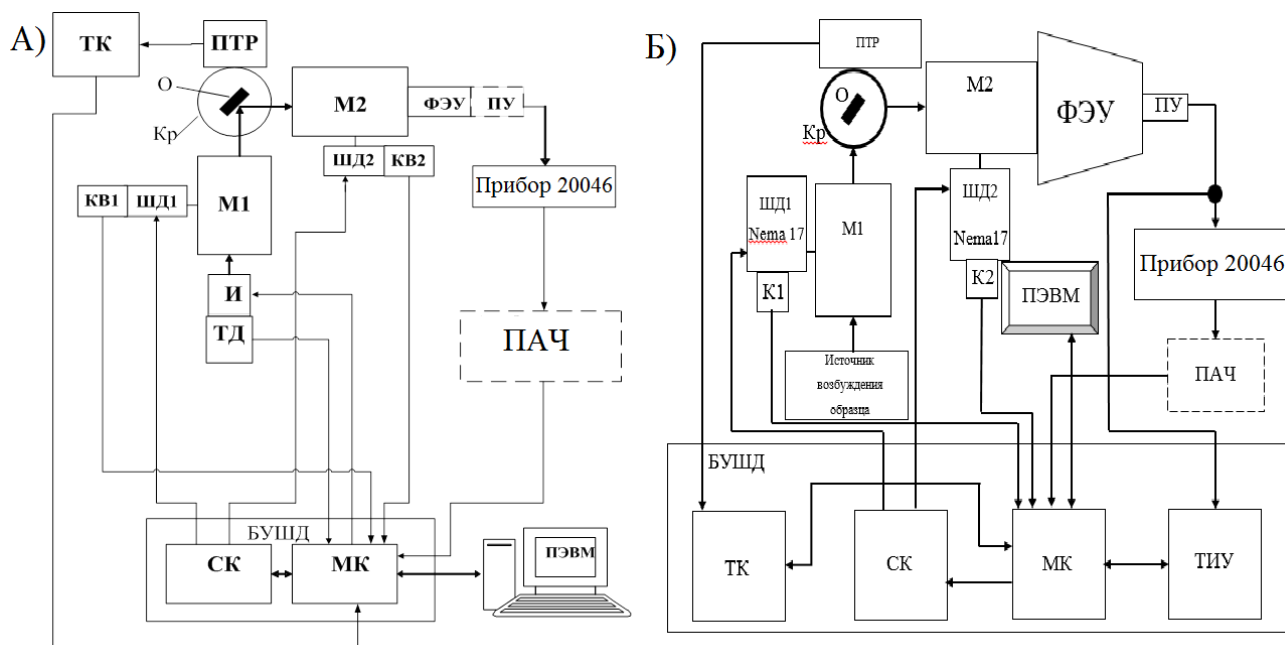


Рисунок 1 – структурные схемы старого (А) и нового (Б) АПК:

ПТР – платиновый терморезистор, О – образец, Кр – криостат, ШД – шаговый двигатель, М – монохроматор, К – концевой выключатель, БУШД – блок управления шаговыми двигателями, И – источник возбуждения, ПАЧ – преобразователь амплитуда-частота, ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, ПУ – предусилитель, ТИУ – трансимпедансный усилитель, МК – микроконтроллер, СК – силовой коммутатор, ТК – плата температурных измерений.

На установке используются два призмённых двойных монохроматора типа ДМР-4. Первый (М1) с кварцевыми призмами используется для выделения длины волны возбуждающего излучения (или при измерении спектра возбуждения люминесценции), а второй (М2) с кварцевыми или стеклянными призмами для выделения длины волны свечения образца (при измерении спектра люминесценции). Данные монохроматоры позволяют проводить измерения в диапазоне длин волн: от 210 нм до 1200 нм для кварцевых призм (обратная линейная дисперсия 10 А/мм в области 250 нм) и от 380 до 1200 нм для стеклянных призм.

В АПК автоматизирован процесс вращения регулировочного барабана при помощи шаговых двигателей, который посредством червячной передачи и рычагов управляет положением призм, тем самым изменяя длину волны. К тому же уже в программном обеспечении (ПО) учитывается, что каждый монохроматор обладает своей градуировочной характеристикой – зависимостью энергии (длины волны) выделяемого излучения от делений барабана монохроматора.

Для вращения барабана монохроматоров ранее использовались шестифазные шаговые двигатели ШД-5Д1М. Как видно из таблицы 1, преимуществом данных двигателей является малый шаг и большой крутящий и статический момент. Однако недостатком этих двигателей является их большая мощность и, следовательно, большое энергопотребление. Использование данных двигателей не оправдано в установке, так как для вращения барабанов монохроматоров требуется небольшой крутящий момент (приблизительно 500 гс·см). Следовательно, шаговые двигатели нуждались в замене на менее мощные.

Во время постановки задачи были предъявлены требования к новым ШД. Они должны обеспечивать достаточный крутящий момент для вращения барабана монохроматора (более 500 гс·см), при этом они должны потреблять малую мощность и иметь небольшие габаритные размеры. Шаг угла поворота двигателей должен быть не более 3 градусов. Кроме того, двигатели должны быть достаточно распространены, недороги и универсальны для замены в случае выхода из строя или аналог в случае нехватки мощности двигателя. Исходя из этих требований был выбран ШД из ряда NEMA-17.

Для регистрации люминесценции обычно используется высокочувствительный ФЭУ Hamamatsu R6358-10. Так как ФЭУ работает в одноэлектронном режиме, для подсчета импульсов с ФЭУ используется радиометр «Robotron 20046». Работа радиометра сводится к подсчёту одноэлектронных импульсов от ФЭУ при непрерывной записи спектра. При использовании импульсного источника света из-за очень большой интенсивности в импульсе ФЭУ переходит в токовый режим, и радиометром регистрируется один импульс очень большой амплитуды. Поэтому в таком режиме анализатор импульс-

Таблица 1 – Сравнение старых и новых шаговых двигателей

Параметр	ШД-5Д1М	NEMA-17
Напряжение питания, В	48 (+4,8/-7,2)	12
Ток в обмотке, А	3	1,2
Единичный шаг, градус	1,5	1,8
Макс. статический момент, гс·см	>4000	2500
Макс крутящий момент, гс·см	>1000	2500

ных амплитуд показывает частоту следования импульсов, и становится

непригоден для измерений. Для таких случаев был разработан преобразователь амплитуда-частота (ПАЧ), который в качестве входной информации брал выходной импульс усилителя прибора 20046, амплитуда которого была пропорциональна интенсивности люминесценции. Получаемые импульсы выравнивались по амплитуде, и с помощью схемы преобразования напряжение-частота переводились в последовательность прямоугольных импульсов с частотой, пропорциональной амплитуде входного напряжения. Чтобы «поймать» импульс в максимуме кинетики в схеме перед преобразователем стоит устройство выборки-хранения (УВХ). После выхода напряжения с усилителя приходил сигнал с амплитудного дискриминатора, который служил для открытия аналогового ключа для пропуска напряжения на преобразователь. Данная схема предназначалась для работы при частоте возбуждающего импульса не более 100 кГц, так как постоянная времени УВХ составляла 10 мс.

Схема позволяет также проводить и температурные измерения. Как видно из рисунка 1, в новом АПК, благодаря современной электронной базе, появилась возможность отказаться от дополнительной платы температурных измерений. Общая схема включения терморезистора по четырехпроводной схеме в измерительный мост осталась прежней и представляет из себя измерительный мост (Уитсона). Сам сигнал с измерительного моста идёт на аналогово-цифровой преобразователь (АЦП) единственного микроконтроллера в АПК, в отличие от предыдущего варианта, когда аналоговый сигнал предварительно обрабатывался дополнительным контроллером.

В качестве силовых коммутаторов (СК) были выбраны микросборки с драйверами А4988 производства Allegro. Драйвер выполнен на Н-мосту, который позволяет управлять вращением двигателя как в прямом, так и в обратном

направлении. Ключи в мосту выполнены на полевых транзисторах с изолированным затвором, открытие которых осуществляется зарядовым насосом. Схема не обладает отдельным механизмом форсирования двигателей, так как ее работа заключается в подаче максимального напряжения (напряжение питания 12 В) на двигатели, путем открытия ключей. Ключи открываются на определенное время, задаваемое длительностью заполнения ШИМ-сигнала. Сигнал формируется, исходя из напряжения на токочувствительном резисторе, падение напряжения на котором зависит от тока в обмотках двигателей. Выбранные микросборки удобны тем, что имеют в составе переменный резистор, регулируя который, можно достаточно просто задавать номинальный ток, необходимый двигателю для вращения. Этот резистор является плечом делителя, отвечающего за опорное напряжение, с которым сравнивается напряжение на токочувствительных резисторах.

Для управления комплексом и связи с персональным компьютером был выбран микроконтроллер (МК), основные характеристики которого приведены в таблице 2. Было принято решение выбрать распространенные и недорогостоящие контроллеры серии STM32 на ядре ARM Cortex-M3. Выбранный контроллер STM32F100RBT6B установлен на отладочной плате с предварительно установленными необходимыми элементами, таких как кварцевые резонаторы, обвязка по питанию, функциональные кнопки и прежде всего встроенный отладчик ST-link V1. Такая сборка позволит отлаживать ПО МК не отключая ее от АПК, что сделает настройку и отладку работы всего АПК быстрой и удобной, а встроенная кнопка «reset» позволит перезагрузить контроллер вручную в случае критической ошибки или сбоя.

Таблица 2 – Основные характеристики МК

Параметр	Значение
Разрядность АЦП	12
Время преобразования АЦП, мкс	1,2
Максимальное оцифровываемое напряжение, В	3,3
Разрядность счетчика	16
Максимальная скорость счета, имп/с	$24 \cdot 10^6$
Число свободных портов ввода-вывода	53

Помимо стандартных портов микросборка имеет выходы питания на 5 и 3,3 В, что удобно для организации логического питания или ограничителей напряжения для защиты линий АЦП, что и было реализовано в данном проекте.

Питание всей установки и МК, в частности, осуществляется от компьютерного блока питания мощностью 200 Вт. Для питания МК достаточно

подвести 5 В питания к соответствующему выводу микросборки, стабильность питания обеспечивают уже установленные на сборку стабилизаторы и конденсаторы.

Монтаж микросборки на плату осуществляется за счет соединения вилка-розетка стандартными штырьковыми разъемами 2,54 мм (вилка распаяна на плате МК, а розетка на плате АПК). Таким образом плату можно быстро заменить на новую в случае ее выхода из строя либо поставить на ее место плату с другим МК, с учетом того, что для такого-же форм-фактора будет выполнена ее трассировка с соответствием выводов АПК и портов ввода-вывода нового МК.

Для связи с ПЭВМ используется интерфейс USB в режиме virtual COM-port, который для условий лаборатории ФТТ обладает достаточной помехозащищенностью (современные USB-кабели экранированы, а протоколы улучшены для повышения помехозащищённости). Это позволит избавиться от предыдущего решения гальванической развязки и использования интерфейса «токовая петля» с преобразователем токового сигнала на стороне ПЭВМ.

Гальваническая развязка осуществляется с помощью универсальной схемы ADuM1201 (DD2), которая удобна тем, что помогает развязать 2 линии связи (RX, TX) и питание и занимает намного меньше места, чем оптопара с резисторами. Кроме того, она обладает прямым и обратным каналом, что сказывается на удобстве подключения, а из-за наличия независимого питания позволяет преобразовывать уровни сигналов (например, 3,3 и 5 В).

Так как отладочная плата имеет только UART-интерфейс, то для связи с ПЭВМ после устройства гальваноразвязки включен преобразователь UART-USB на микросборке с чипом CP2102 и интегрированным micro-usb портом.

Согласно вышесказанному, была разработана принципиальная схема АПК. Предыдущая схема была избавлена от дополнительного МК и, как следствие, от неиспользуемых интерфейсов и линий связи. Схему можно разделить на 4 части: три измерительных тракта: тракт измерения частоты аналитических сигналов с прибора 20046, тракт температурных измерений и тракт измерения тока ФЭУ; другая часть схемы содержит в себе МК, который обрабатывает полученную информацию с каждого измерительного тракта и управляет режимом температурных измерений, а также усилением сигнала с ТИУ; далее располагается узел связи – гальваноразвязка с ПЭВМ с помощью схемы ADuM1202 и преобразователя интерфейсов USB-UART; затем идут СК – драйверы ШД, управляемые непосредственно МК. Для реализации захвата двигателей при данном решении невозможно выборочно подать напряжение на какую-либо обмотку ШД, поэтому захват-освобождение двигателей осуществляется управляемой подачей напряжения питания на СК. Фотография изготовленного АПК представлен на рисунке 2.

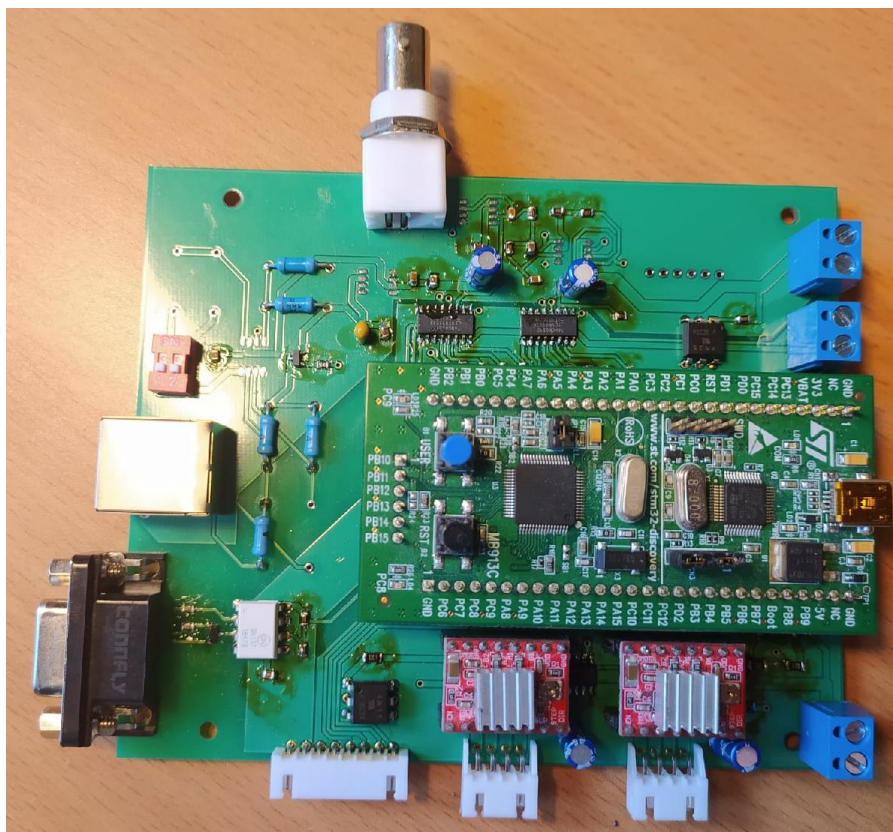


Рисунок 2 – Фотография изготовленной платы

Программная часть

Управление всей установкой осуществляется непосредственно с персонального компьютера при помощи специально созданного программного обеспечения LumDrive. Данная программа написана на языке C++ с использованием технологии MFC (Microsoft Foundation Class) в среде MS Visual Studio 2005. Программа использует многодокументный интерфейс (MDI), позволяющий просматривать одновременно несколько отснятых спектров. Выходной формат файлов – текстовый, совместим с программой Origin версии 6.0 и выше. В выходном файле сохраняются также все параметры эксперимента.

Программное обеспечение (ПО) позволяет вводить основные установочные параметры при записи спектра: время экспозиции в точке, диапазон измерения, число шагов ШД, а также отображает записываемый спектр на мониторе и автоматически сохраняет в текстовый файл формата *.dat. К тому же, в программе уже учитываются, градуировочные характеристики каждого монохроматора, что позволяет точно перевести деление барабана монохроматора в энергию (длину волны).

В состав программы входят: основная программа управления установкой LumDrive.exe; динамическая библиотека Protocol.dll, реализующая протокол связи ПЭВМ и контроллера БУШД. Написана с использованием технологии API; программа Terminal.exe, являющаяся простым интерфейсом пользователя к

библиотеке Protocol.dll, и позволяющая передавать и принимать произвольные блоки данных с использованием этого протокола. Удобна для отладки как контроллера, так и основной программы LumDrive.exe; калибровочные файлы монохроматоров svl-quartz.dmr и sl-quartz.dmr, содержащие их градуировочные характеристики (см.п. 1.1.3); стандартные библиотеки, необходимые для функционирования программы. Внешний вид программы LumDrive представлен на рис. 3.

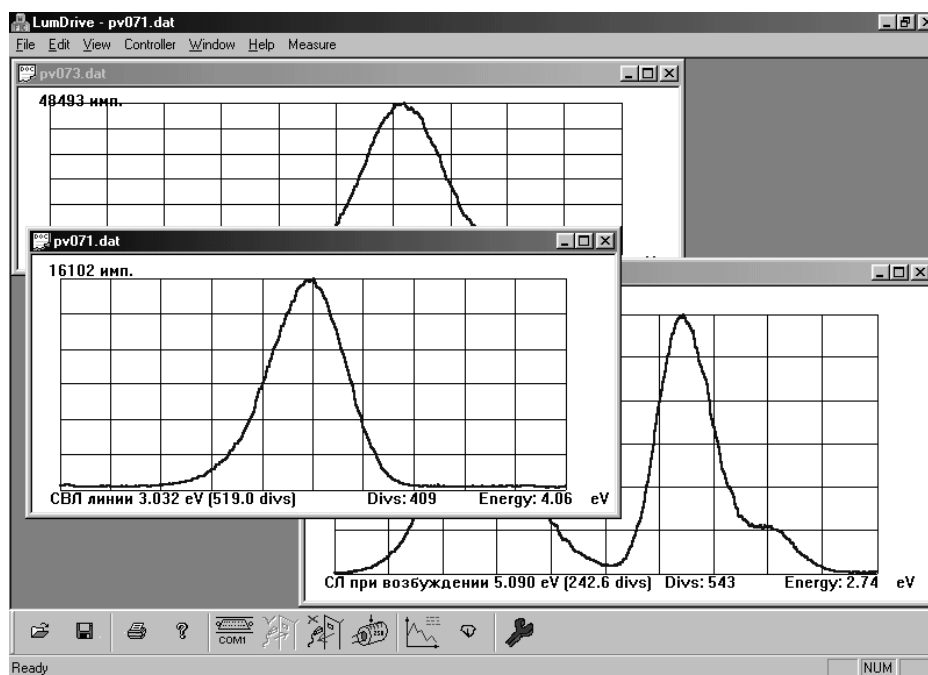


Рисунок 3 – Внешний вид программы LumDrive

Меню Controller содержит инструменты настройки контроллера:

Пункт Port позволяет выбрать COM-порт, к которому подключен контроллер.

Пункты Connect и Disconnect служат для открытия и закрытия порта.

Пункт Motor position позволяет задать начальное положение барабанов монохроматоров.

Меню Measure содержит инструменты проведения измерений:

Пункт Measure tasks вызывает список заданий на измерения. Заполнив требуемые параметры экспериментов, можно создать список спектров, которые необходимо записать, и они будут записаны без дальнейшего вмешательства экспериментатора. Это удобно для проведения серии измерений, хотя можно записывать спектры и по одному.

Пункт Direct Drive активизирует режим прямого управления контроллером. В окне Direct Drive непрерывно отображается интенсивность люминесценции на данный момент, и есть средства вращения двигателей, что можно использовать для предварительного сканирования спектра перед измерениями.

Пункт Temperature Measurements вызывает окно записи температурных зависимостей.

Пункт Termometer вызывает окно, в котором отображается текущая температура образца.

Пункт Parameters вызывает окно, в котором задаются различные параметры, как программы, так и установки. Параметры хранятся в системном реестре по адресу HKCU\Software\Solid_State_Physics_lab\LumDrive\Parameters.

Все пункты меню продублированы соответствующими кнопками на панели инструментов внизу экрана.

При старте записи спектра открывается окно документа, в котором отображается система координат и в ней постепенно (по мере записи) вырисовывается уже записанная часть спектра, которая автоматически масштабируется в случае необходимости.

Из основных изменений программы стоит отметить изменение уравнения преобразования напряжения измерительного моста в температуру, что обусловлено увеличением разрядности АЦП нового микроконтроллера относительно старого.

Проведение тестов и контрольных испытаний

В процессе тестирования и последующей эксплуатации установки проведены контрольные измерения, подтвердившие соответствие всех разработанных блоков требованиям технического задания. Работа комплекса была успешно протестирована путём измерения спектров ФЛ и возбуждения ФЛ различных образцов с требуемой воспроизводимостью. Выбор числа шагов определяется необходимым спектральным разрешением, минимальный шаг для монохроматора М1, имеющего нелинейную дисперсию, составляет 0,25 нм/шаг (в области ~250 нм), для М2 – 0,05 нм/шаг в области 550 нм, что достигается применением редуктора, изготовленного на 3D принтере.

В качестве демонстрации работоспособности установки были проведены измерения спектров люминесценции (СЛ) и возбуждения люминесценции (СВЛ), а также термозависимости люминесценции (ТЗЛ) для образца $Gd_xY_{2.97-x}Ce_{0.03}Al_2Ga_3O_{12}$ ($x=1.19$) при комнатной температуре и температуре жидкого азота, все они представлены на рисунке 4.

Как видно из рисунка 4, зависимость люминесценции от температуры монотонно возрастает от температуры 100 К до 300 К, а затем начинает постепенно падать. Спектр люминесценции представляет из себя широкую полосу на 2,2 эВ, которая при понижении температуры до 100 К расщепляется на две полосы с разной интенсивностью. Спектр возбуждения люминесценции имеет одинаковую форму при любой температуре и представляет из себя две полосы на 2,6 и 3,6 эВ,

которые различаются интенсивностью. Все результаты такие как температура, интенсивность и энергия были получены только при помощи аппаратнопрограммного комплекса.

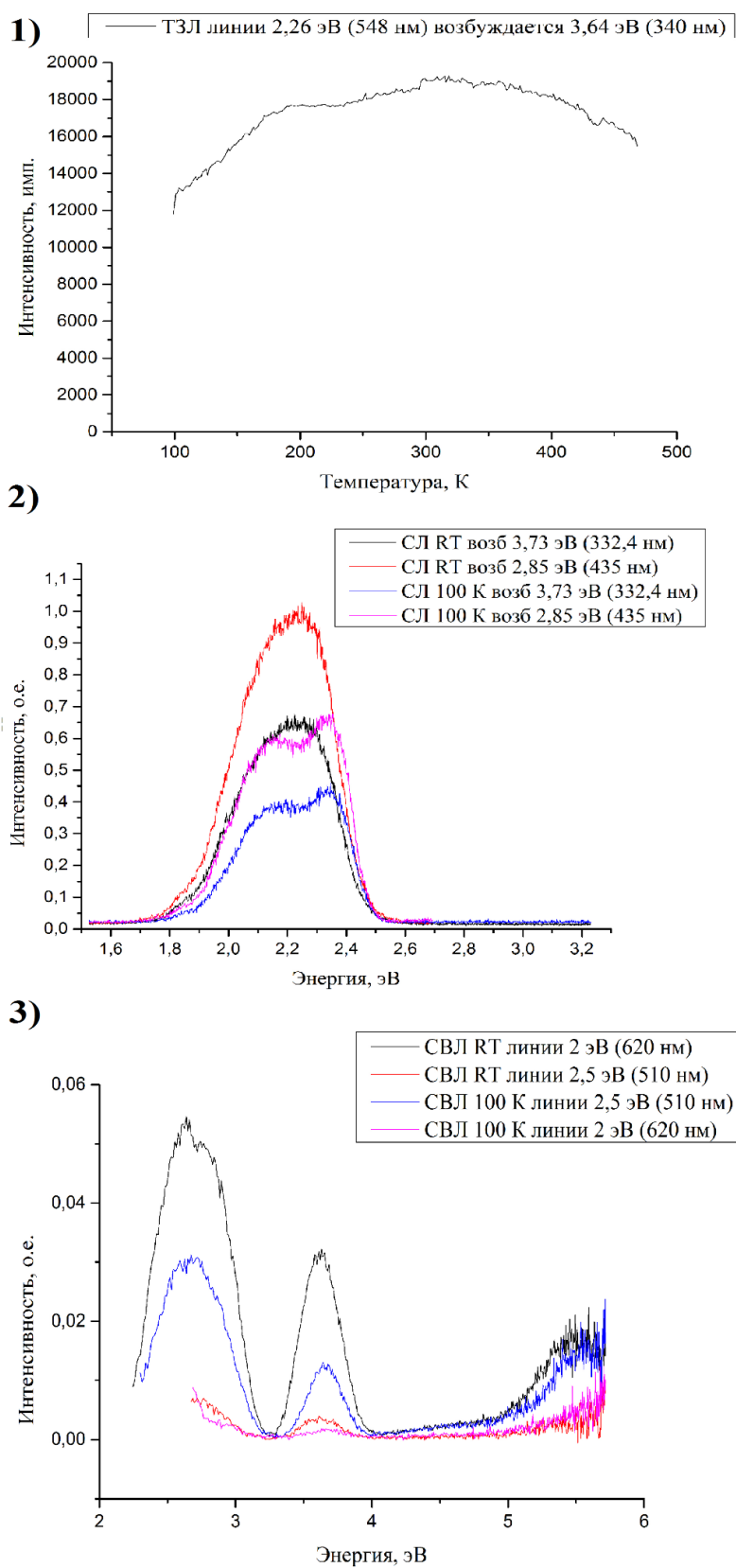


Рисунок 4 – результаты, полученные при помощи нового АПК

Заключение

Кроме научной работы на данной установке проводится лабораторный практикум по курсу физики твёрдого тела. Работа установка была проверена при проведении этого практикума в «жестком режиме эксплуатации»: порядка 10 бригад студентов в неделю в течение 4 недель. Лабораторный практикум подразумевает запись студентами большого числа спектров с разными параметрами. В ходе практикума с применением модернизированного оборудования установка работала стабильно, без сбоев, что подтвердило достаточную степень помехозащищённости линий связи и надёжность изготовленного оборудования.

В результате работы были решены следующие задачи:

- практически полностью изменена элементная база АПК на более новую, что позволило: уменьшить электрическую потребляемую мощность шаговых двигателей, устранить тем самым перегрев блока управления, повысить надёжность работы оборудования;
- изменена программа LumDrive для работы с новым АПК;
- разработан полный комплект технической документации на все разработанные устройства: электрическая принципиальная схема АПК, файлы с исходными кодами программы и МК, перечень используемых элементов и данные по ним;
- проведены контрольные тестовые измерения в разных режимах, подтвердившие соответствие всех разработанных блоков АПК требованиям технического задания.

Библиографический список

1. Рентюк В. Шаговые двигатели и особенности их применения / В. Рентюк // Компоненты и технологии. – 2013. – № 10. – С. 71–78.
2. A4988 Carrier Datasheet // Robotshop. – URL: <https://www.robotshop.com/media/files/pdf/datasheet-1182.pdf> (date of access: 23.09.2021).
3. STM32F100RBT6B Reference Manual // STM. – URL: https://www.st.com/resource/en/reference_manual/cd00246267-stm32f100xx-advanced-arm-based-32-bit-mcus-stmicroelectronics.pdf (date of access: 12.07.2021).
4. Пустоваров В. А. Люминесценция твёрдых тел : учеб. пособие / В. А. Пустоваров. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2017. – 128 с. – URL: <http://elar.urfu.ru/handle/10995/48987> (дата обращения: 12.05.2021).
5. Горшков Б. Л. Семинар Analog Devices. Методы практического конструирования при нормировании сигналов с датчиков / Б. Л. Горшков, В. И. Силантьев. – Москва : АВТЕКС, 1999 – 311 с.