

А. И. ВОРОБЕЦ, к. ф.-м. н. Г. И. ВОРОБЕЦ,  
д. ф.-м. н. С. В. МЕЛЬНИЧУК

Украина, Черновицкий национальный университет им. Юрия Федьковича  
E-mail: vgeorge@chnu.cv.ua

Дата поступления в редакцию  
10.11.2005 г.  
Оппонент В. Г. ЮРЬЕВ  
(ЦКБ "Ритм", г. Черновцы)

## ОПТИМИЗАЦИЯ АППАРАТНО-ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ СПЕКТРОФОТОМЕТРА СФ-20

*Относительная погрешность электронного тракта измерения оптических параметров < 0,025%; время полного цикла измерения оптического спектра пропускания в диапазоне 0,19...2,5 мкм не превышает 20 мин.*

Спектрофотометр СФ-20 предназначен для измерения коэффициента пропускания и оптической плотности химических растворов и кристаллических сред в диапазоне длин волн 0,185...2,5 мкм. В приборе используется двухлучевая оптическая схема измерений, которая состоит из опорного и измерительного оптических каналов и позволяет учитывать оптическое пропускание атмосферы в исследуемом волновом диапазоне. Незначительная модернизация механической части измерительного канала позволяет практически одновременно измерять как спектры пропускания, так и отражения. Эти особенности данного прибора обеспечивают уникальные возможности для его применения при комплексном исследовании параметров полупроводниковых соединений  $A^2B^6$ ,  $A^3B^5$  и барьерных структур на их основе, используемых в качестве элементов волоконно-оптических систем связи с низкими потерями и большой шириной полосы пропускания в диапазоне 0,4...1,8 мкм [1].

Предложенное в [2] устройство сопряжения позволяет полностью автоматизировать процесс измерений при подключении СФ-20 к IBM PC. Однако практическая эксплуатация устройства сопряжения показывает, что отдельные функции, предусмотренные схемотехническим и программным решением, хотя и расширяют возможности управления прибором, но используются крайне редко. Так, практически не используются переключатели скорости развертки спектра и прокрутки бумаги встроенного самописца. Калибровку по стопроцентной линии пропускания, режимы «многократного» измерения спектра и быстрой «прокрутки» спектрального диапазона можно эффективнее реализовать, используя исключительно коммутацию кнопок запуска прямого, обратного хода и остановки развертки спектра при непрерывном измерении текущего значения длины волны. Аналогично на уровне управляющего программного обеспечения реализован режим поиска и установки начального значения длины волны измеряемого спектрального диапазона.

Поэтому целью данной работы была оптимизация аппаратно-программного обеспечения для упрощения схемотехнического решения устройства сопряжения и повышения точности измерений.

Для измерения аналоговых сигналов длины волны  $\lambda$ , коэффициентов оптического пропускания  $T$  и поглощения  $D$  в приборе использованы встроенные механические преобразователи угла поворота движка резистивного делителя в соответствующие значения сопротивления и напряжения. Номинальные значения сопротивлений резистивных делителей для трех диапазонов  $\lambda$  ( $\lambda_1=186...340$  нм,  $\lambda_2=340...800$  нм,  $\lambda_3=800...2500$  нм) составляют 10 кОм и для оптических параметров — 4 кОм. Для их питания целесообразно использовать источник постоянного напряжения  $U_0=5$  В. Это позволяет согласовать величину измеряемого сигнала с динамическим диапазоном 12-разрядного аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) последовательного типа ADS7822P. Чувствительность входного каскада данного АЦП оказывается достаточной для прямого измерения сигналов  $\lambda$  и  $T$  в различных диапазонах без применения дополнительных усилительных каскадов.

Согласно численным оценкам, в первом волновом диапазоне изменение  $\lambda_1$  составляет  $\Delta\lambda_1=\lambda_{\max}-\lambda_{\min}=154$  нм. Разрешающая способность резистивного делителя  $R_1=10$  кОм в этом диапазоне составит  $\delta_{R_1}=R_1/\Delta\lambda_1=64,94$  Ом/нм, что соответствует чувствительности по напряжению  $\delta_{U_1}=U_0/\Delta\lambda_1=32,5$  мВ/нм. Учитывая, что диапазон измеряемых напряжений используемого АЦП также составляет 5 В, а точность преобразования ограничена половиной значения младшего разряда [3, 4], то погрешность АЦП при измерении напряжения находится в пределах  $\Delta_{\text{АЦП}}=\pm 0,6$  мВ. Полученное значение теоретически обеспечивает абсолютную погрешность в измерении  $\lambda_1$  не хуже  $\Delta_1=0,037$  нм. В то же время погрешность используемого в приборе механического датчика  $\lambda$  составляет  $\Delta_{M1}=\pm 0,1$  нм. Для второго ( $\lambda_2$ ) и третьего ( $\lambda_3$ ) диапазонов, а также для коэффициента пропускания  $T$  ( $\Delta T=1...100\%$ ) соответственно получим значения  $\delta_{U_2}=10,9$  мВ/нм,  $\Delta_2=0,11$  нм;  $\delta_{U_3}=2,9$  мВ/нм,  $\Delta_3=0,4$  нм;  $\delta_{U_T}=0,05$  В/%, не уступающие соответствующим техническим характеристикам прибора ( $\Delta_{M2}=\pm 0,2$  нм,  $\Delta_{M3}=\pm 0,4$  нм). При этом относительная погрешность во всех случаях в середине измерительного диапазона составляет  $\epsilon=0,024\%$ .

Для повышения точности измерений  $\lambda$  можно использовать АЦП большей разрядности [3]. Однако в этом нет необходимости, поскольку гистерезис изменения сопротивления механического датчика вследствие износа может составлять  $\Delta_R = 20 \dots 30$  Ом, что соответствует ошибке по  $\Delta_M$  приблизительно 2 нм. В процентном отношении для третьего диапазона это составляет 0,12%.

Погрешность динамических измерений определяется рабочей тактовой частотой  $f_T$  АЦП. В данном случае она составляет  $f_c = 75$  кГц. Частота выборки аналогового сигнала для 12-разрядного АЦП при этом теоретически может достигать более 6 кГц. При минимальной скорости развертки спектра  $v_{\min} = 0,5$  нм/мин можно произвести  $7,5 \cdot 10^5$  измерений  $\lambda$  на интервале  $\Delta\lambda = 1$  нм. Погрешность метода в этом случае составляет  $\Delta\lambda_{\min} = 1,33 \cdot 10^{-6}$  нм. Для максимальной скорости развертки  $v_{\max} = 128$  нм/мин получим  $\Delta\lambda_{\max} = 0,34 \cdot 10^{-3}$  нм.

Учитывая приведенные оценки, оптимизированная функциональная схема устройства сопряжения может состоять из наиболее упрощенных блоков измерения аналоговых сигналов и управления силовыми приводами прибора (рис. 1). Измерительный блок включает АЦП (ADC) и коммутатор входных сигналов (MUX) на интегральной схеме (ИС) ADG608 (аналог ИС

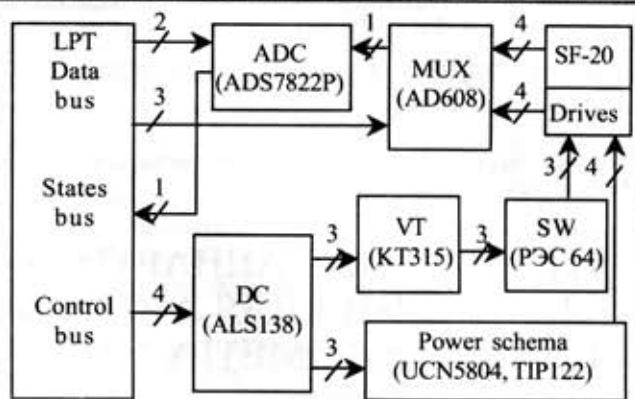


Рис. 1. Функциональная схема устройства сопряжения спектрофотометра СФ-20 с компьютером К561КП2). Управление измерительной частью осуществляется по шине данных (Data bus) LPT-порта. При этом младшие два бита используются для инициализации и подачи тактовых импульсов на АЦП, а следующие три бита — для дешифрации входов коммутатора. Цифровой сигнал с АЦП вводится в компьютер по одной сигнальной линии шины состояний (States bus) LPT-порта.

Силовая часть включает блок управления реле ПЭС-64, предназначенных для коммутации ключей

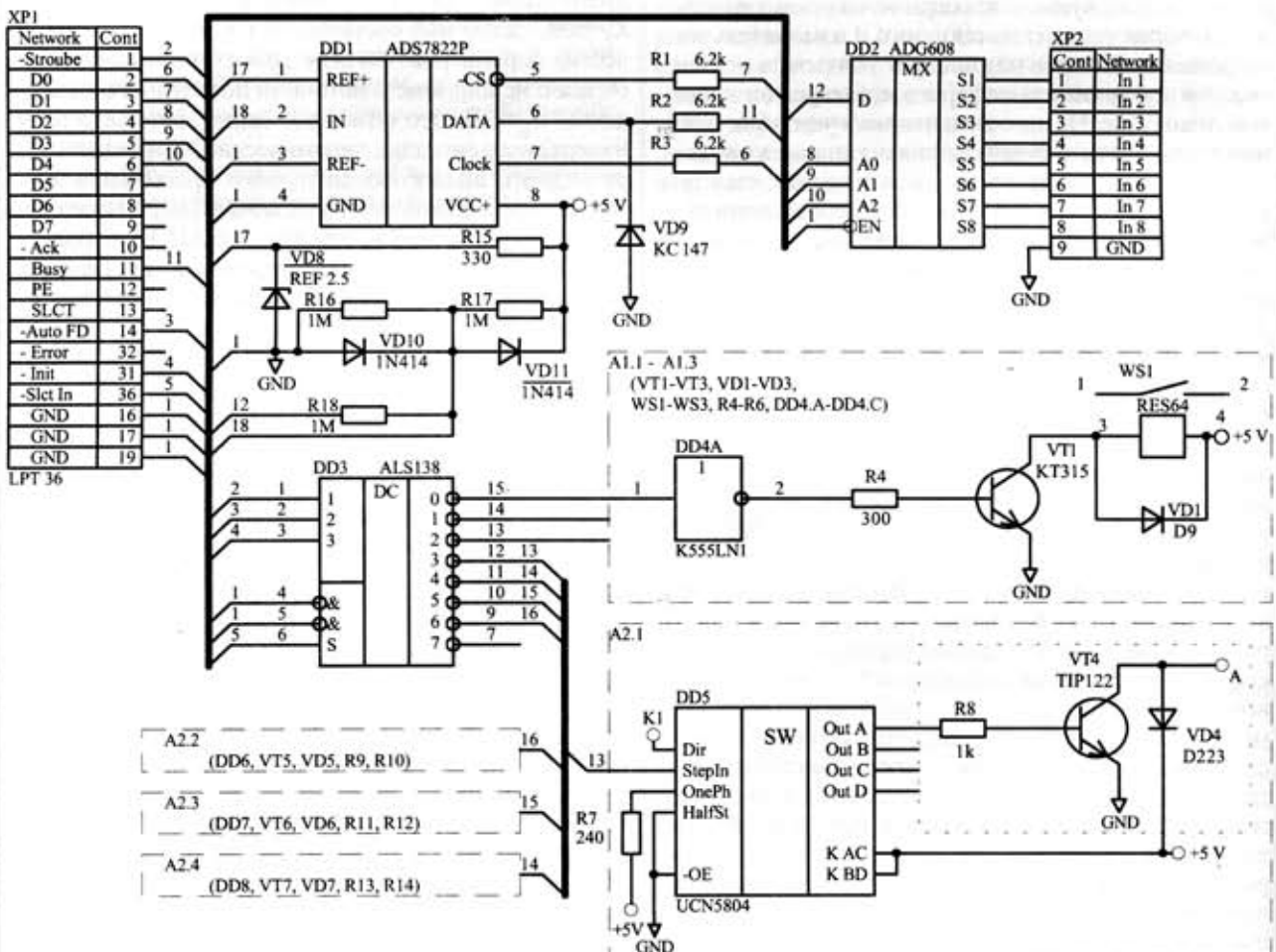


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема устройства сопряжения:

DD1 — ADS7822P; DD2 — ADG608; DD3 — ALS138; DD4 — ALS04; DD5 — UCN5804; VT1-VT3 — KT315Г; VT4-VT7 — TIP122; VD1-VD3 — D9; VD4-VD7 — D223; WS1, WS2 — ПЭС64; WS3 — ПЭС55; VD8 — REF2.5; VD9 — KC147; VD10, VD11 — 1N414

Условия измерения оптических параметров в разных волновых диапазонах спектрофотометра

Волновой диапазон $\lambda$ , нм	Порядок дифракции	Дифракционная решетка	Источник излучения	Фотоприемник
190—340	II	Ф	Д	ФЭУ
340—800	I	Ф	Н	ФЭУ
800—2500	I	К	Н	ФС

прямого хода, остановки и обратного хода развертки спектра, а также блок управления двигателями (Power schema) для коммутации источника (дейтериевой — Д, или накальной — Н лампы (см. таблицу)) и приемника лучистой энергии (фотоэлектронного умножителя — ФЭУ или фотосопротивления — ФС), а также для изменения типа дифракционной решетки (Ф, К) и шкалы порядка дифракции (I, II).

Управление силовой частью реализовано по четырем сигнальным линиям шины управления (Control bus) LPT-порта [4] (рис. 2). Дешифрация ключевых транзисторных элементов осуществляется с помощью ИС ALS138 (аналог К1533ИД7). Схемотехническая реализация силового привода зависит от типа используемых электродвигателей (Drives) [5]. Режимы коммутации фаз шаговых двигателей можно формировать специализированными ИС UCN5804 или MC3479, а необходимая выходная мощность каскада обеспечивается силовыми ключами TIP122 или LU024N. Коммутация сигнала управления Dir ИС UCN5804 для изменения направления вращения двигателей (вход K1 на DD5, рис. 2) осуществляется с помощью концевых выключателей при двух крайних фиксированных положениях якоря двигателя. Поэтому кроме четырех аналоговых сигналов с СФ-20 на АЦП через мультиплексор дополнительно коммутируются четыре логических сигнала с концевых выключателей (рис. 1).

Общий алгоритм считывания и обработки данных с LPT-порта следующий:

1. Выбор начальных параметров эксперимента: начального и конечного значения  $\lambda$  исследуемого волнового диапазона и типа измеряемой оптической постоянной — пропускания  $T$  или оптической плотности  $D$ . Открытие файла \*.dat для записи данных измерений.

2. Автоматическая установка исходного состояния измерительной системы по результатам анализа исходных параметров датчиков контроля  $\lambda$  согласно таблице.

3. Автоматический запуск измерений с записью данных в файл \*.dat и выводом результатов в графическом интерфейсе пользователя в режиме реального времени.

4. Остановка процесса сканирования и закрытие файла данных при достижении граничного значения  $\lambda$  с переходом в диалоговый режим опроса управляющей программы на дальнейшую обработку полученных результатов или проведение нового цикла измерений.

Измеренные спектры пропускания, которые демонстрируют реальные возможности применения предложенного аппаратно-программного обеспечения для различных веществ, показаны на рис. 3. Хотя волно-

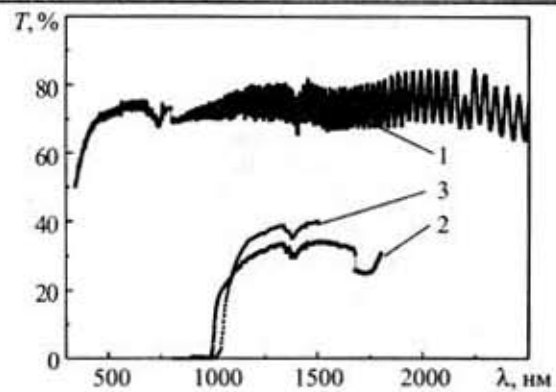


Рис. 3. Спектры пропускания: 1 — слюда; 2 — CdTe; 3 — n-Si

вая чувствительность прибора  $\delta\lambda$ , и уменьшается с возрастанием  $\lambda$ , однако является достаточной, чтобы выявить интерференционные особенности спектра пропускания слюды в длинноволновой области (рис. 3, график 1). Вычисленные по волновому краю поглощения значения ширины запрещенной зоны для CdTe ( $E_g = 1,65$  эВ) и n-Si ( $E_g = 1,12$  эВ) согласуются с литературными данными.

В общем случае резистивные делители, используемые в качестве преобразователей типа “сопротивление — напряжение — длина волны”, характеризуются достаточно высокой линейностью зависимости  $\lambda(U)$ . Поэтому реальное значение длины волны  $\lambda(U)$ , измеряемой АЦП, хорошо аппроксимируется прямо пропорциональной зависимостью

$$\lambda(U) = \lambda_{\min} + (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) \frac{(U_{\lambda} - U_{\min})}{(U_{\max} - U_{\min})},$$

где длины волн  $\lambda_{\max}$ ,  $\lambda_{\min}$  и соответствующие им напряжения  $U_{\max}$ ,  $U_{\min}$ , снимаемые с преобразователей, определяются экспериментально по шкале механического счетчика откалиброванного прибора и показаниям цифрового вольтметра при максимальном и минимальном сопротивлении резистивного преобразователя для соответствующего волнового диапазона;  $U_{\lambda}$  — мгновенное значение напряжения на резистивном преобразователе, соответствующее текущему значению измеряемой длины волны.

Аналогичное соотношение используется и для расчета измеряемого значения оптических параметров.

При значительном отклонении от линейности зависимости  $\lambda(U)$  можно использовать режим сопровождения спектра реперными метками [2]. Однако более оптимальным является введение в программу управления и обработки соответствующей калибровочной кривой.

Существенное влияние на точность измерений, а главное — на стабильность работы устройства сопряжения, проявляет “дребезг контактов” резистивных преобразователей. Статистический анализ результатов экспериментальных измерений показывает, что проникновение в измерительный канал АЦП сигналов на уровне 2—30 мВ приводит к ошибке определения  $\lambda$  на уровне 0,1—1,0 нм. Такие помехи можно эффективно отфильтровать — как схемотехнически, так и программно, используя статистическую обработку и цифровую фильтрацию результатов измерений. Грубые “промахи” измерений, обусловленные

сигналами "дребезга" до 80—100 мВ, проявляются в виде отклонений  $\lambda$  на несколько десятков нанометров и могут приводить даже к ложной автоматической перекоммутации текущего исследуемого волнового диапазона. Частота появлений таких сигналов в процессе измерений, как правило, не превышает значений 1:50—1:100. Их фильтрация осуществляется программно с помощью логического оператора

$If ((a) > (as + N)) \text{ or } ((a) < (as - N)) \text{ then } A \text{ else } as = a.$

Здесь  $a$ ,  $as$  — соответственно текущее и предыдущее значения измеряемой величины  $\lambda$ ;  $N$  — задаваемый параметр фильтрации (обычно  $N = 2 \dots 3$  нм);  $A$  — процедура аналогово-цифрового преобразования, измерения и приведения к нормированной шкале измеряемой величины.

Значительного повышения точности измерений и уменьшения погрешностей, обусловленных использованием механических преобразователей в кинематической схеме прибора, можно достичь, заменив резистивные делители оптронными датчиками с открытым оптическим каналом. Однако, как показано в [2, 3], для расчетных соотношений, графического отображения и интерпретации физических результатов исследуемых характеристик полупроводниковых материалов и структур вполне достаточно достигнутой точности измерений.

Программное обеспечение для управления прибором и обработки результатов измерений может быть выполнено на любом языке программирования вы-

сокого уровня и определяется возможностями используемого компьютера и операционной системы (ОС). Оптимальным вариантом является Borland Pascal с ОС Windows 9x, что допускает прямое обращение к портам ввода-вывода на программном уровне.

\*\*\*

Таким образом, разработанный вариант оптимизированной принципиальной схемы устройства сопряжения и программного обеспечения с двойной фильтрацией сигналов на программном уровне обеспечивает относительную погрешность электронного измерительного тракта не более 0,025%. Время одного полного цикла измерений оптического спектра в диапазоне от 0,19 до 2,5 мкм и автоматической обработки результатов не превышает 20 минут.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

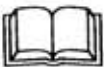
1. Optical and infrared detectors / Ed. by R. J. Keyes. — Berlin—Heidelberg—New York: Springer-Verlag, 1980.
2. Воробець Г. І., Воробець О. І., Воропаєв С. Л., Горлей П. М. Пристрій для автоматизації оптичних досліджень бар'єрних структур на основі напівпровідникових сполук  $A^2B^6$ ,  $A^3B^5$  // Вісник Київськ. нац. ун-ту ім. Т. Шевченка. Фізика. — 2004. — Вип. 6. — С. 40—42.
3. Воробець Г. І., Воробець О. І., Горлей П. М. Шістнадцятирозрядний аналогово-цифровий перетворювач сигналів для шини ISA IBM PC // Наук. вісник Чернівцьк. ун-ту. Фізика. Електроніка. — 2002. — Вип. 133. — С. 109—112.
4. Гук М. Аппаратные средства IBM PC. Энциклопедия. — С.-Петербург: Питер, 2001.
5. Ан П. Сопряжение ПК с внешними устройствами. — М.: ДМК Пресс, 2004.

НОВЫЕ КНИГИ

НОВЫЕ КНИГИ

**Эггинс Б. Химические и биологические сенсоры. — М.: Техносфера, 2005. — 336 с.**

Первое учебное пособие в новой области на стыке аналитической химии, электроники, физики и медицины. Особенно подробно описаны электрохимические, оптические, гравиметрические, температурные сенсоры, распознавание ионов и молекул, «лаборатории-на-чипе». Пособие предназначено для студентов и специалистов в областях медицинских и биотехнологий, пищевой промышленности и контроля окружающей среды, микробиологов, специалистов, разрабатывающих и применяющих микроаналитические системы.



в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

- Формирование нелинейного сигнала при воздействии на материальные объекты в целях передачи информации. (Россия, г. Воронеж)
- Зависимость сопротивления металлических квантовых проводов от температуры. (Россия, г. Москва)
- Современная инфракрасная термографическая технология, используемая при профилактическом обслуживании оборудования. (Сербия и Черногория, г. Бор)
- Высокостабильный СВЧ генераторный модуль для быстродействующих распределенных информационно-управляющих систем. (Украина, г. Днепропетровск)
- Технологические источники ионов на основе контрагированных разрядов. (Россия, г. Рубежное)
- Исследование влияния легирующих добавок на теплостойкость, теплопередачу никелевых покрытий корпусов ИС. (Украина, г. Ивано-Франковск)
- Компьютерная система анализа случайных потоков шумовых импульсов кремниевых диодов с микроплазмами. (Беларусь, г. Минск)
- О механизме насыщения тока стока полевого транзистора. (Узбекистан, г. Ташкент)
- Разброс параметров полевых транзисторов с барьером Шоттки на GaAs. (Украина, г. Днепропетровск)

в портфеле редакции в портфеле редакции в портфеле редакции

