

УДК 621.383.4/5:621.317.7

СИСТЕМА АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛОТНОСТИ СЛАБЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

Ю. Р. Винецкий, Ю. Д. Козырев, П. Е. Хакушев

Государственное унитарное предприятие «Научно-производственное объединение «Орион»»,
Москва, Россия

М. Ю. Винецкий

Московский Государственный институт электроники и математики, Москва, Россия

Установка для автоматизированных измерений спектральных характеристик плотности излучения в спектральном диапазоне 1–2 мкм базируется на стандартном монохроматоре и персональном компьютере, позволяет с высокой точностью и оперативностью измерять спектральные характеристики излучений, в том числе слабых источников, дешево в изготовлении. В установке применены малощумящий предусилитель с программно-управляемым коэффициентом усиления, микроконтроллер управления и 12-рядный АЦП. Система обработки сигнала реализует эффективные алгоритмы фильтрации сигнала из смеси с шумами и помехами (подавляются НЧ-шумы и сетевые наводки, для повышения отношения сигнал - шум применяется накопление). Это дает возможность регистрировать сигналы от $2 \cdot 10^{-14}$ Вт/√Н ($N=2^4 \dots 2^{12}$ – число усредняемых отсчетов задается оператором или устанавливается автоматически для достижения необходимого отношения сигнал - шум). Развитый пользовательский интерфейс позволяет гибко управлять измерительными процедурами, радикально снижая затраты труда экспериментатора на выполнение рутинных операций.

При исследовании структур на основе кремния, легированного эрбием (Si:Er), одной из основных является задача измерения характеристики спектральной

плотности излучения (СПИ) таких структур. Традиционная "ручная" измерительная процедура с использованием монохроматора при этом весьма трудоемка и длительна и, кроме того, плохо приспособлена для измерения слабых излучений. Действительно, монохроматор вручную устанавливают на требуемую длину волны излучения λ , отсчет мощности выходного сигнала ведется визуально по шкале аналогового измерителя среднеквадратического значения после завершения переходных процессов и истечения времени накопления, показания прибора вводят в ПЭВМ вручную и т. д. На измерение одного значения СПИ требуется, таким образом, около 3 мин (без учета дальнейших обработок). Оценка достоверности измеренного значения при этом отодвинута во времени от измерения — возможно, результат придется уточнять, о чем будет известно спустя часы. В связи с длительностью измерений данные оказываются подверженными трендам различной природы (дрейф параметров усилителя и т. п.). Так как в тракте аналоговой обработки сигнала технически сложно организовать низкочастотный спад коэффициента усиления одновременно режекцию гармоник сетевой частоты, накопление отсчетов сигнала как процедура повышения отношения сигнал - шум обладает ограниченной эффективностью. Задачей, решавшейся в данной работе, было создание системы автоматизированных измерений (САИ), свободной от указанных недостатков и удовлетворяющей следующим общим требованиям:

САИ должна базироваться на существующем стандартном оборудовании — монохроматоре типа МДР и ПЭВМ клона РС и быть относительно дешевой;

САИ должна реализовать эффективные алгоритмы выделения сигнала из смеси с широкополосными шумами и сетевыми наводками и обеспечивать широкие возможности "размена" длительности измерения на величину порогового сигнала;

система должна обладать развитым пользовательским интерфейсом, позволяющим экспериментатору гибко управлять параметрами измерительной процедуры, оперативно отслеживать результат измерений и максимально освобождать от рутинных операций по манипуляциям с данными.

Разработанная нами САИ СПИ, реализующая эти требования, описана ниже.

Структурная схема САИ представлена на рис. 1.

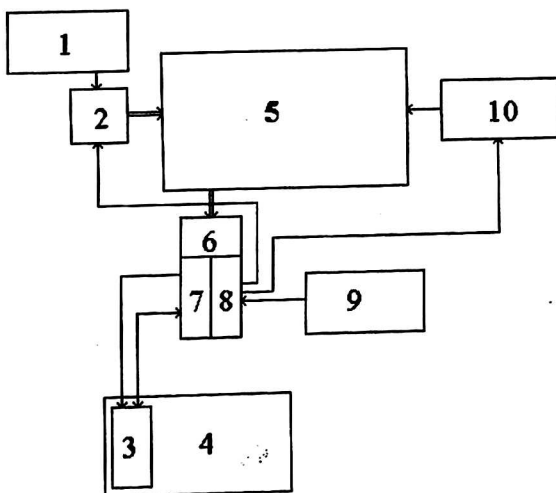


Рис. 1. Структурная схема системы автоматических измерений:

1 — блок питания усилителя накачки; 2 — усилитель накачки; 3 — плата АЦП; 4 — ПЭВМ; 5 — монохроматор МДР-23; 6 — усилитель фототока (ПУФ); 7 — контроллер (ПУФ); 8 — вторичные источники питания (ПУФ); 9 — блок питания усилителя; 10 — блок управления двигателем монохроматора

Наряду со стандартными устройствами, такими как монохроматор, блок управления двигателем, блоки питания и усилитель накачки светодиода, САИ содержит программируемый усилитель-формирователь (ПУФ), предназначенный для работы в составе САИ совместно с модулем аналогового ввода/вывода АЦП под общим управлением ПЭВМ. Ниже приведены основные характеристики усилителя-формирователя.

Коэффициенты усиления (прогр.).....	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128
Периоды импульса инжекции (прогр.), мс	9,5; 15,5
Число импульсов инжекции (прогр.).....	32, 64, 128, 256
Сквозность импульсов инжекции (прогр.).....	2, 3, 4, 5
Число выборок АЦП за период инжекции (прогр.).....	2, 3, 4, 5

ПУФ выполняет следующие функции:

- прием и обработка цифровой управляющей информации от ПЭВМ;
- прием оптического сигнала, его преобразование и предварительное усиление в ФПУ;
- программируемое усиление сигнала;
- формирование программируемой последовательности импульсов инжекции (накачки) для управления питанием тест-структур;
- формирование сигналов управления шаговым двигателем развертки монохроматора.

Предварительный усилитель-формирователь представляет собой цифро-аналоговое устройство, сочетающее в себе блоки *аналоговой* и *цифровой* обработки.

Блок цифровой обработки — контроллер предназначен для приема, обработки и генерации логической информации. Он построен на основе микроконтроллера фирмы Microware и нескольких буферных элементах сопряжения. Микроконтроллер осуществляет прием управляющих инструкций от ПЭВМ через буферный универсальный регистр и декодирует их в последовательность элементарных операций по управлению внешними объектами: изменяет коэффициент масштабирования, генерирует импульсы инжекции, управляет двигателем.

Прием и передача инструкций осуществляется по 8-разрядной параллельной шине данных, соединяющей порты ввода-вывода АЦП и ПУФ. Согласно вложенной программе, микроконтроллер анализирует и выполняет инструкцию и выставляет при необходимости "ответ" на шине данных, подтверждая выполнение.

Блок аналоговой обработки включает в себя усилитель фототока и масштабный усилитель напряжения, а также малошумящие источники питания и смещения. Коэффициент усиления усилителя программируется и может регулироваться в пределах 1—128 с кратностью 2. Так как плата АЦП содержит также встроенный усилитель с программируемым усилением от 1 до 8, чувствительность системы можно оперативно подстраивать в диапазоне 60 дБ для последующей оцифровки 12-разрядным АЦП.

Работа САИ в автоматическом режиме происходит следующим образом. Оператором задаются начальные настройки эксперимента (подробнее см. ниже), в том числе диапазон длин волн излучения λ_{ini} и λ_{end} , шаг изменения длины λ_{step} и критерий автоматического завершения процедуры измерения СПИ на каждой длине волны (им может быть достижение предельного времени измерения, набор заранее определенного числа отсчетов N для усреднения, достижение "заказанного" уровня отношения сигнал - шум в выходных данных или комбинация этих условий). Генератор импульсов накачки вырабатывает "пачки" из равноотстоящих импульсов, каждая из которых отвечает одному блоку выход-

ных данных. Стробирование отклика осуществляется несколько (2—5) раз за период следования импульсов накачки, таким образом, блок выходных данных, подлежащих цифровой обработке, состоит из (2—5)**N* 12-разрядных чисел. На каждой длине волны в первой фазе цикла измерений САИ адаптирует коэффициент усиления таким образом, чтобы данные на выходе аналогового тракта “укладывались” в динамический диапазон АЦП. Далее производится накопление данных с предварительной цифровой фильтрацией с помощью (2—5)-точечного временного окна и последующее их накопление/усреднение, причем результаты обработки обновляются после каждого блока. Процедура продолжается, пока не будет удовлетворен заданный критерий завершения измерений СПИ на данной длине волны. После этого набор статистики прекращается, система записывает результат измерений в файл (в него заносится среднее значение СПИ, оценка среднеквадратического отклонения, отношение сигнал - шум и другие справочные данные) и переходит к следующей длине волны, и так до последней длины волны заданного диапазона. В системе предусмотрено ограничение объема статистики отсчетов на одной длине волны числом $N = 2^{12}$ (этого вполне достаточно для всех известных нам практических целей). Управление САИ ведется с помощью терминала ПЭВМ. Программа управления представляет пользователю графический интерфейс (рис. 2) и характеризуется минимальными требованиями к компьютеру (PC 486/4MB, DOS).

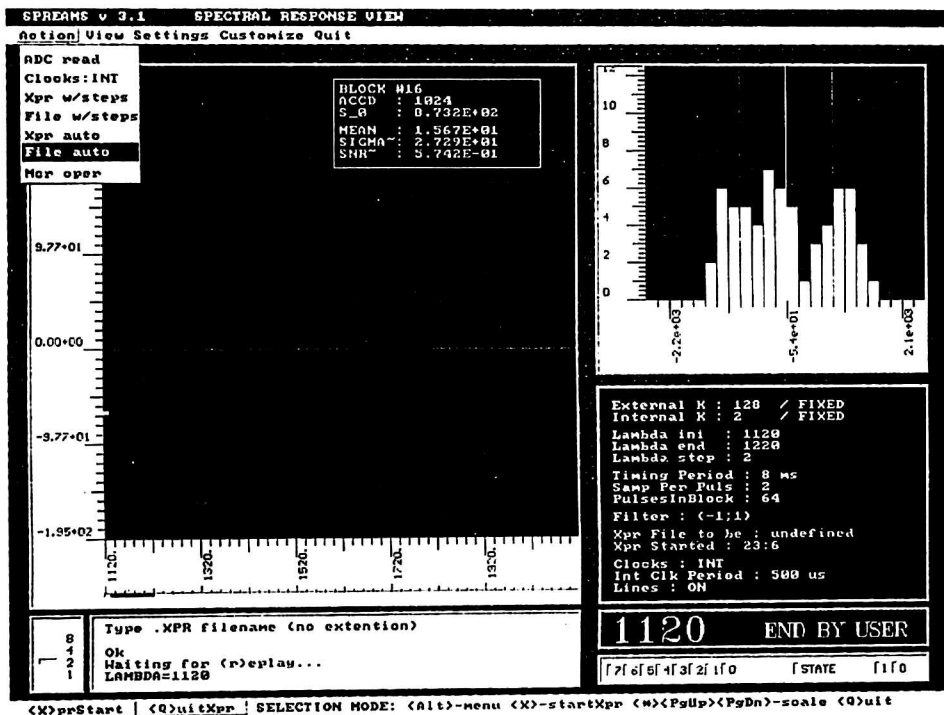


Рис. 2. Вид экрана при работе САИ в режиме выполнения эксперимента

Программа позволяет работать как в основном — автоматическом режиме, описанном выше, так и в пошаговом режиме — с переходом к каждой следующей длине волны по команде оператора. При этом в основном графическом окне могут отображаться как текущие данные в координатах “амплитуда—время”

(режим осциллографа), так и измеренная к текущему моменту часть спектральной характеристики (режим спектральной характеристики).

Дополнительные возможности контроля хода эксперимента предоставляет окно гистограммы собранных данных, обновляемой с поступлением каждого очередного блока данных (в правой верхней части экрана на рис. 2) — с ее помощью пользователь способен оценивать достоверность поступающих данных и при необходимости оперативно вмешаться в ход эксперимента. Для облегчения работы экран содержит т. н. окно терминала (под основным графическим окном на рис. 2), в которое система выводит сообщения о своих текущих действиях, “эхо” команд пользователя и подсказки. Имеется также информационная панель текущих настроек и “λ-монитор”, отражающий состояние монохроматора. В подменю основных меню действий системы (Action, изображено раскрытым на рис. 2) предусмотрены также различные возможности тестирования и отладки системы. При измерениях в графическое окно, кроме графика СПИ, также выводятся текущие числовые значения среднего измеренного отклика, СКО, отношение сигнал - шум и число усредненных отсчетов. Возможности вариаций параметров эксперимента иллюстрируются рис. 3, изображающем экран в режиме задания настроек. Могут быть заданы спектральный интервал и шаг сканирования (Lambdas), параметры импульсов накачки (Pulses), внешнее и внутреннее усиление (Amplifiers), способ именования выходного файла данных (Naming), критерий завершения набора статистики на каждой длине волны (End condition) и другие справочные данные.

SPREAMS v 3.1 SPECTRAL RESPONSE VIEW
Action View Settings Customize Quit

Set all parameters:

Lambdas, nm Lambda_ini : 1120 Lambda_end : 1950 Lambda_step: <input type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 20		Naming <input type="checkbox"/> default <input type="checkbox"/> prompt <input type="checkbox"/> lastsaved <input type="checkbox"/> autosave <input checked="" type="radio"/> user : 18 <input checked="" type="radio"/> text <input checked="" type="checkbox"/> incremented	
Pulses Timing period, ms: <input type="radio"/> 8 <input type="radio"/> 20 Samples per pulse: <input type="radio"/> 2 <input checked="" type="radio"/> 3 <input type="radio"/> 4 <input type="radio"/> 5 Pulses in block: <input type="radio"/> 32 <input type="radio"/> 64 <input checked="" type="radio"/> 128 <input type="radio"/> 256		Transmittance, GHz <input type="radio"/> 1 <input type="radio"/> 3 <input checked="" type="radio"/> 2 <input type="radio"/> 4	
Amplifiers Ext K, 2 ⁿ : 7 <input checked="" type="checkbox"/> auto Internal K: 8 <input checked="" type="checkbox"/> auto		End conditions <input checked="" type="checkbox"/> SNR at: 6 <input checked="" type="checkbox"/> Timeout on: 1000 <input type="radio"/> ms <input type="radio"/> num <input type="checkbox"/> SNR satur: 11 %	
User Info Experiment name: For Example Specimen name: My Pretty LED Temperature, K: 451 deg F Detector name: My Only Detector Pump level, mA: 120 User comment: None			

Ok Save Cancel

LAMBDA_HSI=1120

<X>prStart | <Q>uitXpr | SELECTION MODE: <Alt>-menu <X>-startXpr <w><PgUp><PgDn>-scale <Q>uit

Рис. 3. Вид экрана при задании настроек эксперимента

На рис. 4 приведена полная спектральная плотность мощности шума помех на выходе системы (в данном примере период следования импульсов “накачки”

$T = 15,5$ мс, применено трехточечное временное окно, число усреднений $N = 128$; в тракте действуют реальные шумы фотоприемника, усилителя и сетевые наводки). Видно, что НЧ-шумы и гармоники основной частоты 50 Гц эффективно подавляются. Это позволяет вести "размен" времени измерений на точность с эффективностью, близкой к теоретической, эффективности накопления некоррелированных отсчетов $\sim\sqrt{N}$. Такая зависимость и наблюдалась нами в экспериментах при доступных значениях N . Таким образом, экспериментатор сам вправе назначить "временную цену" точности измерений, исходя из стоящих перед ним задач и степени зашумленности фотосигнала, либо он может определить лишь стратегию такого размена и поручить определение объема выборки системе.

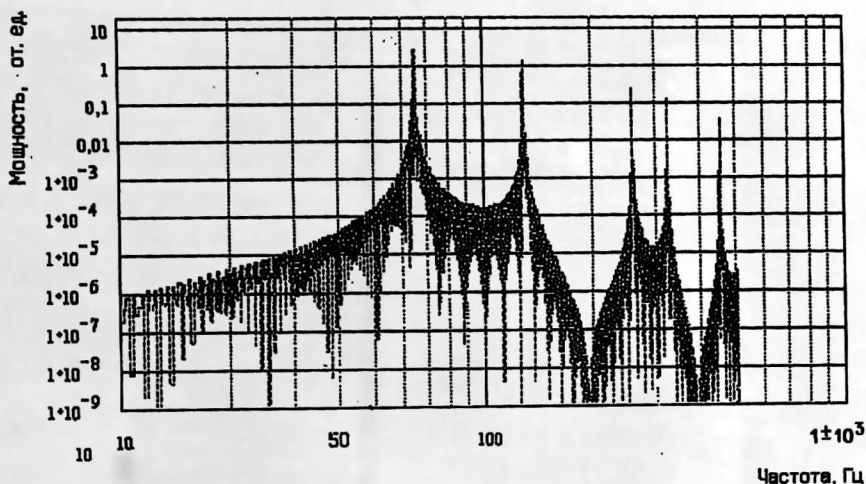


Рис. 4. Спектральная плотность мощности шума помех

Рис. 5 иллюстрирует СПИ структуры Si:Er, измеренный с помощью описываемой САИ. В таблице представлена сравнительная характеристика типовых временных затрат при измерении СПИ-методами "вручную" и с помощью САИ.

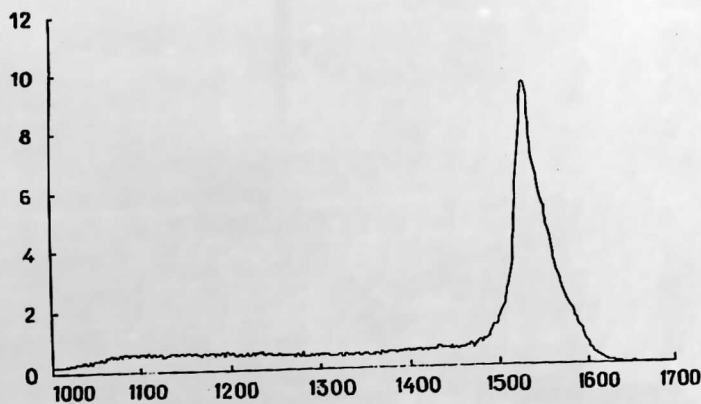


Рис. 5. Спектр излучения структуры Si:Er

Параметры	Вариант измерения	
	ручной	автоматический
Число точек отсчета	500	500
Шаг сканирования, нм	2	2
Число отсчетов на длине волны	1	128
Точность считывания данных, %	Стрелочный вольтметр 5	10-разрядное АЦП 0,1
Время замера на длине волны / перемещения, мин (с)	1 (10)	2 (1)
Общее время проведения экспери- мента, мин	~600	20
Обработка результата	Ручной ввод данных в ПЭВМ ~240 мин	Автоматически в процессе измере- ния
Суммарное время, мин (ч)	840 (14)	20
Участие оператора	Все время	При запуске

Таким образом, разработанная нами САИ позволяет существенно повысить точность и эффективность измерений СПИ, в том числе и применительно к слабоизлучающим источникам.

AUTOMATED SYSTEM FOR LIGHT SPECTRA MEASUREMENT OF WEAKLY-LIGHT-EMITTING STRUCTURES

Yu. R. Vinetski, Yu. D. Kosyrev, P. E. Khakuashev
The State Unitary Enterprise «RD&P Centre "Orion"», Moscow, Russia

M. Yu. Vinetski
Moscow State Institute for Electronics and Mathematics, Moscow, Russia

A system is described for automatic measurements of the light spectral density characteristics of light-emitting structures in 1..2-mkm spectral band, including the case of low emission intensities. Based on widely-used monochromators and PCs, the system has relatively low cost and provides both high-accuracy and short-time measurements possibilities. The setup includes low-noise programmable-gain preamplifier and 12-bit ADC card with ISA PC interface. Effective algorithms of digital filtration are implemented for signal processing, providing both LF-noises and multiple narrow-band industrial frequencies suppression. Thus signals can be sensed as low as $2 \cdot 10^{-14}$ Watts/V/N (N-being averaging number preset by user or set by the system adaptively in real-time mode to attain desired signal-to-noise value). Flexible user interface and versatile experiment-control possibilities allow to shorten drastically time one spent to perform experimental procedure.