УДК 681.532.1.53.082.32

Н.В. Замятин, Е.Ю. Севастьянов

Информационная система для исследования полупроводниковых металлооксидных сенсоров

Рассмотрено современное состояние разработок газовых сенсоров на основе оксидов металлов, как наиболее перспективных. Для исследования сенсоров разработана информационная система, обладающая широкими возможностями по обеспечению их эффективного функционирования, а также передачи информации с использованием сетевых технологий.

Ключевые слова: газовый анализ, сенсор, информационная система, электронный нос, нейронные сети.

Газовый анализ в настоящее время имеет достаточно широкий круг применений: в промышленности – контроль газовых технологических сред, экологический мониторинг, системы охраны жизнедеятельности и др. Существуют и потенциально новые области применения газового анализа, связанные с классификацией веществ по летучим органическим компонентам, что особенно важно в пищевой и фармацевтической промышленности, развитие водородной энергетики, биоэнергетики также дает новые перспективы применения систем газового анализа (ГА).

Наиболее широко в настоящее время для ГА применяются хроматографические системы и спектральные оптические системы. Значительно реже применяются системы, основанные на других физических принципах, например на основе масс-спектрометрии. Эти типы газоаналитических систем сложны, дороги, как правило, не портативны и требуют высококвалифицированного обслуживания, но эти системы обеспечивают хорошую селективность и чувствительность.

Для значительного круга задач, не требующих высокой селективности, альтернативой подобным системам могут служить системы, основанные на газовых сенсорах различных типов (будем их называть сенсорные системы). Как правило, подобные системы предназначены для реагирования на какой-либо один компонент газовой смеси, или из-за низкой селективности группу сходных по каким-либо параметрам газов (например, термокаталитические датчики предназначены для определения наличия горючих газов в атмосфере).

Однако существует большой промежуточный класс задач ГА, для которых еще нецелесообразно или невозможно применение сложных газоаналитических систем, но в то же время существующие сенсорные системы уже не могут решать эти задачи удовлетворительно. Наиболее перспективным путем для решения подобных задач является развитие новых типов сенсорных систем, основанных на совершенствовании методов обработки сенсорной информации. Наиболее широко применяются такие методы, как искусственные нейронные сети, нечеткая логика, факторный анализ и др. Для проведения исследований в этом направлении необходим комплексный подход, включающий в себя создание *исследовательских систем*, имеющих не только развитую аппаратную часть, но и информационную часть, позволяющую совершенствовать методы обработки информации.

Любую сенсорную систему можно рассматривать с точки зрения преобразования информации, внешнее воздействие на которую преобразуется в отклик. Задача сенсорной системы в общем случае является обратной и состоит в том, чтобы по отклику системы оценить характеристики внешнего воздействия, в нашем случае внешним воздействием является газовая среда. Решение этой задачи основывается на моделировании зависимости отклика сенсора при взаимодействии с исследуемой газовой средой и построении обратной модели, т.е. сенсорная система должна иметь подсистему обработки информации, основанную на этой модели.

Простейшей газовой сенсорной системой является система, основанная на одном сенсоре. На рис. 1, *а* изображена подобная система. Воздействие газовой среды обозначено вектором $\overline{X}=(x_1,x_2,\ldots,x_m)$, x_1 – соответствует воздействию определяемого газа, а $g=f(\overline{X})$ отклик системы. Точное восстановление вектора $\overline{X}$ по отклику g невозможно, но на основе обратной модели M возможно вычисление величины h, которая приближен-

но равна x_1. Точность определения тем выше, чем меньший относительный вклад в отклик вносят остальные компоненты $x_2,\ldots,x_m$ вектора $\overline{X}$.

Повысить точность возможно при реализации мультисенсорной системы газового анализа (рис. 1, *б*), в которой все сенсоры имеют различную чувствительность (относительно друг друга) к внешним воздействиям. Отклик системы можно представить в виде вектора $\overline{G}=(g_1,g_2,\ldots,g_n)$, где $g_i=f_i(\overline{X})$ – отклик i-го сенсора. Вообще говоря, нахождение по отклику $\overline{G}$ каких-либо компонент вектора $\overline{X}$ является значительно более сложной задачей, чем для систем первого типа. Эта задача не является тривиальной, поскольку не имеет однозначного решения. Для систем подобного рода активно применяются различные современные методы обработки информации: факторный анализ, методы, основанные на нечеткой логике, генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети (ИНС), а также их комбинации. Наиболее широко применяются в этих целях ИНС (например, [1, 2]). Подобные мультисенсорные системы часто называют «электронный нос».

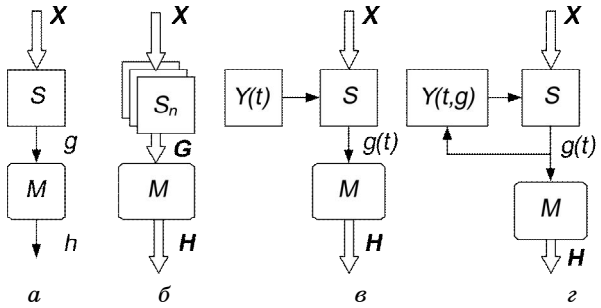

Рис. 1. Структурные схемы сенсорных газоаналитических систем

В настоящее время существует множество типов газовых сенсоров, основанных на различных физических принципах. Одним из самых распространенных и перспективных типов сенсоров являются полупроводниковые газовые сенсоры на основе оксидов металлов. Эти сенсоры обладают рядом преимуществ: они обладают относительно высокой селективностью, чувствительны к различным типам газов, стоимость изготовления при массовом производстве довольно низка. Особенностью этих сенсоров также является то, что для их работы требуется поддержание достаточно высокой температуры, обычно 200–500 °С. Характерно то, что при различных температурах один и тот же сенсор имеет существенно различную динамику отклика и чувствительность к различным газам [3]. Поэтому, варьируя температуру сенсора, можно получать более полную информацию о составе газовой среды. Такая особенность сенсоров уникальна и позволяет создавать новые типы газоаналитических систем.

Одним из таких новых типов являются системы с использованием термоциклирования, т.е. используется циклическое изменение рабочей температуры сенсора (рис. 1, *в*). Профиль температура–время $Y(t)$ может быть различным: нагрев по гармоническому закону [4], нагрев до некоторой постоянной температуры и охлаждение, нагрев–охлаждение по линейному закону [5] и пр. Отклик сенсора $g(t)$ в данном случае несет сложную комплексную информацию о составе газовой среды, что также требует применения более сложных методов моделирования и обработки информации.

Разработки в этом направлении находятся в ранней стадии, общим недостатком для работ в этой области является отсутствие адекватных динамических моделей сенсора, выявляющих закономерности влияния изменения температуры. Отсутствие моделей сдерживает развитие еще одного нового типа газоаналитических систем, в которых присутствует обратная связь между откликом сенсора и температурой нагревателя $Y=f(t,g)$ (рис. 1, *г*). Описание в литературе реализации подобных систем нами не найдено. На основе систем с термоциклированием или систем с обратной связью также возможно создание мультисенсорных систем.

Газоаналитические системы – активно развивающееся направление, находящееся на стыке различных отраслей науки и техники, охватывает физику, химию, технологию тонких и толстых пленок, электронику, математические методы обработки информации, информационные технологии и др. Каждая из этих отраслей применительно к сенсорным системам имеет свой круг проблем.

Для систем, основанных на полупроводниковых газовых сенсорах, можно выделить задачи, которые являются наиболее существенными:

1) развитие технологии производства сенсоров с заданной селективностью и чувствительностью;

2) построение адекватных динамических моделей полупроводниковых сенсоров;

3) построение и исследование газоаналитических систем на основе существующих сенсоров (как мультисенсорных систем, так и систем, основанных на изменении рабочей температуры);

4) развитие новых и адаптация существующих методов обработки информации.

Очевидно, что для исследований в этих направлениях требуется комплексный подход к созданию лабораторных систем проведения исследований полупроводниковых газовых сенсоров. Учитывая, что исследовательская система должна быть масштабируемой для облегчения создания мультисенсорных систем с различными конфигурациями, отметим моменты, являющиеся, на наш взгляд, ключевыми при проектировании подобных систем:

1) система должна состоять из унифицированных сенсорных модулей;

2) создание единой информационной системы производится на базе компьютера объединением информационных потоков каждого из модулей;

3) должен существовать набор пользовательских программных средств для управления системой в целом, а также для облегчения манипуляцией массивами данных.

Разработана исследовательская система, удовлетворяющая этим требованиям. Структурная схема изображена на рис. 2. Основой системы являются сенсорные модули *СМ*. Каждый модуль имеет унифицированный набор команд, позволяющий управлять задатчиком температуры сенсора и обменом информацией. С помощью последовательного асинхронного интерфейса различные модули могут объединяться в единую информационную систему на основе персонального компьютера. Скорость обмена информацией составляет 115 кБит/с, что позволяет объединять до 10 модулей, при необходимости это число может быть увеличено.

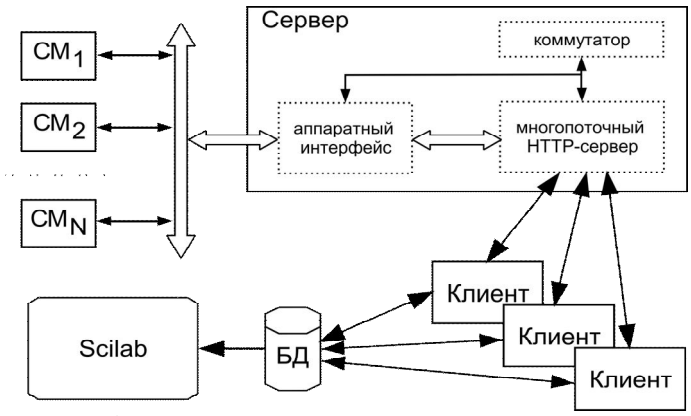

Рис. 2. Структурная схема исследовательской системы

Программное обеспечение системы построено на основе архитектуры клиент–сервер. Сервер обеспечивает обмен информацией с аппаратной частью системы через *аппаратный интерфейс*, накопление промежуточных данных, а также транслирование данных к клиентской части. Взаимодействие между клиентом и сервером производится по сетям TCP/IP, а непосредственно обмен информацией инкапсулирован в HTTP протокол. Каждый модуль имеет свой уникальный адрес, для связи адреса с портом TCP/IP существует настраиваемый коммутатор.

Серверная часть ПО написана частично на языке C (низкоуровневый обмен с аппаратной частью), а частично на интерпретируемом языке Python (многопоточный HTTP-сервер). Такое сочетание позволяет получить хорошее быстродействие и переносимость на другие операционные системы. Клиентская часть ПО позволяет:

1. Управлять сенсорными модулями (задавать режим температурного цикла).

2. Считывать получаемую информацию и отображать её на графиках в режиме реального времени.

3. Производить первичную обработку информации.

4. Сохранять данные в файл или базу данных, и читать данные из файла или базы данных.

Клиентские программы созданы в среде Delphi. Более высокий уровень обработки информации можно обеспечить применением специализированных математических пакетов MatLab, Statistica, Scilab, для которых созданы интерфейсные библиотеки для связи с накопленной базой экспериментальных данных.

Основой аппаратной части системы является сенсорный модуль. Упрощенная структурная схема модуля приведена на рис. 3.

Полупроводниковый газовый сенсор состоит из непосредственно полупроводникового сенсорного элемента, выполненного на кварцевой подложке, и платинового нагревателя, обычно выполненного на обратной стороны подложки. Нагреватель одновременно служит для определения температуры сенсора, так как платина имеет достаточно большой температурный коэффициент сопротивления, постоянный в большом интервале температур.

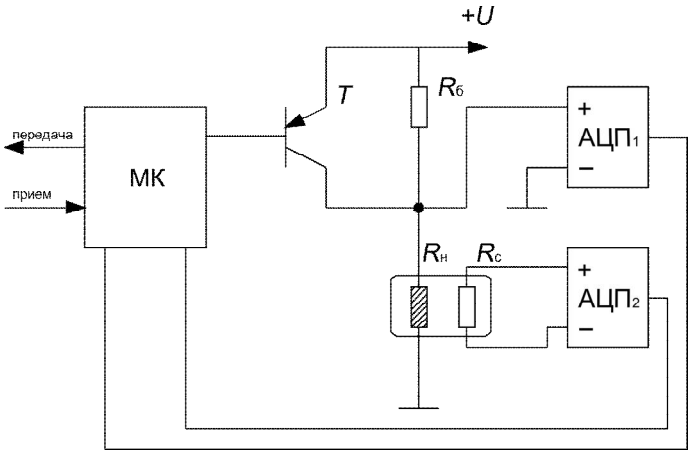

Рис. 3. Упрощенная схема сенсорного модуля

Измерение сопротивления производится с помощью быстродействующего АЦП$_1$ (ADS7816) посредством измерения напряжения на делителе, состоящем из балластного сопротивления $R_б$ и нагревателя $R_н$, в момент времени, когда ключевой транзистор T закрыт. В зависимости от того, насколько отличается реальное сопротивление нагревателя от заданного, определяется скважность управляющих импульсов, поступающих на базу транзистора T. Измерение проводимости сенсорного элемента $R_с$ обеспечивается сигма-дельта АЦП$_2$ (AD7731) со встроенным источником тока.

Управление модулем осуществляет микроконтроллер (ATmega 8), обладающий достаточным быстродействием и подходящим набором периферийных устройств (3 таймера, асинхронный последовательный порт и др.). Обмен информацией осуществляется по встроенному асинхронному последовательному порту, с помощью которого все модули, а также компьютер, подключаются к единому каналу передачи данных. Каждому модулю присвоен адрес, уникальный в рамках одной системы, по которому производится обращение к нему. Обмен информацией осуществляется по принципу «ведущий-ведомый», т.е. в нашем случае модуль может передать пакет данных только после того, как он получил соответствующий запрос. Для повышения надежности передачи информации каждый пакет включает в себя контрольную сумму.

Задаваемый температурный цикл может состоять из нескольких интервалов (от 1 до 64), для каждого интервала задается температура (с точностью до 0,5 °С) и длительность с точностью до 0,01 с. После подачи стартовой команды модуль поддерживает заданный режим термоциклирования. Измерение проводимости сенсора, а также вывод информации производятся с частотой 100 Гц.

Для примера на рис. 4 изображено окно программы во время работы с полупроводниковыми сенсорами в режиме термоциклирования: верхний график отражает сопротивление нагревателя, а нижний – соответствующее изменение проводимости сенсорного элемента.

Заключение

Созданная система успешно применяется в лаборатории физики полупроводниковых приборов для исследования полупроводниковых сенсоров на основе оксида олова.

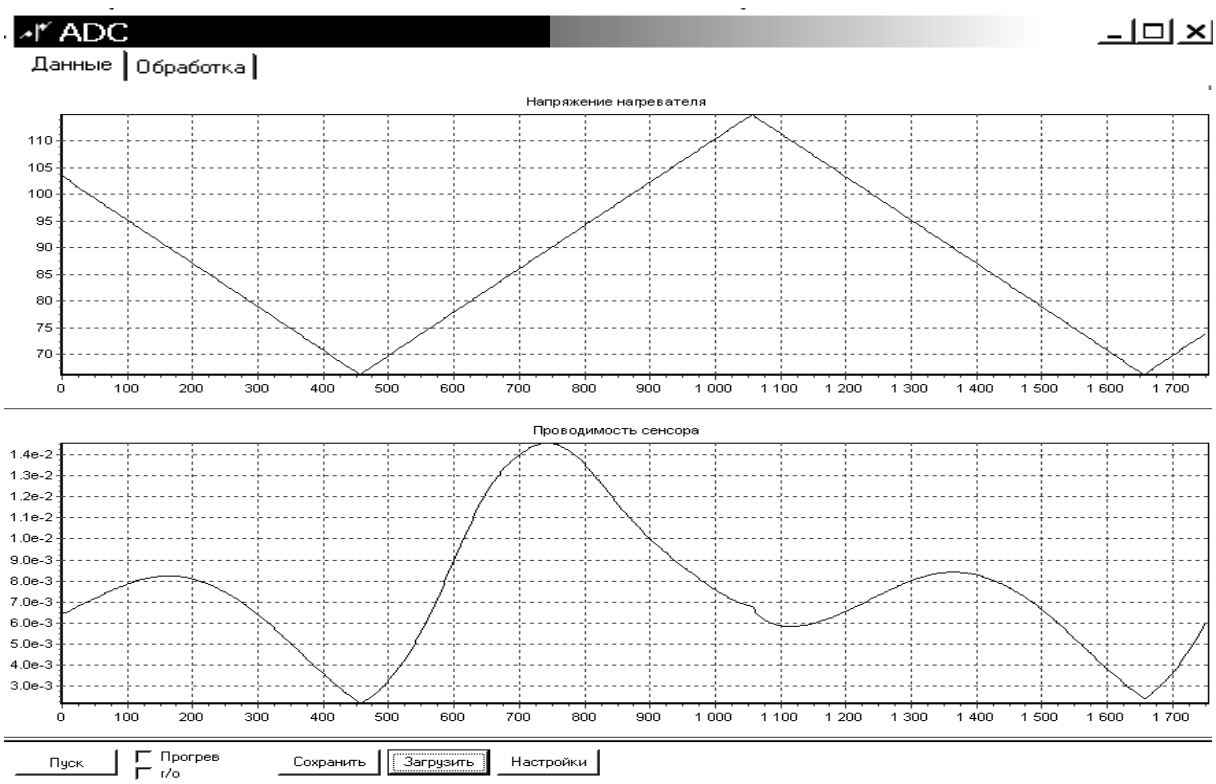

Рис. 4. Пример работы программы для сенсора, работающего в режиме сканирования температуры 100–450 °С

Программные и схемотехнические решения, реализованные в данной системе, позволяют без существенных изменений реализовать сенсорные системы всех ранее рассмотренных типов. Также отметим, что данная система может быть достаточно просто расширена. Например, предполагается использовать управляемый блок подготовки газов, что превратит исследовательскую систему в автоматизированную систему классификации и калибровки сенсоров, необходимую для массового производства газовых сенсоров.

Литература

1. Recognition of volatile organic compounds using SnO_2 sensor array and pattern recognition analysis / Dae-Sik Lee, Jong-Kyong Jung, Jun-Woo Lim et al. // Sensors and Actuators B. – 2001. – Vol. 77 – P. 228–236.

2/ Srivastava A.K. Detection of volatile organic compounds (VOCs) using SnO2 gas-sensor array and artificial neural network // Sensors and Actuators B. – 2003. – Vol. 96. – P. 24-37.

3. Исследование отклика тонкопленочного газового сенсора на основе оксида оксида олова в импульсном режиме для различных газов // О.В. Анисимов, Н.К. Максимова, Е.Ю. Севастьянов, Е.В. Черников // Изв. ВУЗ. Физика. – 2006. – Т. 3. – С. 186-187.

4. Toward the realization of an intelligent gas sensing system utilizing a non-linear dynamic response // Kimiko Kato, Yo Kato, Kazuko Takamatsu et al. // Sensors and Actuators B. – 2000. – Vol. 71 – P. 192-196.

5. New applications of tin oxide gas sensors: II. Intelligent sensor system for reliable monitoring of ammonia leakages // Armin Jerger, Heinz Kohler, Frank Becker, Hubert B. Keller, Rolf Seifert // Sensors and Actuators B. – 2003. – Vol. 81. – P. 301-307.

Замятин Николай Владимирович
Д-р техн. наук, профессор каф. автоматизации обработки информации ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-34-29
Эл. почта: zam@fet.tusur.ru

Севастьянов Евгений Юрьевич
Канд. техн. наук, с.н.с. каф. автоматизации обработки информации ТУСУРа
Тел.: (382-2) 41-34-29
Эл. почта: sese@ngs.ru

Zamyatin N.V., Sevastjnov E.Y.
The information system for the research of semiconductor metal oxide sensors

The current status of the development of gas sensors based on metal oxides is considered as very promising. The information system has been developed for the study of sensors with wide opportunities to ensure their effective functioning, as well as collection, storage, transmission of information using network technologies.
Keywords: gas analysis, sensor, information systems, electronic nose, neural networks.