

МУЛЬТИСЕНСОРНАЯ ИНТЕГРАЛЬНАЯ МИКРОСИСТЕМА ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТНОГО КОНТРОЛЯ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГАЗОВ

УДК 621.3.049.76/774

В. М. Колешко, А. В. Гулай, В. А. Гулай, БНТУ, г. Минск. E-mail: altaj@tut.by

Аннотация

Представлены конструктивно-технологические решения основных компонентов интегральной сенсорной микросистемы для интеллектуального контроля газовой среды. Выполнены проектирование и моделирование интегрального сенсорного интерфейса (в виде «микросистемы на кристалле»), выходные сигналы которого обрабатываются с помощью интеллектуальной системы. В качестве основного функционального блока сенсорного интерфейса выбран операционный усилитель тока, в цепь обратной связи которого включен чувствительный элемент сенсора. Исследованы амплитудно-частотные характеристики операционного усилителя и переходные процессы при использовании синусоидального и импульсного сигналов. Указанные сигналы не имеют искажений формы до частот порядка 5 МГц. Полоса пропускания операционного усилителя составляет примерно 23 МГц, усиление в рабочей полосе частот – около 41,7 дБ. При напряжении питания 2В максимальная потребляемая мощность не превышает 1 мВт. Проведено проектирование аналого-цифрового преобразователя для согласования операционного усилителя с входом компьютерной системы, а также цифро-аналогового преобразователя для компьютерного управления температурой нагревателя чувствительного элемента. Блок управления позволяет регулировать температуру нагревателя сенсорной микросистемы в пределах от 20 до 500°С.

Введение

В настоящее время в электронной сенсорной технике все более широкое распространение получают технологии многомерного контроля, представляющие собой методы измерения некоторого множества параметров контролируемого объекта, а затем формирования информационного образа на основе измеряемых величин. Поскольку каждый из контролируемых параметров зависит от ряда свойств изучаемого явления, путем интеллектуальной обработки измеряемых сигналов определяется массив интересующих характеристик исследуемого объекта. Измеренные составляющие общей последовательности тестовых сигналов воссоединяются в выбранных нелинейных комбинациях в интеллектуальных системах сенсорного контроля, обеспечивая получение на выходе определенных характеристик в виде сложных информационных образов.

Решение проблемы создания и использования систем многомерного сенсорного контроля определяется следующими обстоятельствами. Сенсоры, как правило, не реагируют только на отдельные признаки, их параметры зависят от совокупности разнообразных внешних факторов. Измеряемый сигнал вызывается несколькими действующими факторами, так как сенсоры обладают перекрестной чувствительностью относительно входных переменных величин. За счет этого путем измерения одного параметра нескольких чувствительных элементов сенсорной матрицы массив измеряемых сигналов можно разложить в определенное количество интересующих признаков.

При работе мультисенсорной системы, реализующей

технологии многомерного контроля, как правило, наблюдаются достаточно большие отклонения от линейной зависимости между входными и выходными величинами. Поэтому для получения корректной количественной информации используются методы, позволяющие обрабатывать данные без априорного знания функциональных зависимостей между входными сигналами и выходными параметрами, то есть нелинейные и непараметрические методы. Особый интерес представляют системы, способные не только выполнять однажды запрограммированную последовательность действий с заранее определенными данными, но и самостоятельно анализировать вновь поступающую информацию, находить в ней определенные закономерности. В этой области приложений перспективны интеллектуальные системы обработки сенсорной информации, включающие набор искусственных нейронных сетей.

С учетом вышеизложенного важным представляется вопрос создания массивов наносенсоров для многомерного контроля, в том числе сенсорных наноструктур на квантовых эффектах. Также вызывает интерес анализ проблемы проектирования и моделирования сенсорного интерфейса в виде «системы на кристалле» (SoC), которая в контексте нашего исследования может быть обозначена как СБИС SMSoC – «сенсорная микросистема на кристалле». Интерфейсная схема в данном случае является первым уровнем интегрального электронного измерительного прибора для обработки сенсорной информации. Задача сенсорного интерфейса – вырабатывать электрические сигналы, которые соответствуют изменению параметров чувствительного элемента сенсора, и представлять эти сигналы в виде последовательности импульсов, пригодных для преобразования компьютерными системами.

Конструктивно-технологические решения интегрального сенсорного интерфейса как «микросистемы на кристалле»

В качестве чувствительных элементов диэлектрических газовых микро-, наносенсоров используются сверхтонкие металлооксидные пленки, например оксида цинка. Тонкие пленки ZnO формируются методом вакуумного распыления композиционных мишеней, получаемых статическим или импульсным прессованием. Для повышения адсорбционной способности материала пленок вводятся микродобавки соединений редкоземельных элементов в количестве 0,1-4% по массе [1, 2]. Чувствительные элементы сенсорных микросистем выполняются на мембране, сформированной в кремниевой пластине, например, р-типа с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 1 Ом·см (рис. 1).

Мембрана толщиной 20 мкм формируется с использованием технологических операций фотолитографии и химического травления обратной стороны полупроводниковой пластины. Затем на поверхности кремния выращивается окисный слой толщиной ~1 мкм: на планарной стороне пластины – для обеспечения электрической изо-

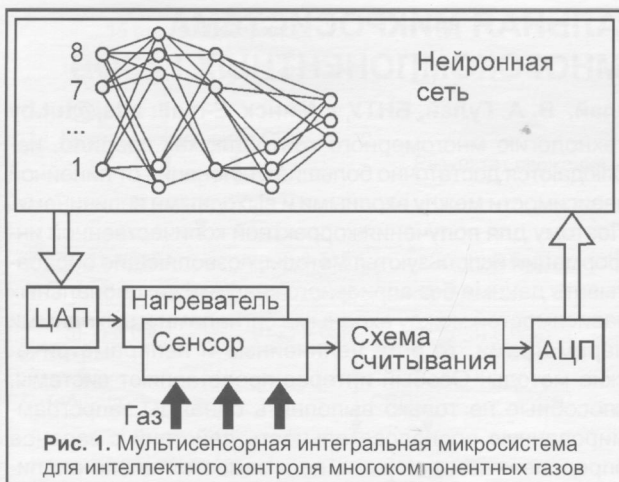


Рис. 1. Мультисенсорная интегральная микросистема для интеллектуального контроля многокомпонентных газов

ляции, на обратной стороне – для снижения потерь тепла. После этого на мембране изготавливается микронагреватель (например, в виде меандра) путем осаждения тонкой пленки никеля (~0,2 мкм) и выполнения фотолитографии. Сверху полученной многослойной системы наносится слой оксида кремния толщиной ~0,5 мкм и формируется активная сенсорная наноструктура. Планарная сенсорная наноструктура представляет собой тонкую пленку оксида цинка с нанесенными на ее поверхность электродами, а вертикальная наноструктура выполняется в виде МДМ-контакта (металл–диэлектрик–металл).

Проектирование сенсорного интерфейса типа «сенсорная микросистема на кристалле» производится на КМОП элементах в САПР Cadence технологического уровня 0,13 мкм. САПР Cadence ориентирована на моделирование сверхбольших интегральных микросхем, выполняемых по нанотехнологиям. Сенсорный интерфейс как микроэлектронное устройство для предварительной обработки сенсорных сигналов формируется с использованием групповых технологий на одной полупроводниковой пластине с массивом чувствительных элементов. Сенсорный интерфейс представляет собой СБИС из 8 каналов (по числу чувствительных элементов), каждый из которых содержит схему считывания и аналого-цифровой преобразователь, а также цифро-аналоговый преобразователь и блок управления температурой нагревателя чувствительного элемента [3, 4].

Контроль многокомпонентных газов производится за счет того, что чувствительные элементы мультисенсорной микросистемы имеют перекрестную чувствительность ко всем компонентам анализируемого газа. Концентрации газов $Y(n)$ определяются по величине отклика массива сенсоров $X(n)$ и известной вектор-функции $\Phi[X(n)]$: $Y(n) = \Phi[X(n)] + \xi(n)$, где $\xi(n)$ – погрешности сенсорного контроля. При этом установление зависимости концентрации компонентов газовой смеси $Y(n)$ от сигналов сенсоров $X(n)$ представляет собой задачу аппроксимации n -мерной нелинейной вектор-функции $\Phi[X(n)]$.

Моделирование схемы считывания сенсорного интерфейса на основе операционного усилителя

Основным базовым элементом схемотехнического построения в среде Cadence интегральных устройств, в том числе моделируемого сенсорного интерфейса, является операционный усилитель. В качестве конкретного типа

усилителя, использованного при проектировании сенсорной микросистемы, выбран операционный усилитель тока (ОУТ), управляемый напряжением. Он представляет собой источник тока, выполненный по схеме, сочетающей в себе дифференциальную пару транзисторов на входе и «токовое зеркало». Принцип функционирования «токового зеркала» подразумевает, что если напряжения на затворах двух одинаковых МОП-транзисторов данной схемы равны, то токи каналов этих транзисторов также устанавливаются равными. В проектируемой схеме ОУТ использовано каскадное включение транзисторов «токового зеркала», что позволяет получить приемлемые значения параметров ОУТ.

Полная схема интегрального ОУТ для «сенсорного интерфейса на кристалле» представлена на рис. 2.

Оптимальные значения параметров некоторых элементов ОУТ в качестве примера приведены в таблице 1. Для данного усилителя выполнены расчеты переходных процессов (transient analysis) и частотных характеристик (ac analysis). В процессе моделирования установлено, что частотная полоса пропускания усилителя при разомкнутой цепи обратной связи составляет 23 МГц, усиление в рабочей полосе частот – около 41,7 дБ, а характерный параметр, представляющий собой произведение «коэффициент усиления × полоса частот», равен 700 МГц. Искажения формы как синусоидального сигнала, так и прямоугольных импульсов становятся особенно заметны на частотах выше 5 МГц.

Разработанный ОУТ является основной составляющей схемы считывания (read-out circuitry) в цепи контроля газовой среды, а также цифро-аналогового преобразователя в цепи нагрева чувствительного элемента сенсорной микросистемы. Схема считывания представляет собой операционный усилитель, в цепь обратной связи которого включен чувствительный элемент сенсора. В процессе контроля изменение сопротивления чувствительного элемента преобразуется в выходное напряжение операционного усилителя. Выходной сигнал схемы считывания определяется отношением

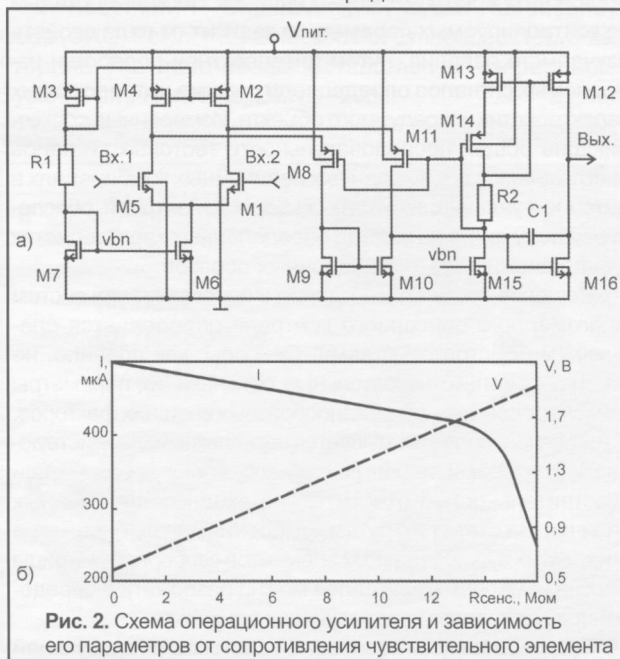


Рис. 2. Схема операционного усилителя и зависимость его параметров от сопротивления чувствительного элемента

Таблица 1. Параметры элементов схемы ОУТ

Элементы		Значения параметров	
N-транзисторы, количество	Ширина канала W, мкм	Длина канала L, мкм	
2 транзистора	3,8	1	
1 транзистор	3,8	0,13	
2 транзистора	4,5	6,99	
4 транзистора	16-40	1	
P-транзисторы, количество	Ширина канала W, мкм	Длина канала L, мкм	
1 транзистор	15	0,2	
4 транзистора	25	1	
1 транзистор	40	0,4	
1 транзистор	37,5	1	
Резисторы		R, кОм	
R1		11,7143	
R2		8,8713	
Конденсаторы		C, пФ	
C1		8,03	

сопротивлений чувствительного элемента и опорного резистора, который выполняется отдельно, вне чипа из соображений минимизации площади кристалла. Разработанная схема считывания позволяет выполнять преобразование сопротивления до значений порядка 16 МОм, соизмеримых с типичными величинами сопротивлений чувствительных элементов из металлооксидных материалов, в частности ZnO.

В процессе исследования возможного диапазона изменения сопротивления сенсора определены также оптимальные значения постоянного напряжения смещения (порядка 600 мВ) и опорного сопротивления (1 МОм), при которых обеспечивается линейность выходной характеристики схемы считывания. Данная характеристика имеет линейный характер при изменении напряжения в пределах от 600 мВ до 2В. Ток, потребляемый схемой считывания, составляет 500 мкА при небольших значениях сопротивления сенсора и уменьшается с повышением значений его сопротивления. Поэтому при напряжении питания 2В максимальная мощность, потребляемая схемой считывания, имеет относительно небольшую величину – не превышает 1 мВт.

Аналого-цифровой преобразователь сенсорного интерфейса в виде «микросистемы на кристалле»

С помощью 8-битного параллельного аналого-цифрового преобразователя (АЦП) производится преобразование аналогового сигнала схемы считывания в цифровой, и полученная последовательность импульсов подается на вход микроконтроллера. Параллельный АЦП является самым быстрым типом преобразователя, использующим необходимое количество компараторов, работающих параллельно. Разработанный 8-разрядный параллельный АЦП состоит из 15 компараторов, а также содержит 16 резисторов (рис. 3). Выходное сопротивление АЦП равно 1 МОм, а при необходимости его схему можно изменить таким образом, чтобы увеличить выходное сопротивление (при этом увеличится площадь чипа). Принцип работы АЦП основан на сравнении входного напряжения с различными значениями опорного напряжения с помощью относительно экономичных компараторов.

Входной сигнал подается на все компараторы сразу, поэтому выход АЦП имеет задержку по отношению к входному сигналу, равную задержке только одного компаратора и N-разрядного кодера. Однако такая архитектура схемы предполагает использование большого числа электронных компонентов (компараторов и резисторов) и имеет ограничение по максимальной разрешающей способности. Кроме того, для обеспечения достаточно высокого быстродействия каждый компаратор имеет довольно высокий уровень потребления энергии. Для питания быстродействующих компараторов током смещения необходимой величины (>10 мА) цепочка опорных резисторов должна иметь относительно низкое сопротивление. Следует отметить, что для таких проектных приложений, как газовые сенсоры, сопротивления резисторов в цепи делителей должны быть неодинаковыми, что приводит к нелинейности переходной характеристики АЦП.

Это обстоятельство обуславливает возможность проектирования АЦП именно для определенного диапазона выходного напряжения схемы считывания, который определяется пределами вариации сопротивления чувствительного элемента сенсора.

Для использования в схеме АЦП разработан компаратор с потребляемой мощностью 0,4 мВт. Источник тока компаратора состоит из двух транзисторов, включенных по диодной схеме, и используется для питания предварительного усилителя. Предварительный усилитель посылает сигнал в триггерную ячейку, которая позволяет быстро достичь сверхвысокого усиления. Дифференциальный усилитель служит для преобразования входного сигнала в единичный выходной сигнал, а выходной каскад представляет собой инвертор, который приводит форму импульса к прямоугольному виду. Причем как дифференциальный усилитель, так и выходной каскад дополнительно усиливают сигнал. Важно заметить, что здесь включен компаратор синхронного типа, в котором генератор тактовых импульсов не используется.

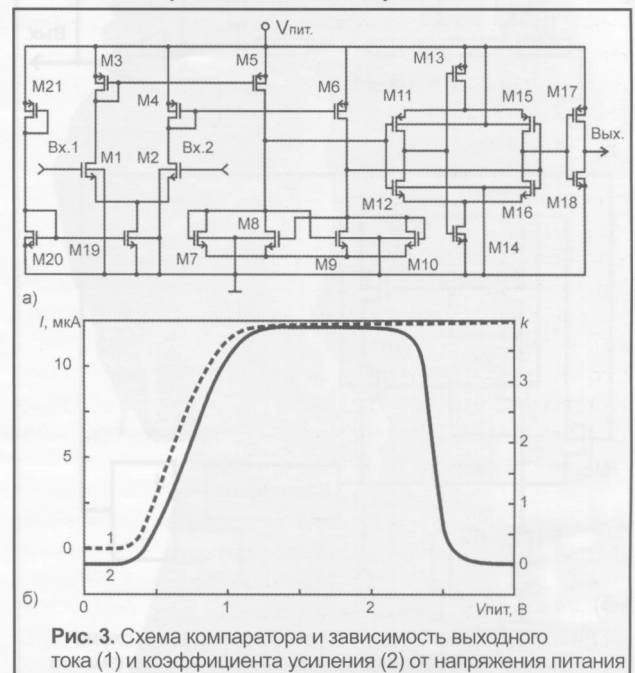


Рис. 3. Схема компаратора и зависимость выходного тока (1) и коэффициента усиления (2) от напряжения питания

Оптимальные размеры транзисторов в схеме компаратора приведены в таблице 2.

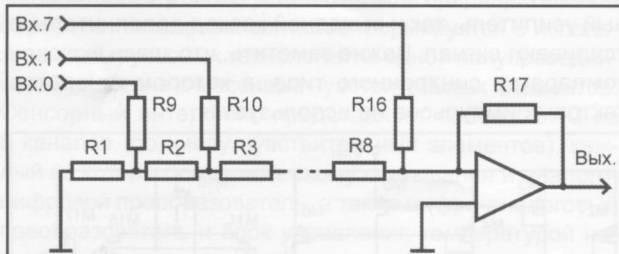
Результаты моделирования показали, что задержка на прохождение сигнала в схеме компаратора не превышает 8,6 нс, а входное напряжение смещения – меньше 1 мВ. Исследованы также зависимости выходного тока и коэффициента усиления от напряжения питания разработанного компаратора. По результатам DC-анализа (анализа по постоянному току) сделан вывод, что при заданных параметрах схемы компаратора его коэффициент усиления равен 3,9. Компаратор сохраняет свои параметры в достаточно широком диапазоне изменения напряжения питания.

Блок управления температурой чувствительного элемента сенсорной микросистемы

Восьмиразрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) предназначен для преобразования 8-битного бинарного сигнала с выхода микроконтроллера в аналоговый сигнал, который передается в цепь управления нагревателем. Схема ЦАП выполнена в виде инвертирующего операционного усилителя, на

Таблица 2. Параметры элементов схемы компаратора

Элементы	Значения параметров	
	Ширина канала W, мкм	Длина канала L, мкм
N-транзисторы		
M1, M2, M12, M14, M18	90	1
M7, M10, M16, M20	3,8	1
M8, M9, M19	3,8	0,13
P-транзисторы		
M3, M4, M15	37,5	1
M5, M6, M11, M13, M17, M21	15	0,2



а)

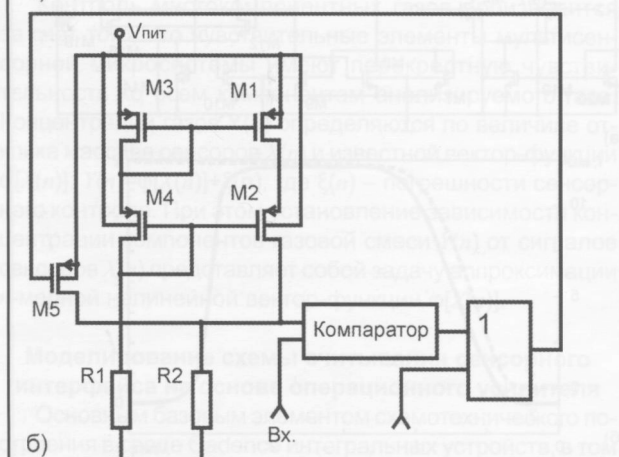


Рис. 4. Цифро-аналоговый преобразователь и схема регулирования температуры чувствительного элемента

входе которого включена последовательная цепь резисторов для подачи на них бинарных входных сигналов. Разрядность 8 бит выбрана в целях обеспечения достаточно высокой точности поддержания температуры (отклонение температуры от заданного значения менее 2 градусов). С помощью разработанного ЦАП можно управлять значениями температуры в диапазоне от 20 до 500°C.

Принципиальная электрическая схема цифро-аналогового преобразователя показана на рис. 4.

В его основу положено схемотехническое решение операционного усилителя тока, который используется в схеме считывания сенсорной микросистемы. ЦАП предназначен для поддержания желаемого аналогового опорного напряжения на нагревателе в соответствии с величиной управляющего цифрового сигнала. Значение опорного напряжения определяется электрофизическими характеристиками нагревателя и задается для каждого требуемого уровня температуры.

Для установления температуры нагревателя сенсорной микросистемы в пределах от комнатной (20°C) до 500°C разработан блок управления температурой. В схеме данного блока транзистор M5 с большим значением ширины канала служит для подачи на нагреватель тока нагрева сенсора. Каскад на транзисторах M1-M4 используется для пропускания через нагреватель постоянного тока в целях измерения падения напряжения на нагревателе. Оно сравнивается с опорным значением, и по результатам сравнения определяется температура нагрева. Если напряжение на нагревателе меньше, чем опорное напряжение, то это означает, что температура сенсора меньше требуемого значения. Поэтому схема управления повышает ток через нагреватель, когда значение импульса тактового генератора имеет относительно малую величину. Когда контролируемое напряжение на нагревателе имеет достаточно большое значение, оно только измеряется.

Заключение

Представлены конструктивно-технологические решения основных компонентов интегральной сенсорной микросистемы для интеллектуального контроля газовой среды. Выполнены проектирование и моделирование интегрального сенсорного интерфейса (в виде «микросистемы на кристалле»), выходные сигналы которого обрабатываются с помощью интеллектуальной системы. В качестве основного функционального блока сенсорного интерфейса выбран ОУТ, в цепь обратной связи которого включен чувствительный элемент сенсора. Исследованы амплитудно-частотные характеристики операционного усилителя и переходные процессы в режиме использования синусоидального и импульсного сигналов. Искажения формы указанных сигналов становятся заметными при работе на частотах выше 5 МГц. Полоса пропускания операционного усилителя составляет примерно 23 МГц, усиление в рабочей полосе частот – около 41,7 дБ, параметр «усиление×полосу частот» равен 700 МГц. Выходная характеристика усилителя имеет линейный характер при изменении напряжения на



чувствительном элементе в пределах от 600 мВ до 2В. При напряжении питания 2В максимальная потребляемая мощность операционного усилителя не превышает 1 мВт. Проведено проектирование АЦП для согласования операционного усилителя с входом компьютерной системы, а также ЦАП для компьютерного управления температурой нагревателя чувствительного элемента. Блок управления позволяет регулировать температуру нагревателя сенсорной микросистемы для контроля газовой среды в пределах от 20 до 500°C.

Литература:

1. Колешко, В. М., Гулай, А. В., Шевченко, А. А. и др. Исследование материалов распыляемых мишеней на основе микро- и нанопорошков AlN и ZnO с микродобавками соединений редкоземельных элементов для получения многофункциональных сенсорных систем // Материалы I международной научной конференции «Наноструктурные материалы – 2008: Беларусь-Россия-Украина (НАНО-2008)». – 22-25 апреля 2008, Минск. – С. 287-288.

2. Колешко В. М., Гулай, А. В., Шевченко, А. А., Гулай, В. А. Получение сверхтонких пленок оксида цинка для сенсорных наноструктур // Материалы международной научно-технической конференции «Нанотехнологии и наноматериалы». – 30 марта-1 апреля 2009, Москва. – С. 506-510.

3. Koleshko, V. M., Gulay, A. V., Gulay, V. A., Voronko,

N. P. Sensor MEMS/NEMS Based on Multilayer Dielectric Nanostructures // The Vth International Conference Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH'2009), 22-24 April 2009, Lviv-Polyana. – P. 24-25.

4. Колешко, В. М., Гулай, А. В., Гулай, В. А., Воронко, Н. П. СБИС SMSoC – «сенсорная микросистема на кристалле» // Сборник докладов IV международной научной конференции «Актуальные проблемы физики твердого тела (ФТТ-2009)». – Т. 3. – 20-23 октября 2009, Минск. – С. 225-227.

Abstract

Structural and technological solutions of sensor microsystems are provided for controlling the composition of gaseous environments. Multilayer structures based on super thin zinc oxide films are used as the sensitive elements of nanosensors. Micro-dopes of rare-earth elements compounds are introduced for improvement of adsorption capacity of the film material. A sensor interface is simulated as a «system on crystal» in the form of a super-big integrated microcircuit. A sensor interface as an electronic device for preliminary procession of sensor signals is realized on a single silicon wafer with a sensitive element. The sensor interface circuit is, for example, an operation amplifier with a sensitive element based on a zinc oxide thin film included in its feedback circuit. A variety of film features in the process of gaseous environment composition control process leads to change of output voltage parameters of the operational amplifier.

**интернет-реклама и
продвижение
сайтов на**

TUT.BY Google Яндекс Rambler

**80% посетителей сайта
приходят из поисковых систем
9 из 10 пришедших - ваши новые клиенты!
Не упустите эту возможность!**

ЗВОНИ!
283 17 11



ЗАО "Нетворк Системс"
www.nsys.by

