

"Сенсорная микросистема на кристалле": моделирование сенсорного интерфейса

В.М. Колешко, А.В. Гулай, В.А. Гулай

Белорусский национальный технический университет, altaj@tut.by

Аннотация — Выполнено проектирование и моделирование в САПР Cadence интегрального сенсорного интерфейса в виде "системы на кристалле". В качестве основного функционального блока сенсорного интерфейса выбран операционный усилитель тока, управляемый напряжением. Исследованы амплитудно-частотные характеристики операционного усилителя и переходные процессы при использовании синусоидального и импульсного сигнала. Проведено проектирование аналого-цифрового преобразователя для согласования чувствительного элемента с входом компьютерной системы, а также цифро-аналогового преобразователя для компьютерного управления температурой нагревателя чувствительного элемента сенсорной микросистемы.

Ключевые слова — Микросистема на кристалле, сенсорная микросистема, сенсорный интерфейс.

I. ВВЕДЕНИЕ

Перспективным конструктивно-технологическим направлением развития микро-нанoeлектроники является разработка интегральных функциональных комплексов типа "система на кристалле". Использование данного подхода в сенсорике позволяет создавать интегральные сенсорные интерфейсы в виде СБИС SMSoC — "сенсорная микросистема на кристалле" [1]. 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.

II. ИНТЕГРАЛЬНЫЙ СЕНСОРНЫЙ ИНТЕРФЕЙС КАК "МИКРОСИСТЕМА НА КРИСТАЛЛЕ"

В качестве чувствительных элементов диэлектрических газовых микро-наносенсоров используются сверхтонкие металлооксидные пленки, например пленки оксида цинка. Тонкие пленки ZnO формируются методом вакуумного распыления композиционных мишеней, получаемых статическим или импульсным прессованием [2], [3]. Для повышения ад-

сорбционной способности материала пленок вводятся микродобавки соединений редкоземельных элементов в количестве 0,1–4% по массе [4], [5]. Чувствительные элементы сенсорных микросистем выполняются на кремниевой пластине, например, р-типа с ориентацией (100) и удельным сопротивлением 1 Ом·см (толщиной ~100 мкм) (рис. 1) [6], [7]. С использованием операции фотолитографии и химического травления обратной стороны пластины формируется мембрана с размерами порядка 3 мм × 3 мм × 20 мкм. На поверхности кремния выращивается окисный слой толщиной ~1 мкм: на планарной стороне пластины — для обеспечения электрической изоляции, на обратной стороне — для улучшения термоизоляции и снижения потерь тепла. После этого изготавливается микронагреватель (например, в виде меандра) путем осаждения тонкой пленки никеля (~0,2 мкм) и выполнения фотолитографии.

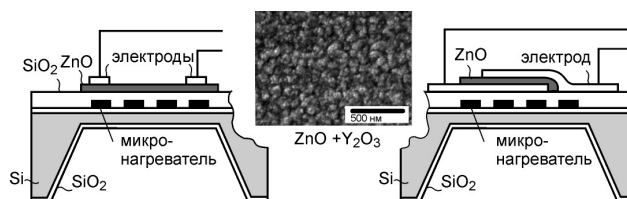


Рис. 1. Чувствительный элемент интегральной сенсорной микросистемы

Сверху полученной многослойной системы наносится слой оксида кремния толщиной ~0,5 мкм. Затем на основе сверхтонкой диэлектрической пленки формируется планарная либо вертикальная активная сенсорная наноструктура. Планарная структура представляет собой тонкую пленку оксида цинка с нанесенными на ее поверхность электродами, вертикальная наноструктура выполняется в виде МДМ-контакта (металл–диэлектрик–металл).

Проектирование сенсорного интерфейса типа "сенсорная микросистема на кристалле" (SMSoC) производится в САПР Cadence, которая ориентирована на моделирование сверхбольших интегральных микросхем, выполняемых по нанотехнологиям [8], [9]. Сенсорный интерфейс как микроэлектронное устройство для предварительной обработки сенсорных сиг-

налов формируется на одной кремниевой пластине с чувствительным элементом.

Функциональная схема интегральной сенсорной микросистемы для контроля газовых сред показана на рис. 2. Разработанная сенсорная микросистема включает чувствительный и нагревательный элементы, схему считывания, аналого-цифровой и цифро-аналоговый преобразователи.

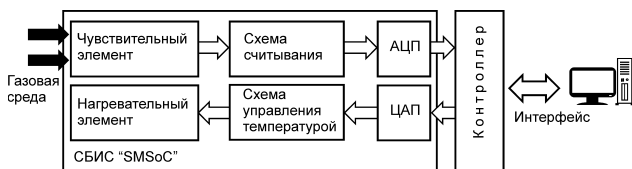


Рис. 2. Функциональная схема интегральной сенсорной микросистемы для контроля газовой среды

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 микросистемы, выбран операционный усилитель тока (ОУТ), управляемый напряжением. Данный операционный усилитель представляет собой источник тока, выполненный по схеме, сочетающей в себе дифференциальную пару транзисторов на входе и "токовое зеркало".

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ КАСКАДОВ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ ДЛЯ СЕНСОРНОГО ИНТЕРФЕЙСА

Выполнено моделирование "токовых зеркал", используемых в виде каскадов операционных усилителей в схеме сенсорного интерфейса. Принцип функционирования "токового зеркала" подразумевает, что, если напряжения на затворах двух одинаковых МОП-транзисторов данной схемы равны, то токи каналов этих транзисторов также должны быть равны. Простейшая схема "токового зеркала", используемого в схеме операционного усилителя, и семейство ее выходных характеристик, полученных при различных значениях напряжения затвор-исток, представлены на рис. 3.

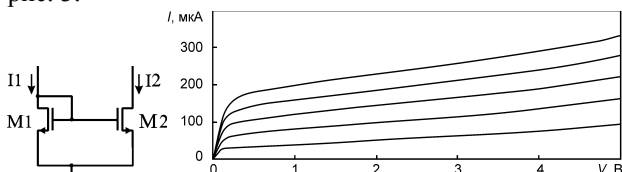


Рис. 3. "Токовое зеркало" и зависимость тока стока от напряжения затвор-исток

Главной причиной искажения выходной характеристики операционного усилителя, построенного на основе данной схемы "токового зеркала", является изменение коэффициента передачи по постоянному

току вследствие неравных значений напряжения сток-исток транзисторов M1 и M2. На графиках видна значительная нелинейность зависимости выходного тока от напряжения затвор-исток в области насыщения.

Для улучшения параметров "токового зеркала" и, соответственно, характеристик операционного усилителя используется каскадное включение транзисторов (рис. 4). Стабилизация выходного тока в данной схеме происходит следующим образом. При условии идентичности всех транзисторов напряжение на стоке транзистора M1 равно напряжению на M2. При увеличении напряжения стока транзистора M4 ток через данный транзистор также будет возрастать, что повлечет увеличение тока M2 и, соответственно, уменьшение напряжения затвор-исток M4, при этом транзистор M4 частично закроется.

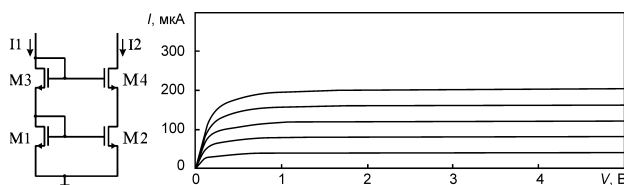


Рис. 4. Каскадное "токовое зеркало" операционного усилителя и семейство его характеристик

В итоге происходит относительно небольшое снижение напряжения затвор-исток M4, а также сравнительно небольшое повышение напряжения сток-исток M2. Причем итоговое изменение напряжения стока транзистора M4. Эти зависимости параметров схемы позволяют стабилизировать выходной ток схемы при изменении ее выходного сопротивления.

С целью выявления особенностей работы схемы каскадного "токового зеркала" выполнялось моделирование его выходных характеристик. Установлено, что в режиме насыщения транзисторов текущее значение тока практически постоянно. Причем, напряжение исток-сток, необходимое для введения транзисторов в данный режим, значительно выше, чем в простой схеме "токового зеркала". Это сказывается на особенностях функционирования операционного усилителя тока при низких значениях его входного напряжения.

IV. ХАРАКТЕРИСТИКИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ СЕНСОРНОГО ИНТЕРФЕЙСА

Полная схема интегрального операционного усилителя тока для "сенсорного интерфейса на кристалле" представлена на рис. 5. Проектирование усилителя на КМОП элементах производилось в САПР Cadence технологического уровня 0,13 мкм. Оптимальные значения параметров некоторых элементов операци-

Таблица 1

Параметры элементов схемы ОУТ

Элементы	Значения параметров	
	Ширина канала W, мкм	Длина канала L, мкм
N-транзисторы, количество		
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		
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	

онного усилителя в качестве примера представлены в таблице 1.

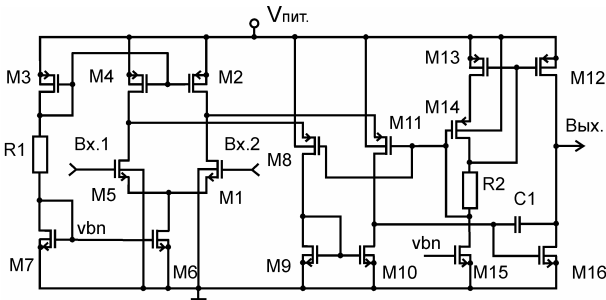


Рис. 5. Электрическая схема операционного усилителя интегрального сенсорного интерфейса

Для данного усилителя выполнены расчеты частотных характеристик (ac analysis) (рис. 6) и переходных процессов (transient analysis) (рис. 7).

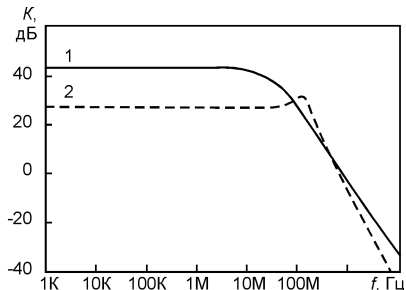


Рис. 6. Амплитудно-частотная характеристика операционного усилителя: 1 — с разомкнутой цепью обратной связи; 2 — с отрицательной обратной связью

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 порядка 5 МГц.

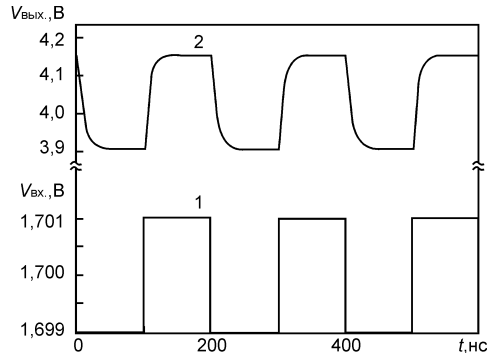


Рис. 7. Переходные процессы в операционном усилителе на частоте 10 МГц: 1 — входной сигнал; 2 — выходной сигнал

V. ИНТЕГРАЦИЯ НА КРИСТАЛЛЕ ОПЕРАЦИОННОГО УСИЛИТЕЛЯ С ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

Разработанный операционный усилитель тока является основной составляющей схемы считывания (read-out circuitry) в цепи контроля газовой среды, а также цифро-аналогового преобразователя в цепи нагрева чувствительного элемента сенсорной системы. Схема считывания представляет собой операционный усилитель, в цепь обратной связи которого включен чувствительный элемент сенсора (рис. 8). В процессе контроля изменение сопротивления чувствительного элемента преобразуется в выходное напряжение операционного усилителя. Выходной сигнал схемы считывания определяется отношением 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.

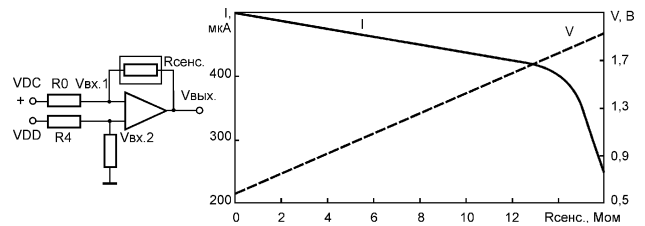


Рис. 8. Схема считывания и зависимость ее параметров от сопротивления чувствительного элемента

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

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 2 В. Ток, потребляемый схемой считывания, составляет 500 мкА при небольших значениях сенсора и уменьшается с повышением значений сопротивления. Поэтому, при напряжении питания 2 В, максимальная мощность, потребляемая схемой считывания, не превышает 1 мВт.

VI. МОДЕЛИРОВАНИЕ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ "МИКРОСИСТЕМЫ НА КРИСТАЛЛЕ"

Аналоговый сигнал с выхода схемы считывания преобразовывается в цифровой с помощью 8-битного параллельного аналого-цифрового преобразователя (АЦП), и полученная последовательность импульсов подается на контроллер. Параллельный АЦП является самым быстрым типом преобразователя, использующим достаточное количество компараторов, работающих параллельно. Разработанный 8-разрядный параллельный АЦП состоит из 16 резисторов и 15 компараторов (рис. 9).

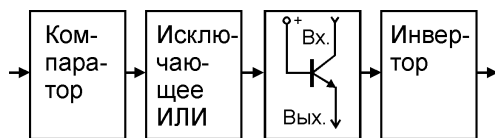


Рис. 9. Структурная схема аналого-цифрового преобразователя сенсорного интерфейса

Выходное сопротивление АЦП равно 1 МОм, а при необходимости 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 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 резисторов и компараторов, 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 необходимым током смещения (>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 сенсора.

VII. РАЗРАБОТКА КОМПАРАТОРА ДЛЯ СХЕМЫ АЦП В СОСТАВЕ "СЕНСОРНОГО ИНТЕРФЕЙСА НА КРИСТАЛЛЕ"

Для использования в схеме аналого-цифрового преобразователя разработан компаратор (рис. 10) с потребляемой мощностью 0,4 мВт. Источник тока компаратора состоит из двух транзисторов, включенных по диодной схеме, и используется для питания предварительного усилителя.

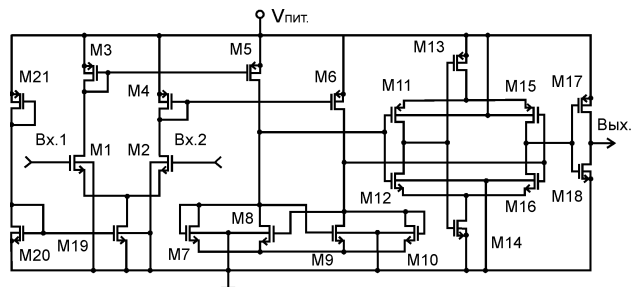


Рис. 10. Электрическая схема компаратора для "сенсорного интерфейса на кристалле"

Предварительный усилитель посылает сигнал в триггерную ячейку, которая позволяет быстро достигать 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 (генератор тактовых импульсов не используется).

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. Зависимости выходного тока и коэффициента усиления от напряжения питания для разработанного компаратора представлены на рис. 11. Результаты ДС-анализа (анализа по постоянному току) показали, что при заданных параметрах схемы компаратора его коэффициент усиления равен порядка 3,9. Компаратор сохраняет свои параметры в достаточно широком диапазоне изменения напряжения питания.

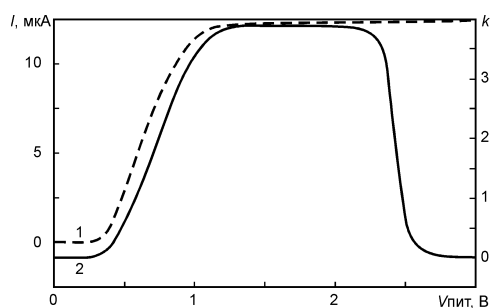


Рис. 11. Зависимость выходного тока (1) и коэффициента усиления (2) от напряжения питания компаратора

VIII. ЦИФРО-АНАЛОГОВЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ДЛЯ СЕНСОРНОЙ МИКРОСИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ

Восьмиразрядный цифро-аналоговый преобразователь (ЦАП) предназначен для преобразования 8-битного бинарного сигнала с выхода контроллера в аналоговый сигнал, который передается в цепь управления нагревателем. Схема ЦАП выполнена в виде инвертирующего операционного усилителя, на входе которого включена последовательная цепь резисторов для подачи на них бинарных входных сигналов.

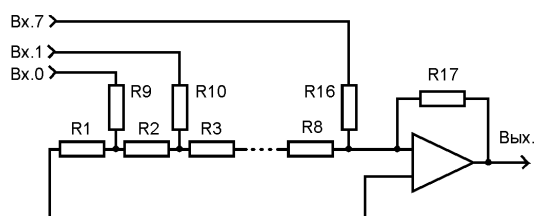


Рис. 12. Цифро-аналоговый преобразователь для сенсорной микросистемы

Разрядность 8 бит выбрана с целью 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. 12. В его основу положена схема операционного усилителя тока, который используется в схеме считывания. ЦАП используется для поддержания желаемого аналогового опорного напряжения на нагревателе в соответствии с величиной входного цифрового сигнала. Значение опорного напряжения определяется электрофизическими характеристиками нагревателя и задается для каждого требуемого уровня температуры.

IX. МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА

Для установления температуры нагревателя сенсорной микросистемы в пределах от комнатной (20°C) до 500°C разработан блок управления температурой. В схеме данного блока транзистор М5 с большим значением ширины канала служит для подачи на нагреватель тока нагрева сенсора. Каскад на транзисторах М1–М4 используется для пропускания через нагреватель постоянного тока с целью измерения падения напряжения на нагревателе. Напряжение на нагревателе сравнивается с опорным напряжением и по результатам сравнения определяется температура нагрева. Если напряжение нагревателя меньше, чем опорное напряжение, это означает, что температура сенсора меньше требуемого значения. Поэтому схема управления подает больший ток, когда значение импульса тактового генератора имеет малую величину, и измеряет напряжение, когда значение данного параметра имеет большую величину.

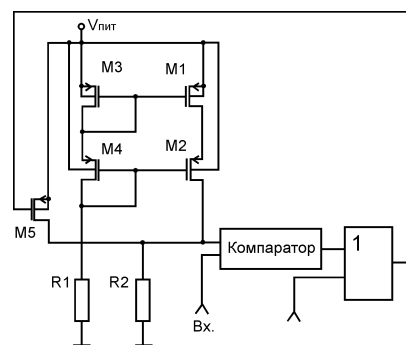


Рис. 13. Схема регулирования температуры нагревателя чувствительного элемента

Выходная характеристика схемы управления температурой показана на рисунке 14. График А представляет собой сигнал от генератора тактовых импульсов схемы управления. На графике Б показано, как схема управления температурой подает ток 20 мА для нагревания, а затем ток 1 мА для измерения, когда температура сенсора меньше оптимального зна-

чения. Графики В–Г показывают поведение схемы управления температурой (ее выходной сигнал), когда температура достигает требуемой величины.

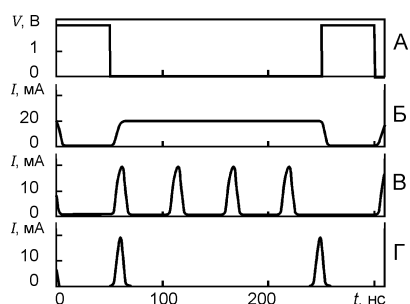


Рис. 14. Выходные характеристики схемы управления температурой сенсора

Х. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено проектирование и моделирование в САПР Cadence интегрального сенсорного интерфейса в виде "системы на кристалле". В качестве основного функционального блока сенсорного интерфейса выбран операционный усилитель тока, управляемый напряжением. Исследованы амплитудно-частотные характеристики операционного усилителя и переходные процессы при использовании синусоидального и импульсного сигнала. Полоса пропускания операционного усилителя составляет примерно 23 МГц, усиление в рабочей полосе частот — около 41,7 дБ, параметр "усиление × полоса частот" равен 700 МГц. Проведено проектирование аналого-цифрового преобразователя для согласования чувствительного элемента с входом компьютерной системы, а также цифро-аналогового преобразователя для компьютерного управления температурой нагревателя чувствительного элемента сенсорной микросистемы. Блок управления позволяет регулировать температуру при контроле газовых сред в пределах от 20 до 500°C.

P. S.

В качестве одного из вариантов сенсорного интерфейса в виде "микросистемы на кристалле" разработана интегральная микросхема генератора, управляемого напряжением. Частота генератора зависит от падения напряжения на сопротивлении чувствительного элемента сенсорной микросистемы. Данный генератор имеет пять каскадов, состоящих из дифференциальных пар транзисторов, а также содержащих конденсаторы, емкости которых управляются напряжением. В качестве таких конденсаторов использованы емкости между затвором и подложкой интегральных р-МОП транзисторов.

Частота выходного сигнала разработанного генератора варьируется в пределах от 300 до 525 МГц при

изменении управляющего напряжения от 0,4 до 1,2 В. Для преобразования выходного сигнала генератора в последовательность прямоугольных импульсов, необходимую для работы микроконтроллера, на выходе генератора включен детектор перехода через ноль. Указанный детектор представляет собой операционный усилитель, состоящий из дифференциального усилителя и каскодной схемы.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Адамов Д.Ю., Матвеев О.С. Новые технологии для контроллеров интеллектуальных датчиков // Датчики и системы. – 2009. – № 9, – С. 50–51.
- [2] 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 2008 // "Наноструктурные материалы – 2008: Беларусь–Россия–Украина (НАНО–2008)". Материалы 1 международной научной конференции. Минск, 22–25 апреля 2008. – С. 287–288.
- [3] Колешко В.М., Шевченко А.А., Гулай А.В. и др. Влияние фторидов редкоземельных элементов на микроструктуру и свойства мишеней для распыления на основе ZnO // Сборник научных трудов "Порошковая металлургия". – 2009. – Вып. 31. – С. 286–289.
- [4] Колешко В.М., Гулай А.В., Шевченко А.А., Гулай В.А. и др. Синтез тонких пленок оксида цинка при вакуумном распылении керамических мишеней // Международный симпозиум "Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка". Минск, 25–27 марта 2009. – Ч. 1. – С. 215–220.
- [5] Колешко В.М., Гулай А.В., Шевченко А.А., Гулай В.А. Получение сверхтонких пленок оксида цинка для сенсорных наноструктур // "Нанотехнологии и наноматериалы", материалы международной научно-технической конференции. Москва, 30 марта–1 апреля 2009. – С. 506–510.
- [6] 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, Ukraine. – 2009. – P. 24–25.
- [7] Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А., Воронко Н.П. Нанозлектромеханические сенсорные системы контроля газов на основе сверхтонких диэлектрических пленок // Вторая Всероссийская конференция с международным интернет-участием "От наноструктур, наноматериалов и нанотехнологий к nanoиндустрии", тезисы докладов. Ижевск, 8–10 апреля 2009. – С. 57.
- [8] Колешко В.М., Гулай А.В., Гулай В.А., Воронко Н.П. Сенсорные МЭМС/НЭМС на основе многослойных диэлектрических наноструктур // Труды 9-й международной конференции "Пленки и покрытия–2009". Санкт-Петербург, 26–29 мая 2009. – СПб.: 2009. – С. 329–331.
- [9] 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)". Минск, 20–23 октября 2009. – Т. 3. – С. 225–227.