

К. т. н. М. Н. МУРШУДЛИ, А. М. АЛИЕВА, М. И. МУСАЕВ

Азербайджанское Национальное аэрокосмическое агентство, г. Баку  
E-mail: mnmur@yandex.ru

Дата поступления в редакцию  
12.10 2004 г.

Оппонент В. К. КУРИННЫЙ  
(АО "Укрналит", г. Киев)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ ГАЗОАНАЛИЗАТОРА С ТРАНЗИСТОРНЫМ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ

*Приведена блок-схема и описан принцип работы цифрового газоанализатора с транзисторным чувствительным элементом, работающим в режиме автоколебаний.*

В качестве чувствительных элементов (ЧЭ) многих газоанализаторов используются резистивные элементы на основе органических и неорганических материалов. Для таких ЧЭ характерны большие значения времени адсорбции и десорбции, для уменьшения которого выбирают оптимальные температурные режимы, задают соответствующий алгоритм работы элемента. Уменьшить это время позволяет также использование частотного режима.

Существует множество различных схематических и конструктивных возможностей создания структур с частотным выходом. Мы в качестве ЧЭ использовали кремниевый биполярный транзистор, работающий в режиме автоколебаний. Транзистор формировался в эпитаксиальной пленке *n*-типа, расположенной на подложке *p*-типа проводимости. В отличие от обычных планарных транзисторов в нашем случае отсутствовал скрытый *n*<sup>+</sup>-слой, который обычно вводится для уменьшения сопротивления коллектора (рис. 1).

При определенных конструктивно-технологических условиях получения транзисторной структуры на *n-p-n*-транзисторе в инверсном режиме работы

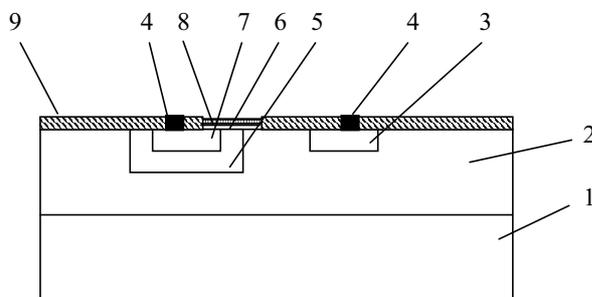


Рис. 1. Транзисторная кремниевая газочувствительная структура:

1 — подложка *p*-типа проводимости; 2 — эпитаксиальная пленка *n*-типа; 3 — коллектор (*n*<sup>+</sup>-слой); 4 — контакты к эмиттеру и коллектору; 5 — база (*p*-слой); 6 — тонкий окисел (менее 100Å); 7 — эмиттер (*n*-типа); 8 — селективная мембрана; 9 — толстый слой SiO<sub>2</sub> (0,5—0,7 мкм)

при отключенной базе и превышении некоторого порогового напряжения возникают колебания тока и напряжения. При удалении окисла, защищающего выходящие на поверхность границы переходов, частота колебаний сильно зависит от состава окружающей среды, концентрации воздействующего газа.

Наибольший эффект наблюдался при воздействии окислов азота [1]. В этом случае частота колебаний линейно (при концентрациях меньше 500 ppm) зависела от концентрации газа. В случае же воздействия паров аммиака частота колебаний менялась неоднозначно (рис. 2). Таким образом, наблюдалось сложное взаимодействие поверхности транзистора с воздействующими газами, т. к. работало сразу несколько механизмов чувствительности поверхности к адсорбции: изменение условий на переходе "эмиттер—база", изменение поверхностной проводимости базы, изменение условий на границе "база—коллектор". В случае подбора соответствующего селективного покрытия можно достичь селективности отклика на окислы азота или аммиака. Кроме селективности отклика это может улучшить стабильность прибора, т. к. при отсутствии покрытия происходит медленное окисление поверхности и, вследствие этого, уменьшение чувствительности, "уход" других параметров.

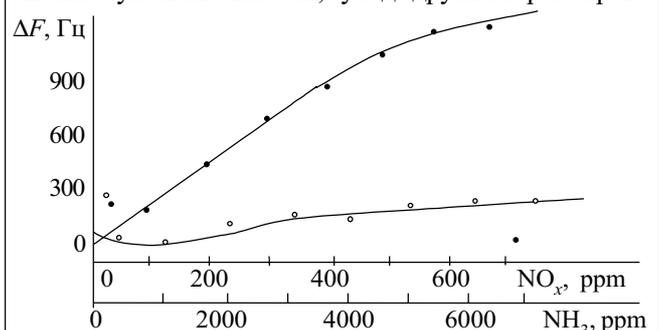


Рис. 2. Зависимость частоты колебаний  $F$  от концентрации детектируемого газа при температуре 25°C:  
○ —  $\text{NH}_3$ ; ● —  $\text{NO}_x$

Однако главным недостатком такого ЧЭ явилась нестабильность работы, которая сказывалась в произвольном изменении частоты при неизменной концентрации измеряемого газа. Дрейф зависел главным образом от колебаний температуры и составлял 300—500 Гц/°С, в то время как изменение концентрации газа на 1 ppm приводило к изменению частоты на 1,5—2 Гц (для  $\text{NO}_x$ ). Отсюда ясно, насколько важным являлся вопрос температурной компенсации.

Для осуществления такой компенсации на пластине кремния, рядом с ЧЭ, формировался опорный транзистор (эмиттер был общий). В отличие от ЧЭ, у опорного транзистора границы переходов, выходящие на поверхность, были защищены толстым термическим окислом, и поэтому реакций на изменение окружающего газового состава не наблюдалось. Величина разности частот ЧЭ и опорного транзистора должна была служить для определения температуры нагрева. Однако несмотря на то, что опорный транзистор, в отличие от ЧЭ, был защищен от газового воздействия толстым слоем двуоксида кремния, наблюдалась синхронизация их работы, т. е. шел захват большей из генерируемых частот тем элементом, собственная частота генерации которого была меньше. Причина влияния одного элемента на другой заключалась в недостаточной степени гальванической развязки ее активной и реактивной составляющих — элементы находились на одной подложке и не были изолированы друг от друга, а как показали измерения, RC-цепочкой, определяющей частоту колебаний, были емкость коллектор-подложка и сопротивление коллектора. Поэтому транзисторы разделялись диэлектрической изоляцией.

Для измерения температуры окружающей среды иным способом использовался расположенный на одной подложке с датчиком  $p-n$ -переход, напряжение  $V_{\text{вых}}$  которого после усиления обеспечивало температурную компенсацию ухода частоты ЧЭ. Опробована и температурная компенсация, достигаемая повышением теплоемкости датчика (ЧЭ размещался на относительно массивном радиаторе, который позволил осуществить эффективный отвод тепла). В результате температура датчика существенно менялась за время измерения, равное нескольким десяткам секунд.

Влияние паразитных емкостей на дрейф частоты трудно поддается количественному анализу из-за существенного технологического разброса параметров ЧЭ. Уменьшить дрейф можно путем жесткой стабилизации и оптимальным выбором рабочей точки ЧЭ.

Решение всех перечисленных задач позволило реализовать необходимую разрешающую способность и точность работы прибора.

Рассмотрено влияние светового излучения на параметры датчика и выявлена зависимость воздействия света на выходную частоту, в известной мере совпадающего с воздействием газа. Это обстоятельство, во-первых, приводит к возникновению существенной дополнительной погрешности измерения, во-вторых, делает возможным использование фоточувствительности датчика для контроля положения его рабочей точки на частотной характеристике нормированным по интенсивности световым потоком. Метод является дополнительным к ранее указанным способам температурной компенсации. Вместе с тем очевидно, что использование ЧЭ при регистрации газа должно происходить в условиях, исключающих световое воздействие на датчик.

ЧЭ, являясь прибором с отрицательным сопротивлением, позволяет осуществить прямую регистрацию уровня газовых компонентов методом измерения частоты собственных релаксационных колебаний, за-

висящих от концентрации детектируемого газа. Относительно малая инерционность ЧЭ, достаточно высокая линейность зависимости частоты колебаний от концентрации газа, высокая чувствительность и наличие частотного выхода позволяют сравнительно простыми методами осуществлять цифровую регистрацию измеренной концентрации газа.

Разработанный на базе кремниевого ЧЭ с отрицательным сопротивлением цифровой газоанализатор имеет функциональную схему, приведенную на рис. 3.



Рис. 3. Функциональная схема газоанализатора

*Источник питания* — аккумуляторная батарея с номинальным выходным напряжением 5 В, содержащая 4 последовательно соединенных аккумулятора типа Д-0,55 и обеспечивающая непрерывную работу прибора в течение четырех часов.

*Преобразователь напряжения* осуществляет преобразование напряжения в постоянное, регулируемое по величине стабилизированное напряжение 15—20 В, необходимое для питания ЧЭ. Номинальное значение выходного стабилизированного напряжения определяется оптимальным режимом генерации ЧЭ.

*Стабилизатор тока датчика* стабилизирует ток в цепи ЧЭ. Регулировкой его величины в пределах 0,5—5 мА устанавливается точка на ВАХ ЧЭ, соответствующая минимальному дрейфу частоты.

*Датчик* содержит собственно адсорбционно-чувствительный элемент, радиатор, обеспечивающий необходимую тепловую инерцию ЧЭ, световой лабиринт, исключающий световую засветку ЧЭ, и миниатюрную лампу накаливания для калибровки прибора в целом.

*Формирователь импульсов* осуществляет нормирование выходных импульсов ЧЭ по амплитуде и длительности. Осуществляет их согласование со входом КМОП-микросхем.

*Блок управления* предназначен для ввода внешних команд управления, задания работ узлов и блоков прибора, выдачи результатов измерения на индикатор.

*Опорный генератор* формирует импульсы с частотой, равной исходной частоте ЧЭ, таким образом, что их разность равна нулю. Последнее необходимо для начальной установки счетчиков в нулевое положение.

*Генератор стабильного тока лампы* задает строго постоянный ток лампы накаливания, расположенной в датчике. Его величина регулируется в процессе тарировки прибора по известной концентрации детектируемого газа.

*Счетный блок* осуществляет подсчет разности частот ЧЭ и опорного генератора.

Блок индикации включает в себя запоминающие дешифраторы двоично-десятичного кода в семисегментный код и три светодиодных индикатора.

Газоанализатор работает следующим образом.

При установленных значениях напряжения и тока ЧЭ генерирует импульсы, следующие с начальной частотой  $F_0$ . Пройдя через формирователь, они поступают в блок управления на первый селектор импульсов. Одновременно на данный селектор поступают формируемые импульсы управления с длительностью  $t_0$ . Селектор отпирается, и импульсы поступают в первом цикле на счетный блок импульсов ЧЭ, где они суммируются и запоминаются (здесь число импульсов  $N=F_0 t_0$ ).

Во втором цикле импульсы от опорного генератора, следующие с частотой, равной  $F_0$ , через второй селектор также поступают на счетный блок в количестве  $N=F_0 t_0$ . В счетном блоке производится операция вычитания, и в случае равенства частот ЧЭ и опорного генератора в блок индикаторов записываются нули. Одновременно в блоке управления формируется импульс сброса, обнуляющий счетный блок и переводящий селекторы в исходное состояние.

В случае неравенства частот ЧЭ и опорного генератора предусмотрена внешняя регулировка частоты опорного генератора (установка "0").

При воздействии на ЧЭ активного газа происходит изменение частот импульсов, т. е. имеет место разность частот ЧЭ и опорного генератора, фиксируемая счетным блоком и индикатором. Численное значение этой разности можно регулировать изменением величины  $t_0$ , т. е. времени селекции, и таким образом осуществлять калибровку верхней точки шка-

лы прибора. Регулировка значения  $t_0$  производится внешней регулировкой потенциометра и устанавливается на заведомо известное калиброванное значение измеряемой концентрации газа в соответствии с показаниями индикаторов.

Для оперативной рабочей калибровки прибора включается внешняя засветка ЧЭ. Яркость свечения лампочки, расположенной в датчике, регулируется таким образом, чтобы изменение частоты ЧЭ, вызванное световым потоком, было эквивалентно изменению частоты, обусловленному воздействием калиброванной концентрации активного газа.

Характеристики прибора при детектировании  $\text{NO}_x$  (с чувствительным элементом без селективной мембраны) следующие:

- обнаружительная способность на уровне 3—5 ppm или менее 10 мг/см<sup>3</sup>;
- линейная зависимость частоты от концентрации в диапазоне 5—500 ppm;
- диапазон рабочих температур от -20 до +50°C;
- погрешность измерения порядка 10%.

Прибор позволяет в течение нескольких секунд измерить концентрацию окислов азота, отображаемую на цифровом табло тремя десятичными разрядами.

Конструктивно газоанализатор выполнен в виде малогабаритного прибора с внешними размерами 150×85×25 мм.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Abdullayev A. G., Evdokimov A. V., Murshudly M. N., Scheglov M. I. Gas sensor based on a transistor structure // Sensors and Actuators.— 1987.— Vol. 11.— P. 339—347.

ВЫСТАВКИ. КОНФЕРЕНЦИИ



**МОСКВА, 8—10 сентября 2005 г.**

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана при участии ОАО ЦНИТИ "Техномаш"

**XI Международная научно-техническая конференция**

**ВЫСОКИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ РОССИИ**

(Материалы и устройства функциональной электроники и нанофотоники)

**XVII Международный симпозиум**

**ТОНКИЕ ПЛЕНКИ В ЭЛЕКТРОНИКЕ**

Посвящается 175-летию МВТУ

**ОСНОВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ**

*Электронные технологии в машиностроении.*

*Вакуумное технологическое оборудование и системы автоматического управления.*

*Материалы, оборудование и технологии нанoeлектроники и нанофотоники.*

*Нанотехнологии и фотонные кристаллы.*

*Новые технологии производства, обработки и исследования наноматериалов.*

*Технологии и оборудование для производства приборов электронной техники и радиоэлектронных устройств.*

*Наноструктурированные материалы и фотонные кристаллы в оптоэлектронике, медицине и оптическом приборостроении.*

*Микроэлектромеханические системы в медицине и промышленности.*

*Получение, свойства и применение тонких пленок в электронике. Системы и устройства радиотехники и средств связи.*

*Методы контроля функциональных свойств материалов электронной техники, измерительная аппаратура и аналитические методы.*

*Моделирование и информационное обеспечение исследований.*

☎ (095)267-0983, факс (095)267-1739; E-mail: bulygina@mx.bmstu.ru

Технология и конструирование в электронной аппаратуре, 2005, № 1