

УДК 681.121.83;533.6.08

EDN: WONCMN

© А. Л. Касенко, П. А. Щур, Е. А. Драч, И. Г. Борзунов, В. В. Егоров,
Б. Е. Прудников, А. М. Баранов, Н. Н. Самотаев, К. Ю. Облов, 2026

РАЗРАБОТКА МЭМС-СЕНСОРА КАЛОРИМЕТРИЧЕСКОГО ТИПА НА ОСНОВЕ МЕМБРАН ОКСИДА ЦИРКОНИЯ

В статье представлена альтернативная кремниевой технология изготовления микротермального МЭМС-сенсора, предназначенного для измерения расхода газа. МЭМС-сенсор потока формировался на серийно выпускаемых мембранах из оксида циркония, на поверхность которых методом магнетронного напыления наносился слой платины. Топология нагревателя и терморезисторов с контактными площадками прорисовывалась методом лазерной абляции. Полученные чипы монтировались на керамический держатель, изготовленный из оксида алюминия методом двустороннего лазерного микрофрезерования, который устанавливался на печатную плату и в корпус ТО-8. Были определены значения ТКС тонкопленочных платиновых резисторов, измерены зависимости температуры нагревателя сенсора и потребляемой мощности от прикладываемого напряжения нагрева в диапазоне 0–2.5 В. Проведены измерения потока воздуха в диапазоне от 10 до 60 л/мин. Показано, что результат — изменение ΔR — зависит от положения сенсора в потоке газа. Чувствительность сенсора составляет приблизительно 0.013 Ом/(л/мин). Время нагрева сенсора до рабочей температуры не превышает 136 мс.

Ключевые слова: калориметрический МЭМС-сенсор потока, мембрана оксида циркония, измерение расхода газа, магнетронное нанесение платины, температурный коэффициент сопротивления, потребляемая мощность, чувствительность

ВВЕДЕНИЕ

Микроэлектромеханические сенсоры (МЭМС) потока находят широкое применение в медицине, промышленности, охране окружающей среды и других областях, где существует необходимость в измерениях массового расхода газов и жидкостей [1].

В общем случае МЭМС-сенсоры расхода могут быть классифицированы как: нетепловые — пьезоэлектрические и оптические, и тепловые — времяпролетные, термоанемометрические и калориметрические. Наибольший интерес в изучении и применении представляют сенсоры последнего типа, т.к. могут гарантировать простоту интеграции в микросистемы, возможность непрерывного мониторинга расхода, а также работу в широком диапазоне потоков газа.

В случае времяпролетных сенсоров измеряемой величиной является время задержки теплового импульса, необходимое для его прохождения расстояния между нагревателем и термочувствительным элементом. Это время задержки зависит от скорости течения жидкости или газа [2].

Термоанемометрические сенсоры (термоанемометры) — это одни из самых распространенных видов сенсоров для измерения расхода. Они используют тепловой принцип для измерения скоро-

сти движения воздушных потоков и газов. Конструкция включает чувствительный элемент — нагреватель, который прогревается до определенной температуры и охлаждается под воздействием потока [3].

Базовым принципом функционирования термоанемометра является теплообмен между нагретым элементом и воздушным потоком. Нагреватель сенсора нагревается до заданной температуры. При движении газа вдоль сенсора его нагреватель охлаждается. Электронная система компенсирует теплотери, увеличивая мощность нагрева. Количество дополнительной мощности, необходимой для поддержания заданной температуры нагревателя, позволяет вычислить скорость потока и массовый расход газа.

Принцип работы калориметрического сенсора основан на изменении температурного поля вблизи нагревателя потоком протекающего газа. Разница температур термочувствительных элементов, расположенных вверх и вниз по течению относительно нагревателя, зависит от величины массового расхода газа [4].

Разработаны также сенсоры теплового потока, работа которых основана на комбинации вышеуказанных принципов измерения. В частности, калориметрический сенсор более чувствителен

к малым потокам газов, в то время как времяпролетный и термоанемометрический сенсоры дают лучшие результаты при измерении больших потоков.

Актуальной задачей является мониторинг расхода природного газа посредством специализированных устройств учета. Современные газовые счетчики обладают большим разнообразием: мембранные, ультразвуковые, турбинные, микротермальные [5].

С точки зрения эксплуатации современной тенденцией является разработка "умных" счетчиков газа, обеспечивающих не только проведение измерений, но и сбор статистических данных, их беспроводную передачу в управляющую компанию, самодиагностику и функционирование от автономного питания. Это позволяет создавать счетчики газа, не требующие дополнительного подсоединения кабелей передачи данных и электрического питания.

В связи с этим появился большой интерес к созданию и разработке микротермальных МЭМС-сенсоров, которые могли бы гарантировать высокую точность измерений и стабильность характеристик во времени при достаточно низком энергопотреблении, что обеспечит долговременную автономную работу счетчика расхода газа.

Отличительной особенностью МЭМС-технологии является возможность создавать сенсоры потока с микронагревателями и термодатчиками без использования движущихся частей, что упрощает изготовление и эксплуатацию сенсоров. Еще одной причиной большого интереса к МЭМС-сенсорам расхода являются преимущества, связанные с высокой чувствительностью к малому расходу, простота использования в различных режимах измерения [6], а также возможность расположения всех измерительных модулей на одном кристалле [7].

Особенно широкое практическое применение получили МЭМС-сенсоры, которые изготавливаются путем обработки кремния с использованием стандартных CMOS-процессов. Типичная структура МЭМС-сенсора включает нагреватель и термодатчики из платины или поликремния, размещенные на тонкой мембране из оксида или нитрида кремния. Для уменьшения напряжений, возникающих при нагреве нагревателя, наиболее широко используются двухслойные мембраны $\text{SiO}_2 / \text{Si}_3\text{N}_4$. Мембрана необходима, чтобы уменьшить тепловые потери в подложку и время отклика сенсора в режиме периодического нагрева. Кроме того, на тот же кристалл, на котором изготовлен МЭМС-сенсор, могут быть интегрированы усилители и АЦП (в случае full-CMOS решений) [8].

В настоящее время в области МЭМС-сенсоров потока на основе кремниевой технологии полно-

стью доминируют сенсоры иностранных производителей, в частности компании Sensirion [8].

Тем не менее кремниевая технология является не единственным технологическим решением при создании МЭМС-сенсоров потока газа.

Керамические МЭМС-сенсоры представляют собой альтернативу традиционным кремниевым микросистемам, особенно в условиях высоких температур, агрессивных химических сред и механических нагрузок. Для измерения потока газа, в частности в энергетике, автомобильной промышленности и системах контроля природного газа, керамические материалы обеспечивают повышенную термостабильность, химическую инертность и долговечность по сравнению с сенсорами, выполненными на кремнии [9].

Кроме того, керамическая технология позволяет отказаться от большинства технологий микроэлектроники, требующих дорогостоящего оборудования: окисления кремния, глубокого травления кремния для формирования мембран и процессов фотолитографии.

Наиболее часто используемые керамики в МЭМС-устройствах это — Al_2O_3 ; ZrO_2 и LTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramics).

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Целью данной работы является разработка и проведение экспериментального исследования калориметрического МЭМС-сенсора потока газа для бытовых применений, выполненного на мембране из оксида циркония.

Важно отметить, что мембраны из Al_2O_3 ; ZrO_2 и LTCC уже давно используются для создания сенсоров различных типов, в частности, их используют для изготовления газовых сенсоров [10, 11]. Однако для МЭМС-сенсоров потока газа керамика ZrO_2 используется впервые.

МЭМС-сенсор потока формировался на серийно выпускаемых мембранах из оксида циркония, на поверхность которых методом магнетронного напыления наносился слой платины. Далее методом лазерной абляции прорисовывалась топология нагревателя и терморезисторов с контактными площадками и выполнялось разделение на чипы. Полученные чипы монтировались на керамический держатель, изготовленный из оксида алюминия методом двустороннего лазерного микрофрезерования, который устанавливался на печатную плату и в корпус [12].

Такой выбор технологий для сенсоров потока использован впервые и потенциально обеспечивает быстрое создание недорогих и стабильных МЭМС-сенсоров, их долговечность при работе в агрессивных условиях, а также низкое энергопотребление расходомера или умного счетчика.

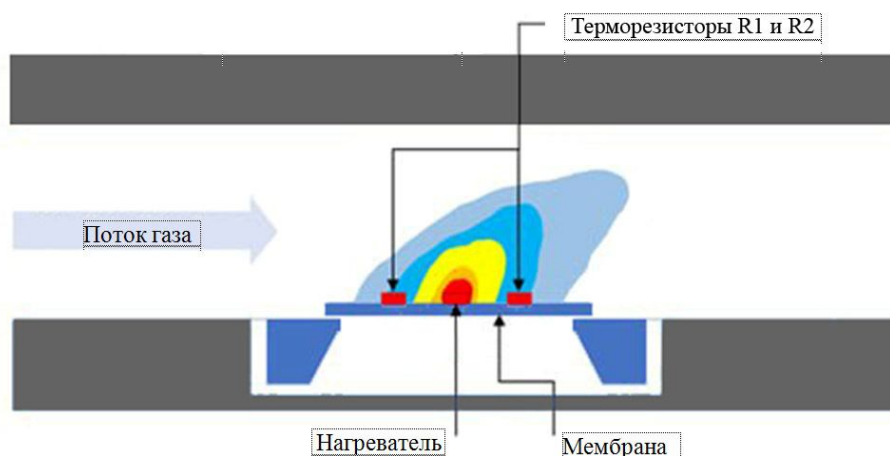


Рис. 1. Упрощенная схема расположения основных элементов на микро-термальном МЭМС-сенсоре потока газа

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Принцип действия разрабатываемого МЭМС-сенсора основан на калориметрическом методе измерения, который базируется на изменении температуры терморезисторов R1 и R2, возникающем при движении газа по газопроводу (рис. 1). Расход газа определяется количеством тепла, которое уносит поток. При этом возникает разница температур терморезисторов, расположенных до и после нагревателя — $|T_2 - T_1|$. Измеряемой величиной является разница сопротивлений терморезисторов R_1 и R_2 .

В типичной конфигурации с одним нагревателем и двумя терморезисторами (вверх и вниз по потоку) выходной сигнал определяется как разность температур:

$$\Delta T = T_{\text{после}} - T_{\text{до}}, \quad (1)$$

где $T_{\text{после}}$ — температура терморезистора, находящегося после нагревателя, $T_{\text{до}}$ — температура терморезистора до него.

Для низких скоростей потока в ламинарном режиме зависимость от скорости потока (или расхода) можно аппроксимировать линейной функцией:

$$\Delta T \approx K \cdot V, \quad (2)$$

где V — скорость газа (м/с), K — чувствительность сенсора, зависящая от теплофизических свойств газа и геометрии.

Изменение сопротивления связано с изменением температуры за счет температурного коэффициента сопротивления (ТКС) согласно уравнению:

$$\Delta R / R_0 = \alpha \cdot \Delta T, \quad (3)$$

где R_0 — сопротивление при начальных условиях, α — ТКС [1/К].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Обоснование выбора материала для МЭМС

В данной работе материалом для МЭМС-сенсора потока являлась циркониевая керамика ZrO_2 типа 3YSZ (диоксид циркония, стабилизированный добавлением 3 мол.% Y_2O_3 [13]), выполненная в виде мембраны. Толщина мембраны составляла 30 мкм.

Такой выбор обоснован отличными механическими свойствами циркониевой керамики, благодаря которым проявляется ее стабильность и стойкость в жестких условиях эксплуатации: сильные газовые потоки, а также значительные температурные и вибрационные нагрузки. При этом у платины и циркониевой керамики 3YSZ достаточно близкие значения коэффициентов теплового расширения (КТР) ($8.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ и $9.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ соответственно) по сравнению с системами

платина – $\text{SiO}_2 / \text{Si}_3\text{N}_4$,

у которых КТР различаются в несколько раз. Это позволяет свести к минимуму механические напряжения между платиной и мембраной, возникающие в процессе периодического нагрева сенсора, что, в свою очередь, предотвращает деформацию мембран и отслоение тонкопленочных платиновых слоев.

Более того, ZrO_2 имеет наиболее низкую теплопроводность из всех используемых керамик (~ 2 Вт/(м·К)), наиболее близкую к SiO_2 (~ 1.4 Вт/(м·К)), что делает его предпочтительным для создания МЭМС-сенсоров теплового потока на некремниевой основе.

Технологические и конструктивные решения при создании МЭМС-сенсоров

В целях получения идентичных сенсоров была выбрана лазерная микромеханическая обработка сенсоров, которая позволяет быстро (1–2 мин) изготовить один экземпляр сенсора. К тому же для работы установки не требуется наличия чистой комнаты, а загрязняющая составляющая процесса лазерной обработки минимальна и сводится к образованию наночастичной пыли, удаляемой последующей отмывкой в ультразвуковой ванне.

Тонкопленочный платиновый нагреватель и два платиновых терморезистора в форме меандра были изготовлены на мембране ZrO_2 . Размер чипа сенсора составлял 1.3×1.3 мм. Топология сенсора показана на рис. 2, а, (1 и 3 — терморезисторы,

2 — нагреватель). Фото чипа сенсора в держателе приведено на рис. 2, б.

Платиновую металлизацию толщиной 1 мкм наносили на мембрану ZrO_2 методом магнетронного распыления, после чего в течение нескольких часов отжигали в печи с атмосферой воздуха при температуре 950 °С для стабилизации сопротивления нагревателя [14]. В процессе отжига сопротивление нагревателя уменьшилось в несколько раз. Отжиг прекращался, когда сопротивление переставало изменяться более чем на 1%.

Платиновый нагреватель и два терморезистора в форме меандра были сформированы методом лазерной абляции платины. Для этой цели изготовления был использован специальный волоконный лазер мощностью 20 Вт с настраиваемой длительностью импульса в диапазоне 50–200 нс и длиной волны 1.064 мкм [15].

Полученный чип с микронагревательными элементами монтировался на керамический держатель, изготовленный из монолитного оксида алюминия, методом двустороннего лазерного микрофрезерования [12]. Фотография держателя показана на рис. 2, в.

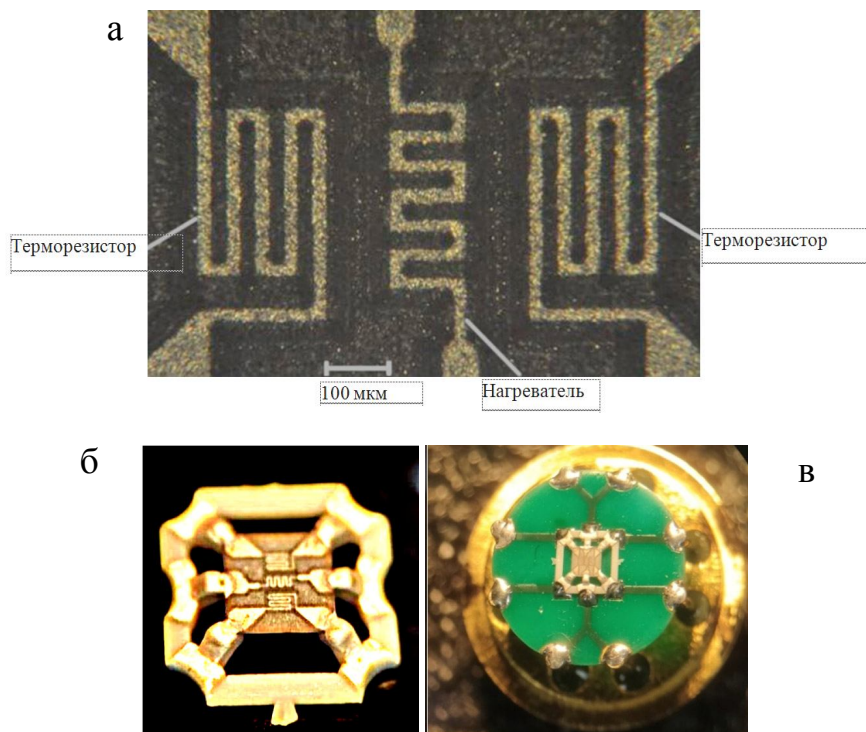


Рис. 2. Конструкция, топология и размеры сенсора потока (а); фотография мембраны из ZrO_2 с топологией нагревателя и терморезисторов (б); микрофотография чипа сенсора потока, установленного на керамическом держателе (в). Промышленно изготовленная печатная плата припаяна к металло-стеклянному корпусу типа TO-8

Контактная металлизация керамического держателя выполнена на основе толстопленочного серебра, легированного Рт-пастой (тип РР-33 [16]) и обладающего хорошей способностью к пайке стандартными припоями (в работе был использован твердый припой с содержанием 60% Sn / 40% Pb).

Керамический держатель с установленным на нем чипом сенсора был припаян к печатной плате. После чего вся конструкция была установлена на 8-выходном металlostеклянном корпусе стандарта ТО-8 (рис. 2, в), обычно используемом для сенсоров газа или давления [17].

Для определения ТКС платиновых резисторов их помещали в климатическую камеру. Климатическая камера имеет собственный датчик температуры. Для более точных измерений температуры вблизи сенсора, помещенного в климатическую камеру, размещали термопару. Измерения проводились в диапазоне температур от -30°C до $+150^{\circ}\text{C}$.

Исследование ВАХ проводилось путем подачи с блока питания напряжения на МЭМС-нагреватель и одновременном измерении проте-

кающего через него тока. Измерения проводились при комнатной температуре 25°C .

Для измерения скорости нагрева нагревателя сенсора, необходимой для определения времени выхода сенсора на рабочий режим, сенсор был включен в схему с делителем в виде резистора R_d номиналом 10 Ом. Нагрев нагревателя сенсора до требуемой температуры выполнялся с помощью двухсекундного ШИМ-сигнала с частотой 1 кГц и заполнением, соответствующим необходимому рабочему напряжению.

В качестве источника питания выступала титан-хлоридная литиевая батарея с номинальным напряжением 3.5 В. ШИМ создавался путем подачи прямоугольных импульсов на затвор полевого транзистора с генератора сигналов специальной формы. При этом происходил нагрев нагревателя R_n , сопровождающийся увеличением его сопротивления. Это приводило к изменению напряжения на сопротивлении R_d делителя, которое измерялось осциллографом.

Для измерения отклика сенсора в зависимости от массового расхода газа был собран стенд (рис. 3).

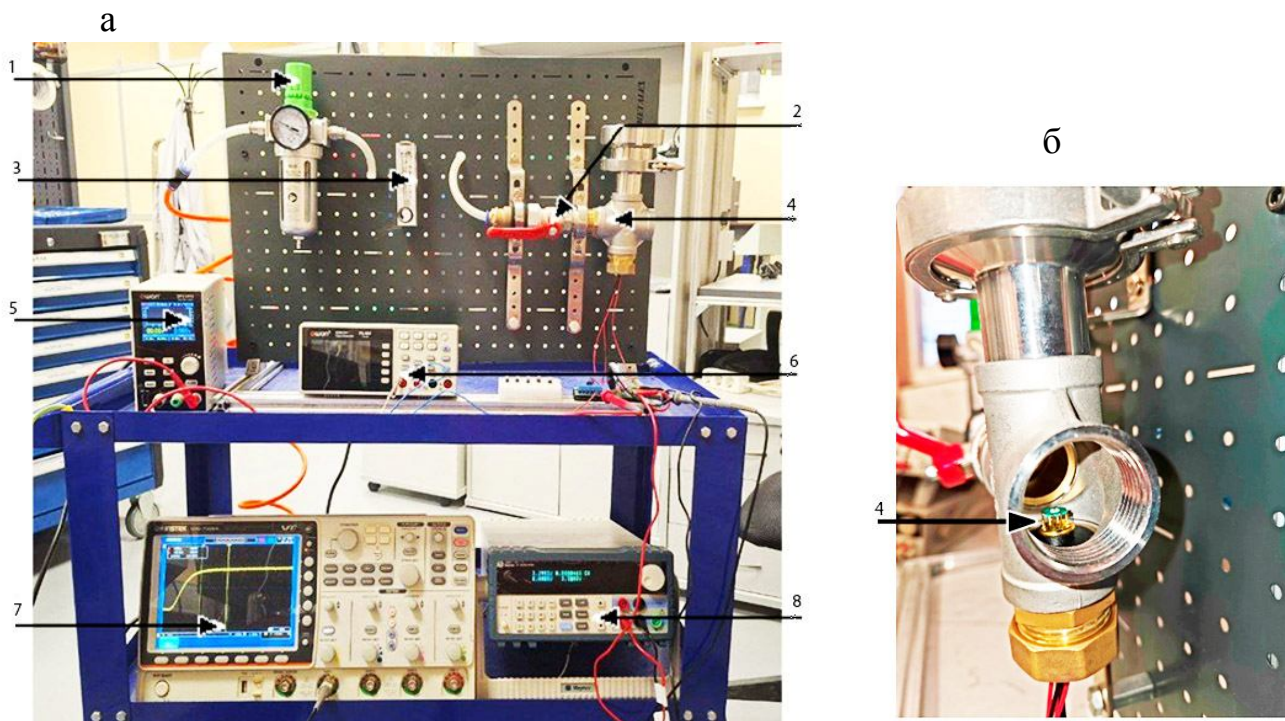


Рис. 3. Фотография экспериментальной установки для измерения характеристик разработанного МЭМС-сенсора (а) и размещение сенсора в трубе с регулируемым газовым потоком (б).

1 — клапан регулировки газового потока, 2 — ручной затвор, 3 — ротаметр, 4 — исследуемый сенсор, 5 — источник питания, 6 — генератор разогревающих сигналов, 7 — осциллограф, 8 — милливольтметр

Стенд включает отрезок газовой трубы (диаметром 32 мм), в которой размещался сенсор (4), клапан регулировки газового потока (1), ротаметр (3) для регулирования потока, ручной затвор (2) и компрессор, а также источник питания (5), генератор сигналов специальной формы (6), милливольтметр (8) и осциллограф (7), которые необходимы для проведения измерений.

Для проведения измерений на нагреватель сенсора подавалось рабочее напряжение. Измерения проводились при комнатной температуре окружающей среды (25 °С). При изменении скорости потока воздуха температура терморезисторов (R_1 и R_2) изменялась, а следовательно, изменялось их сопротивление.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Уточнение условий эксперимента

По описанной выше технологии была изготовлена партия МЭМС-сенсоров с топологией, представленной на рис. 2. В центре сенсора располагается нагреватель, справа и слева от него — терморезисторы. Ширина полосок платинового нагревателя и терморезисторов 20 мкм.

Сопротивление нагревателя (R_n) и терморезисторов (R_1 и R_2) при температуре 25 °С составляет 25.71, 36.37 и 35.73 Ом соответственно. Важно отметить, что различие сопротивлений терморезисторов составляет менее 2%, что можно считать хорошим результатом для данной технологии.

Определение ТКС платины

Чтобы проводить измерения, необходимо установить связь между сопротивлением платиновых терморезисторов и их температурой. Для этого были проведены измерения ТКС по описанной в разделе "Теоретическая часть" методике.

Измерения ТКС нагревателя и терморезисторов были проведены в диапазоне температур от –30 °С до +150 °С.

Полученные зависимости показаны на рис. 4.

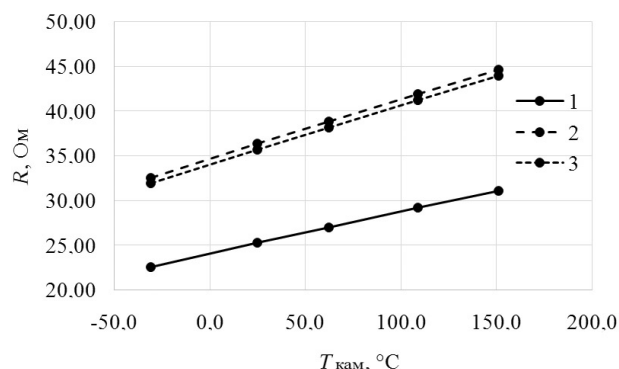


Рис. 4. Зависимость сопротивления от температуры среды ($T_{\text{кам}}$) для нагревателя (R_n , кривая 1) и терморезисторов (R_1 , кривая 2 и R_2 , кривая 3)

Из рисунка видно, что зависимости сопротивления от температуры имеют линейный характер. Приведенные значения ТКС были определены по формуле:

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot (T - T_0)), \quad (4)$$

где R_0 и T_0 — начальные сопротивление и температура (25 °С), R — сопротивление при температуре T .

Средние значения ТКС нагревателя R_n и терморезисторов R_1 и R_2 по всем температурам составили: 0.00184, 0.001836 и 0.001864 K^{-1} соответственно.

Измерение ВАХ нагревателя

Наиболее важным параметром, определяющим область применения сенсоров расхода газа, является потребляемая нагревателем мощность в режиме проведения измерений. Именно от значения потребляемой мощности зависит возможность успешного применения сенсора расхода газа в автономных устройствах, имеющих питание от батарей.

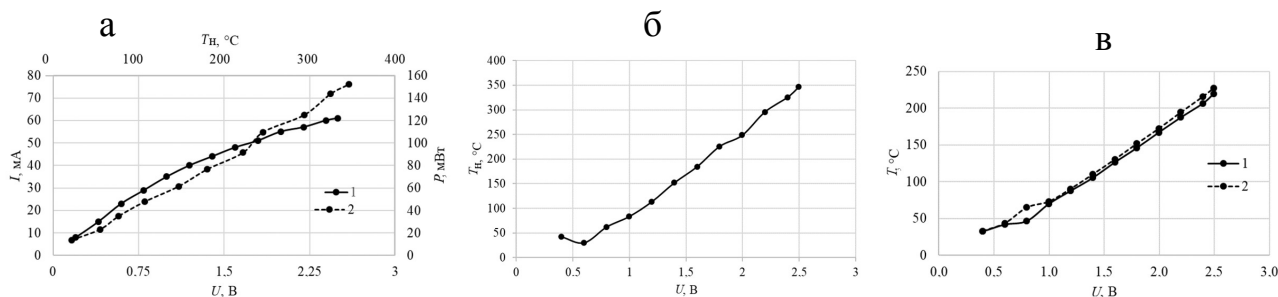


Рис. 5. ВАХ и зависимость мощности нагревателя от температуры (а), рассчитанные зависимости температуры $T = f(U)$ для нагревателя R_n (б) и терморезисторов R_1 (кривая 1) и R_2 (кривая 2) (в)

Для того, чтобы оптимизировать температуру проведения измерений, а следовательно, и мощность, была измерена ВАХ нагревателя в диапазоне напряжений от 0 В до 2.5 (рис. 5, а, кривая 1). Из полученной зависимости была рассчитана мощность нагревателя (рис. 5, а, кривая 2).

Используя формулу (4), были рассчитаны температуры нагревателя (рис. 5, б) и терморезисторов (рис. 5, в) в зависимости от напряжения, подаваемого на нагреватель. Из полученных зависимостей можно сделать вывод, что максимальная температура нагревателя T_H при напряжении 2.5 В составляет 346.8 °С. Потребляемая нагревателем мощность P_H составляет 152.3 мВт. Температуры терморезисторов R1 и R2 при отсутствии потока газа практически равны 220.1 °С и 227.8 °С соответственно. Поскольку считается, что для калориметрических МЭМС-сенсоров рабочая температура должна быть порядка 300 °С, было решено не проводить измерения ВАХ при напряжениях нагрева выше 2.5 В.

Измерение расхода газа

Измерения проводились в условиях ламинарного потока газа. В дальнейшем предполагается, что сенсор будет размещен в микроканале байпасного отвода от магистрального газопровода, где во всех режимах также будет соблюдаться режим ламинарного потока.

На рис. 6 показано изменение разности сопротивлений терморезисторов $|\Delta R| = R_1 - R_2$ в зависимости от расхода воздуха Q при напряжении нагревателя 2.4 В. Было установлено, что зависимость $|\Delta R| = f(Q)$ имеет близкий к линейному характер (уравнение (5), полученное из (2) и (3)) до зна-

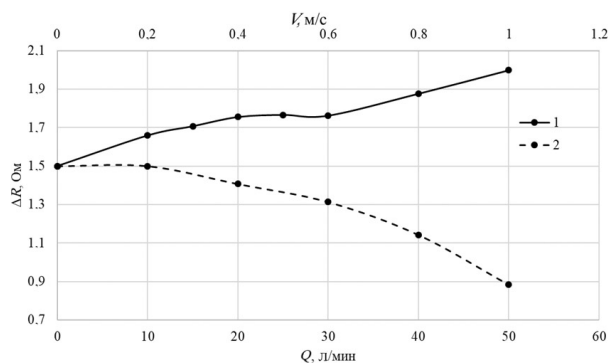


Рис. 6. Зависимость $|\Delta R|$ от расхода газа при расположении R1 перед нагревателем (1) и за нагревателем (2) (т.е. при движении потока в противоположных направлениях)

чений потока 30–40 л/мин, но результат — изменение $|\Delta R|$ — зависит от направления потока газа:

$$|\Delta R| / R_0 \approx \alpha \cdot K \cdot V. \quad (5)$$

Зависимости 1 и 2 на рис. 6 представляют собой выходные сигналы терморезисторов одного и того же сенсора, когда поток движется в противоположных направлениях. Видно, что при изменении направления потока воздуха увеличение значения ΔR от Q (рис. 6, кривая 1) сменяется уменьшением значения $|\Delta R|$ (рис. 6, кривая 2). Такое изменение разности сопротивлений $|\Delta R|$ можно объяснить следствием неравномерности их первоначального нагрева в отсутствие потока воздуха. Терморезистор R1 имеет более низкую температуру, чем терморезистор R2 (рис. 5, в, кривая 1). В этом случае, когда терморезистор R1 расположен по потоку за нагревателем, разница $|\Delta R|$ будет уменьшаться из-за того, что терморезистор R2 будет охлаждаться потоком воздуха, а терморезистор R1 будет дополнительно нагреваться потоком нагретого нагревателем воздуха. Когда R1 находится по потоку до нагревателя, его температура будет уменьшаться, а R2 увеличиваться. Следовательно, $|\Delta R|$ будет также увеличиваться. Чувствительность сенсора в потоке воздуха составляет ~ 0.013 Ом/(л/мин).

При подаче на мостовую схему напряжения, обеспечивающего ток в 1 мА через терморезисторы, напряжение $U_{\text{вых}}$ будет изменяться в диапазоне от 0.8 до 2 мВ.

Значение Q интересно с точки зрения контроля расхода газа. С физической точки зрения более полезной величиной является скорость потока газа V .

Скорость потока газа определяется уравнением

$$V = Q / S,$$

где Q — расход газа в м³/с, а S — площадь сечения трубы.

В нашем случае диаметр трубы равен 32 мм. Тогда $S = 8 \times 10^{-4}$ м². Изменение потока от 10 до 60 л/мин, соответствует изменению Q от 1.67×10^{-4} до 1×10^{-3} м³/с.

Скорость потока V при изменении расхода от 10 до 50 л/мин будет изменяться от 0.21 до 1 м/с.

Определение времени выхода сенсора на рабочий режим

Измерение объема газа, протекающего по трубопроводу через сечение, обычно проводят в периодическом режиме. Поэтому важное значение имеет время выхода сенсора в рабочий режим, что соответствует его нагреву до заданной температуры. На рис. 7 показана зависимость изменения напряжения на нагревателе от времени подачи рабочего напряжения. Для проведения измерений

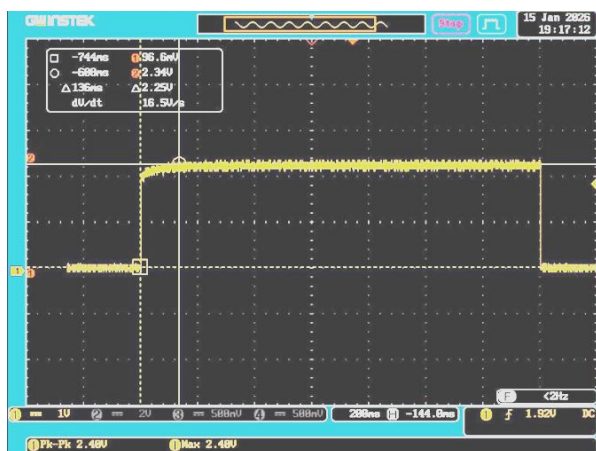


Рис. 7. Динамическая характеристика выхода сенсора на рабочий режим

нагреватель сенсора был включен в цепь с делителем напряжения. Видно, что при подаче рабочего напряжения 2.4 В нагреватель сенсора прогревается за 136 мс.

Исходя из полученного времени нагрева можно рассчитать мощность, затрачиваемую для проведения одного измерения расхода газа. Из рис. 5, а, видно, что при напряжении 2.4 В потребляемая сенсором мощность равна 146 мВт. Таким образом, можно оценить, что энергия для проведения одного измерения порядка 20 мВт·с.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлены первые результаты разработки калориметрического МЭМС-сенсора потока газа, выполненного на мембране ZrO_2 , и исследованы его параметры и характеристики.

Были определены значения ТКС нагревателя и терморезисторов, выполненных магнетронным напылением платины. Полученные значения — 0.00185 K^{-1} . Были измерены зависимости температуры нагревателя сенсора и потребляемой мощности от прикладываемого напряжения нагрева в диапазоне 0–2.5 В, определено время нагрева сенсора до рабочей температуры, а также энергия, необходимая для проведения одного измерения расхода газа.

Измерения потока проводились на воздухе в диапазоне от 10 до 60 л/мин. Показано, что результат изменения ΔR зависит от положения сенсора в потоке газа. Такой результат был объяснен различием температур терморезисторов и их расположением относительно потока газа. Очевидно,

что это недостаток текущей версии сенсора, который должен быть устранен в дальнейшем. Чувствительность сенсора составляет приблизительно 0.013 Ом/(л/мин) .

Конечной целью исследований является создание сенсора, способного работать длительное время (более 6 лет) от автономного источника питания (литиевая батарея типа D) в "умных счетчиках" расхода природного газа.

Для этого необходимо обеспечить минимальное энергопотребление сенсора при однократном измерении. Это, в свою очередь, требует минимизации энергопотребления в режиме измерения и времени выхода сенсора в рабочий режим. Предполагается, что оба эти параметра будут уменьшены за счет дальнейшей миниатюризации сенсора. Кроме того, энергопотребление можно изменять частотой проведения измерений. Ожидается, что благодаря оптимизации параметров сенсора его средняя потребляемая мощность при измерении один раз в минуту составит менее 1 мВт.

Данная работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № FSWU-2025-0009 "Керамические технологии в микроэлектронике").

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Kuo T.W., Yu L., Meng E. Micromachined thermal flow sensors — A review // *Micromachines*. 2012. Vol. 3. P. 550–573. DOI: 10.3390/mi3030550
2. Huang L. Micromachined thermal time-of-flight flow sensors and their applications // *Micromachines*. 2022. Vol. 13. Id. 1729. DOI: 10.3390/mi13101729
3. Nguyen N.T. Micromachined flow sensors — A review // *Flow Measurement and Instrumentation*. 1997. Vol. 8, iss. 1. P. 7–16. DOI: 10.1016/S0955-5986(97)00019-8
4. Сажин О.В., Первушин Ю.В. Микросенсор потока теплового типа для датчика массового расхода воздуха // *Научное приборостроение*. 2011. Т. 21, № 3. С. 52–61. URL: <http://iairas.ru/mag/2011/abst3.php#abst7>
5. Бозуш М.В., Кузьмичева Е.В., Пикалев Э.М., Бозуш А.М. Пьезоэлектрические акустические преобразователи и ультразвуковые расходомеры газа на их основе // *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2010. № 2. С. 21–24. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13072949>
6. Ejeia F., Azadi S., Razmjou A., Orooji Y., Kottapalli A., Warkiani M.E., Asadnia M. Design and applications of MEMS flow sensors: A review // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. Vol. 295. P. 483–502. DOI: 10.1016/j.sna.2019.06.020
7. Linze H., Ke X., Xiangyu S., Liwei L., Wei X. System-level modeling with temperature compensation for a CMOS-MEMS monolithic calorimetric flow sensing SoC // *Microsystems & Nanoengineering*. 2025. Vol. 11, art. 13. DOI: 10.1038/s41378-024-00853-8

8. Sensirion. Application note for SDP600 and SDP1000 series. Measuring Differential Pressure and Air Volume with Sensirion's CMOSens® technology [Электронный ресурс]. URL: https://www.soselectronic.cz/a_info/resource/c/sensirion/CMOSens_for_HVAC.pdf (дата обращения: 25.01.2026).
9. Samotaev N., Podlepetsky B., Mashinin M., Ivanov I., Obraztsov I., Oblov K., Dzhumaev P. Thermal conductivity gas sensors for high-temperature applications // *Micromachines*. 2024. Vol. 15, no. 1. Id. 138. DOI: 10.3390/mi15010138
10. Karpov E.E., Karpov E.F., Suchkova A., Mironova S., Baranov A., Sleptsov V., Calliari L. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2013. Vol. 194. P. 176–180. DOI: 10.1016/j.sna.2013.01.057
11. Vasiliev A.A., Pisliakova A.V., Sokolova A.V., Samotaev N.N. et al. Non-silicon MEMS platforms for gas sensors // *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2016. Vol. 224. P. 700–713. DOI: 10.1016/j.snb.2015.10.066
12. Samotaev N., Oblov K., Dzhumaev P. et al. Combination of Ceramic Laser Micromachining and Printed Technology as a Way for Rapid Prototyping Semiconductor Gas Sensors // *Micromachines*. 2021. Vol. 12. Id. 1440. DOI: 10.3390/mi12121440.
13. American Elements. 3% Yttria Stabilized Zirconia [Электронный ресурс]. URL: <https://www.americanelements.com/3-yttria-stabilized-zirconia-113482-02-3> (дата обращения: 25.01.2026).
14. Kalinin A., Roslyakov I.V., Tsymbarenko D.M., Bograchev D.A., Krivetskiy V.V., Napolskii K.S. Microhotplates based on Pt and Pt–Rh films: The impact of composition, structure, and thermal treatment on functional properties // *Sensors and Actuators A: Physical*. 2021. Vol. 317. Id. 112457. DOI: 10.1016/j.sna.2020.112457
15. Samotaev N., Oblov K., Ivanova A., Gorshkova A., Podlepetsky B. Rapid Prototyping of MOX Gas Sensors in Form-Factor of SMD Packages // *Proc. of the 2019 IEEE 31st International Conference on Microelectronics (MIEL)*. 2019. P. 157–160. URL: <https://www.proceedings.com/content/051/051152webtoc.pdf>
16. Semiconductor Ag–Pd–Pt pastes [Электронный ресурс]. URL: https://elma-paste.ru/paste_pt/ (дата обращения: 25.01.2026).
17. TO-8 Style Pressure Sensor Package [Электронный ресурс]. URL: <https://z-mars.ru/produktsiya/korpusa-datchikov/korpusa-metallosteklyannye-33018-to-8.html> (дата обращения: 25.01.2026).

ООО "ИНТЭР", Москва, Россия (Касенко А.Л., Щур П.А., Драч Е.А., Борзунов И.Г., Егоров В.В., Прудников Б.Е., Баранов А.М.)

Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия (Щур П.А., Драч Е.А., Борзунов И.Г., Егоров В.В., Прудников Б.Е., Баранов А.М.)

Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Москва, Россия (Самотаев Н.Н., Облов К.Ю.)

Контакты: Драч Екатерина Анатольевна, catherinedratch@yandex.ru

Материал поступил в редакцию 19.02.2026

DEVELOPMENT OF A CALORIMETRIC MEMS SENSOR BASED ON ZIRCONIUM OXIDE MEMBRANES

A. L. Kasenko¹, P. A. Shchur^{1,2}, E. A. Drach^{1,2}, I. G. Borzunov^{1,2}, V. V. Egorov^{1,2},
B. E. Prudnikov^{1,2}, A. M. Baranov^{1,2}, N. N. Samotaev³, K. U. Oblov³

¹Limited Liability Company "INTER", Moscow, Russian Federation

²Moscow Aviation Institute, Moscow, Russian Federation

³National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russian Federation

The article presents an alternative silicon technology for manufacturing a microthermal MEMS sensor designed to measure gas flow. The MEMS flow sensor was formed on commercially available zirconium oxide membranes, on the surface of which a layer of platinum was applied by magnetron sputtering. The topology of the heater and thermistors with contact pads was traced by laser ablation. The resulting chips were mounted on a ceramic holder made of aluminum oxide by double-sided laser micro milling, which was mounted on a printed circuit board and in the TO-8 housing. The values of the TCR of thin-film platinum resistors were determined, and the dependences of the sensor heater temperature and power consumption on the applied heating voltage in the range of 0–2.5 V. Air flow measurements were carried out in the range from 10 to 60 L/min. It is shown that the result of the change in ΔR depends on the position of the sensor in the gas flow. The sensitivity of the sensor is approximately 0.013 Ω /(L/min). The sensor heating time to operating temperature does not exceed 136 ms.

Keywords: calorimetric MEMS flow sensor, zirconium oxide membrane, gas flow measurement, magnetron deposition of platinum, temperature coefficient of resistance, power consumption, sensitivity

REFERENCES

1. Kuo T.W., Yu L., Meng E. Micromachined thermal flow sensors — A review. *Micromachines*, 2012, vol. 3, no. 3, pp. 550–573. DOI: 10.3390/mi3030550
2. Huang L. Micromachined thermal time-of-flight flow sensors and their applications. *Micromachines*, 2022, vol. 13, no. 10, Id. 1729. DOI: 10.3390/mi13101729
3. Nguyen N.T. Micromachined flow sensors — A review. *Flow Measurement and Instrumentation*, 1997, vol. 8, no. 1, pp. 7–16. DOI: 10.1016/S0955-5986(97)00019-8
4. Sazhin O.V., Pervushin Yu.V. [Flow micro sensor of thermal type for air mass flow meter]. *Nauchnoe Priborostroenie* [Scientific Instrumentation], 2011, vol. 21, no. 3, pp. 52–61. URL: <http://iairas.ru/mag/2011/abst3.php#abst7> (In Russ.).
5. Bogush M.V., Kuzmicheva E.V., Pikalev A.M., Bogush A.M. [Piezoelectric acoustic converters and ultrasonic gas flow meters on their basis]. *Avtomatizaciya, telemechanizaciya i svyaz' v neftyanoy promyshlennosti* [Automation, telemechanization and communications in the oil industry], 2010, no. 2, pp. 21–24. (In Russ.). URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=13072949>
6. Ejeia F., Azadi S., Razmjou A., Orooji Y., Kottapalli A., Warkiani M.E., Asadnia M. Design and applications of MEMS flow sensors: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2019, vol. 295, pp. 483–502. DOI: 10.1016/j.sna.2019.06.020
7. Hong L., Xiao K., Song X., Lin L., Xu W. System-level modeling with temperature compensation for a CMOS-MEMS monolithic calorimetric flow sensing SoC. *Microsystems & Nanoengineering*, 2025, vol. 11, Id. 13. DOI: 10.1038/s41378-024-00853-8
8. Sensirion. Application note for SDP600 and SDP1000 series. Measuring Differential Pressure and Air Volume with Sensirion's CMOSens® technology. URL: https://www.soselectronic.cz/a_info/resource/c/sensirion/CMOSens_for_HVAC.pdf (accessed: 25.01.2026).
9. Samotaev N., Podlepetsky B., Mashinin M., Ivanov I., Obratsov I., Oblov K., Dzhumaev P. Thermal conductivity gas sensors for high-temperature applications. *Micromachines*, 2024, vol. 15, no. 1, Id. 138. DOI: 10.3390/mi15010138
10. Karpov E.E., Karpov E.F., Suchkova A., Mironova S., Baranov A., Sleptsov V., Calliari L. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2013, vol. 194, pp. 176–180. DOI: 10.1016/j.sna.2013.01.057
11. Vasiliev A.A., Pislakova A.V., Sokolova A.V., Samotaev N.N. et al. Non-silicon MEMS platforms for gas sensors. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2016, vol. 224, pp. 700–713. DOI: 10.1016/j.snb.2015.10.066
12. Samotaev N., Oblov K., Dzhumaev P et al. Combination of Ceramic Laser Micromachining and Printed Technology as a Way for Rapid Prototyping Semiconductor Gas Sensors. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 12, Id. 1440. DOI: 10.3390/mi12121440.
13. American Elements. 3% Yttria Stabilized Zirconia. URL: <https://www.americanelements.com/3-yttria-stabilized-zirconia-113482-02-3> (accessed: 25.01.2026).
14. Kalinin A., Roslyakov I.V., Tsymbarenko D.M., Bograchev D.A., Krivetskiy V.V., Napolskii K.S. Microhotplates based on Pt and Pt–Rh films: The impact of composition, structure, and thermal treatment on functional properties. *Sensors and Actuators A: Physical*,

- 2021, vol. 317, Id. 112457.
DOI: 10.1016/j.sna.2020.112457
15. Samotaev N., Oblov K., Ivanova A., Gorshkova A., Podlepetsky B. Rapid Prototyping of MOX Gas Sensors in Form-Factor of SMD Packages. *Proc. of the 2019 IEEE 31st International Conference on Microelectronics (MIEL)*, 2019, pp. 157–160. URL: <https://www.proceedings.com/content/051/051152webtoc.pdf>
16. ООО Elma-paste. *Provodnikovye Ag-Pd-Pt pasty* [Semiconductor Ag–Pd–Pt pastes]. URL: https://elma-paste.ru/paste_pt/ (accessed: 25.01.2026). (In Russ.).
17. АО Zavod Mars. *Korpusa metallosteklyannye 3301.8 (TO-8)* [TO-8 Style Pressure Sensor Package]. URL: <https://z-mars.ru/produktsiya/korpusa-datchikov/korpusa-metallosteklyannye-33018-to-8.html> (accessed: 25.01.2026). (In Russ.).

Contacts: Drach Ekaterina Anatol'evna,
catherinedratch@yandex.ru

Article received by the editorial office on 19.02.2026

INTRODUCTION

Microelectromechanical flow sensors (MEMS) are widely used in medicine, industry, environmental protection, and other fields where there is a need to measure the mass flow rate of gases and liquids [1].

Generally, MEMS flow sensors can be classified as non-thermal (piezoelectric and optical) and thermal (time-of-flight, hot-wire anemometer, and calorimetric). Sensors of the latter type are of greatest interest in both study and application, as they can guarantee ease of integration into microsystems, the ability to continuously monitor flow rates, and operation over a wide range of gas flows.

In the case of time-of-flight sensors, the measured value is the delay time of the thermal pulse required to travel the distance between the heater and the temperature-sensitive element. This delay time depends on the flow velocity of the liquid or gas [2].

Hot-wire anemometers are among the most common types of flowmeters. They use thermal principles to measure the velocity of air and gas flows. They incorporate a sensing element—a heater—that is heated to a predetermined temperature and then cooled by the flow [3].

The basic operating principle of a hot-wire anemometer is heat exchange between the heated element and the air flow. The sensor's heater is heated to a predetermined temperature. As gas moves past the sensor, the heater cools. An electronic system compensates for heat loss by increasing the heating power. The amount of additional power required to maintain the heater at a predetermined temperature allows for the calculation of the flow velocity and gas mass flow rate.

The operating principle of a calorimetric sensor is based on the change in the temperature field near the heater caused by the flowing gas. The temperature difference between the temperature-sensitive elements located upstream and downstream of the heater depends on the gas mass flow rate [4].

Heat flow sensors have also been developed that operate based on a combination of the above-mentioned measurement principles. Specifically, a calorimetric sensor is more sensitive to small gas flows, while time-of-flight and hot-wire anemometric sensors provide better results when measuring larger flows.

A pressing issue is monitoring natural gas consumption using specialized metering devices. Modern gas meters offer a wide variety: membrane, ultrasonic, turbine, and microthermal [5].

From an operational perspective, a current trend is the development of "smart" gas meters that not only perform measurements but also collect statistical data, wirelessly transmit it to the management company, perform self-diagnostics, and operate on a standalone

power supply. This allows for the creation of gas meters that do not require additional data cables or power supply.

In this regard, there has been considerable interest in the creation and development of microthermal MEMS sensors that could guarantee high measurement accuracy and stability of characteristics over time with sufficiently low power consumption, thereby ensuring long-term autonomous operation of gas flow meters.

A distinctive feature of MEMS technology is the ability to create flow sensors with microheaters and temperature sensors without the use of moving parts, which simplifies sensor manufacturing and operation. Another reason for the great interest in MEMS flow sensors is the advantages associated with high sensitivity to low flow rates, ease of use in various measurement modes [6], and the ability to house all measuring modules on a monolithic chip [7].

MEMS sensors manufactured by processing silicon using standard CMOS processes have found particularly widespread practical application. A typical MEMS sensor structure includes a heater and temperature sensors made of platinum or polysilicon, mounted on a thin membrane made of silicon oxide or nitride. To reduce the stresses generated by heating the heater, double-layer membranes ($\text{SiO}_2 / \text{Si}_3\text{N}_4$) are most widely used. The membrane is necessary to reduce heat loss to the substrate and the sensor's response time during intermittent heating. Furthermore, amplifiers and an ADC (in the case of full-CMOS solutions) can be integrated onto the same chip on which the MEMS sensor is manufactured [8].

Currently, the market of MEMS flow sensors based on silicon technology is completely dominated by sensors from foreign manufacturers, in particular, Sensirion [8].

However, silicon technology is not the only technological solution for creating MEMS gas flow sensors.

Ceramic MEMS sensors offer an alternative to traditional silicon microsystems, particularly in high-temperature environments, aggressive chemical environments, and mechanical stress. For gas flow measurement, particularly in energy, automotive, and natural gas monitoring systems, ceramic materials offer increased thermal stability, chemical inertness, and durability compared to silicon-based sensors [9].

Furthermore, ceramic technology eliminates the need for most microelectronic technologies that require expensive equipment, such as silicon oxidation, deep silicon etching for membrane formation, and photolithography processes.

The most commonly used ceramics in MEMS devices are $\text{SiO}_2 / \text{Si}_3\text{N}_4$, and LTCC (Low-Temperature Co-fired Ceramics).

PROBLEM STATEMENT

The objective of this work is to develop and conduct an experimental study of a calorimetric MEMS gas flow sensor for household applications, based on a zirconium oxide membrane.

It is important to note that membranes made of Al_2O_3 , ZrO_2 , and LTCC have long been used to create various types of sensors, particularly gas sensors [10], [11]. However, this is the first time that ZrO_2 ceramics have been used for MEMS gas flow sensors.

The MEMS flow sensor was fabricated on commercially available zirconium oxide membranes, onto which surface a platinum layer was deposited using magnetron sputtering. Next, laser ablation was used to outline the topology of the heater and thermistors with contact pads, and the sensor was divided into chips. The resulting chips were mounted on a ceramic holder made of aluminum oxide using double-sided laser micro-milling, which was then installed on a printed circuit board and into a housing [12].

This technology choice for flow sensors is the first to be used and potentially enables the rapid development of low-cost and stable MEMS sensors, their durability in harsh environments, and the low power consumption of the flowmeter or smart meter.

THEORETICAL SECTION

The operating principle of the developed MEMS sensor is based on a calorimetric measurement method, which relies on the change in temperature of thermistors R_1 and R_2 , which occurs as gas moves through a pipeline (Fig. 1). Gas flow is determined by the amount of heat carried away by the flow. This creates a temperature difference between the thermistors located in front and behind the heater: $|T_2 - T_1|$. The measured value is the difference in resistance between the thermistors R_1 and R_2 .

Fig. 1. Simplified diagram of the main components of the microthermal MEMS gas flow sensor

In a typical configuration with one heater and two thermistors (upstream and downstream), the output signal is defined as the temperature difference:

$$\Delta T = T_{\text{после}} - T_{\text{до}}, \quad (1)$$

where $T_{\text{после}}$ is the temperature of the thermistor located behind the heater, and $T_{\text{до}}$ is the temperature of the thermistor in front of it.

For low flow rates in laminar mode, the dependence on flow rate can be approximated by a linear function:

$$\Delta T \approx K \cdot V, \quad (2)$$

where V is the gas velocity (m/s), and K is the sensor sensitivity, which depends on the thermophysical properties of the gas and its geometry.

The change in resistance is associated with the change in temperature due to the temperature coefficient of resistance (TCR) according to the equation:

$$\Delta R / R_0 = \alpha \cdot \Delta T, \quad (3)$$

where R_0 is the resistance under initial conditions, α is the TCR [1/K].

EXPERIMENTAL SECTION

Justification for the choice of material for MEMS

In this study, the material for the MEMS flow sensor was a 3YSZ zirconia ceramic (ZrO_2) (zirconia stabilized by the addition of 3 mol.% Y_2O_3 [13]) in the form of a membrane. The membrane thickness was 30 μm .

This choice was justified by the excellent mechanical properties of zirconia ceramic, which ensure its stability and durability under harsh operating conditions: strong gas flows, as well as significant temperature and vibration loads. Moreover, platinum and 3YSZ zirconium ceramics have very similar coefficients of thermal expansion (CTE) ($8.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ and $9.4 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, respectively) compared to platinum – SiO_2 / Si_3N_4 systems, which have CTEs that differ by several orders of magnitude. This minimizes the mechanical stresses between the platinum and membrane that arise during periodic heating of the sensor, which, in turn, prevents membrane deformation and delamination of the thin-film platinum layers.

Moreover, ZrO_2 has the lowest thermal conductivity of all used ceramics ($\sim 2 \text{ W/(m K)}$), closest to SiO_2 ($\sim 1.4 \text{ W/(m K)}$), making it preferable for creating non-silicon-based MEMS heat flow sensors.

Technological and design solutions for creating MEMS sensors

To obtain identical sensors, laser micromachining was chosen, allowing for rapid (1–2 min) fabrication of a single sensor. Furthermore, the setup does not require a clean room, and the contaminant component of the laser machining process is minimal, limited to the formation of nanoparticle dust, which is subsequently removed by washing in an ultrasonic bath.

A thin-film platinum heater and two meander-shaped platinum thermistors were fabricated on a ZrO_2 membrane. The sensor chip size was $1.3 \times 1.3 \text{ mm}$. The sensor topology is shown in Fig.2, a,

(1 and 3 are thermistors, 2 is a heater). A photo of the sensor chip in its holder is shown in Fig. 2, б.

Fig. 2. Flow sensor design, topology, and dimensions (a); photograph of the ZrO_2 membrane with heater and thermistor topology (б); micrograph of the flow sensor chip mounted on a ceramic holder (в). The industrially manufactured printed circuit board is soldered to a TO-8 metal-on-glass package

A 1- μm -thick platinum coating was deposited on a ZrO_2 membrane using magnetron sputtering. The membrane was then annealed for several hours in an air-filled furnace at 950 °C to stabilize the heater resistance [14]. During the annealing process, the heater resistance decreased several fold. Annealing was stopped when the resistance ceased to change by more than 1%.

The platinum heater and two meander-shaped thermistors were formed using laser ablation of platinum. A dedicated 20 W fiber laser with a tunable pulse duration in the 50–200 ns range and a wavelength of 1.064 μm was used for this fabrication [15].

The resulting chip with microheating elements was mounted on a ceramic holder made of monolithic aluminum oxide using double-sided laser micromilling [12]. A photograph of the holder is shown in Fig. 2, б.

The contact metallization of the ceramic holder is based on thick-film silver alloyed with Pt paste (type PP-33 [16]) and exhibits good solder ability with standard solders. (In this study, a hard solder containing 60% Sn / 40% Pb was used.)

The ceramic holder with the sensor chip mounted on it was soldered to the printed circuit board. The entire assembly was then mounted on an 8-pin TO-8 metal-to-glass package (Fig. 2, в), typically used for gas or pressure sensors [17].

To determine the TCR of the platinum resistors, they were placed in a climatic chamber. The climatic chamber has its own temperature sensor. For more accurate temperature measurements, a thermocouple was placed near the sensor, which was placed in the climatic chamber. Measurements were conducted over a temperature range from –30 °C to +150 °C.

The I–V characteristic was studied by applying voltage from the power supply to the MEMS heater and simultaneously measuring the current flowing through it. Measurements were conducted at room temperature (25 °C).

To measure the heating rate of the sensor heater, necessary for determining the sensor's warm-up time, the sensor was connected to a circuit with a 10 Ω resistor, R_d , as a divider. Heating the sensor heater to the required temperature was achieved using a two-second PWM signal with a frequency of 1 kHz and

a duty cycle corresponding to the required operating voltage.

A thionyl chloride lithium battery with a nominal voltage of 3.5 V served as the power source. PWM was generated by applying rectangular pulses to the gate of a field-effect transistor from a specially shaped signal generator. This caused the heater R_h to heat up, increasing its resistance. This resulted in a change in voltage across the divider resistor R_d , and was measured with an oscilloscope.

A setup was assembled to measure the sensor response as a function of gas mass flow rate (Fig. 3).

Fig. 3. Photograph of the experimental setup for measuring the characteristics of the developed MEMS sensor (a) and the sensor placement in a pipe with adjustable gas flow (б).

1 — gas flow control valve, 2 — manual shutter, 3 — rotameter, 4 — sensor under study, 5 — power supply, 6 — heating signal generator, 7 — oscilloscope, 8 — millivoltmeter

The setup included a section of gas pipe (32 mm in diameter) housing a sensor (4), a gas flow control valve (1), a flow meter (3), a manual shutter (2), and a compressor, as well as a power supply (5), a waveform generator (6), a millivoltmeter (8), and an oscilloscope (7), which were necessary for performing the measurements.

For the measurements, an operating voltage was applied to the sensor heater. The measurements were conducted at room temperature (25 °C). As the air flow velocity varied, the temperature of the thermistors (R_1 and R_2) changed, and consequently, their resistance changed.

RESULTS AND DISCUSSION

Refining the experimental conditions

Using the technology described above, a batch of MEMS sensors with the topology shown in Fig. 2 was manufactured. The heater is located in the center of the sensor, with thermistors to the right and left of it. The width of the platinum heater strips and thermistors is 20 μm .

The resistance of the heater (R_h) and thermistors (R_1 and R_2) at 25 °C is 25.71, 36.37, and 35.73 Ω , respectively. It is important to note that the difference in the thermistor resistances is less than 2%, which can be considered a good result for this technology.

Determining the temperature resistance of platinum

To conduct measurements, it is necessary to establish a relationship between the resistance of the platinum thermistors and their temperature. For this purpose, TCR measurements were performed using the method described in the Theoretical section.

The TCR measurements of the heater and thermistors were conducted in the temperature range from $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

The obtained dependences are shown in Fig. 4. The figure shows that the resistance-temperature dependences are linear. The given TCR values were determined using the formula:

$$R = R_0 (1 + \alpha \cdot (T - T_0)), \quad (4)$$

where R_0 and T_0 are the initial resistance and temperature ($25\text{ }^{\circ}\text{C}$), and R is the resistance at temperature T .

Fig. 4. Dependence of resistance on ambient temperature (T_{amb}) for a heater (R_H , curve 1) and thermistors (R_1 , curve 2 and R_2 , curve 3)

The average TCR values of the heater R_H and thermistors R_1 and R_2 across all temperatures were: 0.00184 , 0.001836 , and 0.001864 K^{-1} , respectively.

Measurement of the heater's I-V characteristics

The most important parameter determining the application range of gas flow sensors is the power consumed by the heater in measurement mode. The successful use of a gas flow sensor in battery-powered autonomous devices depends on the power consumption.

To optimize the measurement temperature and, consequently, the power, the heater's I-V characteristic was measured in the voltage range from 0 to 2.5 V (Fig. 5, a, curve 1). The heater's power was calculated from the resulting curve (Fig. 5, a, curve 2).

Using formula (4), the heater (Fig. 5, 6) and thermistor (Fig. 5, b) temperatures were calculated as functions of the voltage applied to the heater. From these curves, it can be concluded that the maximum heater temperature T_H at a voltage of 2.5 V is $346.8\text{ }^{\circ}\text{C}$. The heater's power consumption P_H is 152.3 mW. The temperatures of thermistors R_1 and R_2 in the absence of gas flow are practically equal to $220.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $227.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectively. Since the operating temperature for calorimetric MEMS sensors is considered to be approximately $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, it was decided not to perform I-V measurements at heating voltages above 2.5 V.

Fig. 5. The current-voltage characteristics and the dependence of the heater power on temperature (a), the calculated dependences of temperature $T = f(U)$ for the heater R_H (6) and thermistors R_1 (curve 1) and R_2 (curve 2) (b)

Gas flow measurements

The measurements were conducted under laminar gas flow conditions. It is further assumed that the sensor will be placed in a microchannel bypass branch of the main gas pipeline, where laminar flow will also be maintained in all operating modes.

Figure 6 shows the change in the resistance difference of the thermistors $|\Delta R| = R_1 - R_2$ as a function of air flow rate Q at a heater voltage of 2.4 V. It was found that the dependence $|\Delta R| = f(Q)$ is nearly linear (equation (5), derived from (2) and (3)) up to flow rates of 30–40 L/min, but the resulting change in $|\Delta R|$ depends on the gas flow direction:

$$|\Delta R| / R_0 \approx \alpha \cdot K \cdot V. \quad (5)$$

Fig. 6. Dependence of $|\Delta R|$ on gas flow rate when R_1 is located in front of the heater (1) and behind the heater (2) (i.e. when the flow moves in opposite directions)

Dependencies 1 and 2 in Fig. 6 represent the output signals of the thermistors of the same sensor when the flow moves in opposite directions. It can be seen that when the air flow direction changes, the increase in ΔR from Q (Fig. 6, curve 1) is replaced by a decrease in $|\Delta R|$ (Fig. 6, curve 2). This change in the resistance difference $|\Delta R|$ can be explained by the unevenness of their initial heating in the absence of air flow. Thermistor R_1 has a lower temperature than thermistor R_2 (Fig. 5, b, curve 1). In this case, when thermistor R_1 is located downstream of the heater, the difference $|\Delta R|$ will decrease because thermistor R_2 will be cooled by the air flow, and thermistor R_1 will be additionally heated by the air flow warmed by the heater. When R_1 is located upstream of the heater, its temperature will decrease, and R_2 's will increase. Consequently, $|\Delta R|$ will also increase. The sensor's sensitivity in the air flow is $\sim 0.013\text{ }^{\circ}\text{C}/(\text{L}/\text{min})$.

When a voltage is applied to the bridge circuit, providing a current of 1 mA through the thermistors, the voltage U_{BHX} will vary in the range of 0.8 to 2 mV.

The value of Q is important for gas flow monitoring. From a physical perspective, a more useful quantity is the gas flow rate V .

Gas flow rate is determined by the equation

$$V = Q / S,$$

where Q is the gas flow rate in m^3/s , and S is the cross-sectional area of the pipe.

In our case, the pipe diameter is 32 mm. Then $S = 8 \times 10^{-4} \text{ m}^2$. A change in flow rate from 10 to 60 L/min corresponds to a change in Q from 1.67×10^{-4} to $1 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$.

The flow rate V will vary from 0.21 to 1 m/s with a flow rate change from 10 to 50 L/min.

Determining the sensor's warm-up time

Measurements of the gas flowing through a pipeline cross-section are usually performed periodically. Therefore, the sensor's warm-up time, which corresponds to its heating to the set temperature, is important. Figure 7 shows the dependence of the heater voltage change on the operating voltage application time. For the measurements, the sensor heater was connected to a circuit with a voltage divider. It can be seen that when an operating voltage of 2.4 V is applied, the sensor heater warms up in 136 ms.

Fig. 7. Dynamic characteristic of the sensor warm-up

Based on the resulting warm-up time, the power required to perform a single gas flow measurement can be calculated. Figure 5, a shows that at 2.4 V, the power consumed by the sensor is 146 mW. Thus, it can be estimated that the energy required to perform a single measurement is approximately 20 mW·s.

CONCLUSION

This paper presents the initial results of the development of a calorimetric MEMS gas flow sensor based on a ZrO_2 membrane and investigates its parameters and characteristics.

The TCR values of the heater and thermistors, manufactured using magnetron sputtering of platinum, were determined. The obtained values were 0.00185 K^{-1} . The dependences of the sensor heater temperature and power consumption on the applied heating voltage were measured in the range of 0–2.5 V. The sensor heating time to operating temperature was determined, as well as the energy required for one gas flow measurement.

Flow measurements were conducted in air in the range of 10 to 60 L/min. It was shown that the change in ΔR depends on the position of the sensor in the gas flow. This result was explained by the difference in the temperatures of the thermistors and their positions relative to the gas flow. This is clearly a drawback of the current sensor, which must be addressed in the future. The sensor's sensitivity is approximately $0.013 \Omega / (\text{L}/\text{min})$.

The ultimate goal of the research is to create a sensor capable of long-term operation (over 6 years) from a standalone power source (a lithium D battery) in natural gas smart meters.

This requires minimizing the sensor's power consumption during a single measurement. This, in turn, requires minimizing the power consumption in measurement mode and the sensor's warm-up time. It is expected that both of these parameters will be reduced through further miniaturization of the sensor. Furthermore, power consumption can be varied by varying the measurement frequency. By optimizing the sensor's parameters, its average power consumption when measuring once per minute is expected to be less than 1 mW.