

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВОГО МЭМС-СЕНСОРА МАССОВОГО РАСХОДА ГАЗА

### INVESTIGATION OF THERMAL MEMS SENSOR OF GAS MASS FLOW RATE

**В.Т.Рябов<sup>1</sup>**, (ORCID: 0000-0002-4781-3186), **Н.А.Дюжев<sup>2</sup>** / v\_ryabov@mail.ru

**V.T.Ryabov<sup>1</sup>**, (ORCID: 0000-0002-4781-3186), **N.A.Djuzhev<sup>2</sup>** / v\_ryabov@mail.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва

*По результатам исследований теплового сенсора массового расхода газа показано, что при различных схемах аналоговой обработки его сигнала можно добиться уникально высокой чувствительности и совмещения измерения перепада температур на фронте и спаде и падения температуры нагревателя в одном сигнале.*

*The results of the studies of the thermal sensor of the mass flow rate of gas have shown that with various analogue signal processing circuits it is possible to achieve uniquely high sensitivity and combining the measurement of the temperature difference at the front and the decline and the temperature drop of the heater in one signal.*

Ключевые слова: *массовый расход газа, тепловой МЭМС-сенсор, поток газа, выделение и обработка сигнала.*

Keywords: *mass gas flow rate, thermal MEMS sensor, gas flow, signal extraction and processing.*

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Датчики массового расхода газа широко используются в вакуумном технологическом и исследовательском оборудовании. В последнее время особенно актуально стало использование таких датчиков в медицинском оборудовании, в частности, в аппаратах искусственной вентиляции легких (ИВЛ).

Использование технологий микроэлектромеханических систем позволяет создавать миниатюрные чувствительные элементы (сенсоры) массового расхода газа на кремниевых кристаллах (ЧИПах). Массовый характер производства большого числа сенсоров с аналогичными параметрами на одной пластине позволит существенно уменьшить их стоимость. Широко известен такой сенсор фирмы Honeywell, измеряющий перепад температур на фронте и спаде «теплового облака», создаваемого нагревателем. Технология производства этого сенсора была даже положена в основу учебного пособия для курса бакалавриата университета Луисвилля [1]. Этот сенсор был создан в начале 80-х годов прошлого века и является основой большинства датчиков потока этой фирмы.

Недостатком тепловых МЭМС-сенсоров являются ограничения на диапазон измерения скоростей потока газа, обусловленные изменением характера его потока: ламинарный или турбулентный. Для измерения расхода в ламинарном потоке используется калориметрический метод, основанный на измерении перепада температур в тепловом облаке, создаваемом нагревателем. Для измерения расхода в турбулентном потоке используется термоанемометрический метод, основанный на отводе тепла от нагревателя.

Цель данного исследования - разработка отечественного теплового МЭМС-сенсора с расширенным диапазоном измерения скорости потока газа и повышенной точностью и чувствительностью. Кроме того, мы стремились создать отечественный аналог датчика AWM720P1 фирмы Honeywell [2] для использования в аппаратах ИВЛ.

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проводились аналитические и экспериментальные исследования образца МЭМС-сенсора из опытной партии. Кремниевый ЧИП имеет размер 3x4 мм, на нем вытравлена мембрана размерами около 0,5x0,75 мм., состоящая из чередующихся слоев  $\text{Si}_3\text{N}_4$  и  $\text{SiO}_2$ . Общая толщина мембраны около 0,6 мкм. (рис.1).

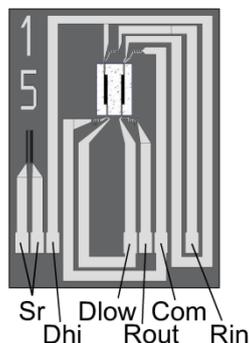


Рис.1. Опытный образец теплового МЭМС-сенсора массового расхода газа.

На кристалле сформированы 5 платиновых терморезисторов. Один резистор расположен на теле кристалла (резистор среды, рис.1 слева). Он предназначен для измерения температуры кремниевого кристалла, выводы этого резистора обозначены на рис. 1 символами Sr. Четыре других терморезистора расположены на мембране и включены в измерительный термомост. Он предназначен для формирования «теплового облака» и измерения его температуры на фронте и спаде по потоку газа. При этом поток газа направлен слева на право, чтобы «тепловое облако» оказывало минимальное воздействие на резистор среды.

Резисторы термомоста расположены в двух секциях, во входной In (слева на мембране на рис. 1) и в выходной Out (справа). Схема термомоста показана на рис. 2, а). Каждая секция содержит по два аналогичных резистора сопротивлениями  $R_i$  и  $R_o$ , образующих плечо моста. Резисторы  $R_i$  расположены во входной секции, а  $R_o$  – в выходной. Вывод резистора входной секции подключен к контактной площадке кристалла Rin, а вывод резистора выходной секции подключен к контактной площадке Rout.

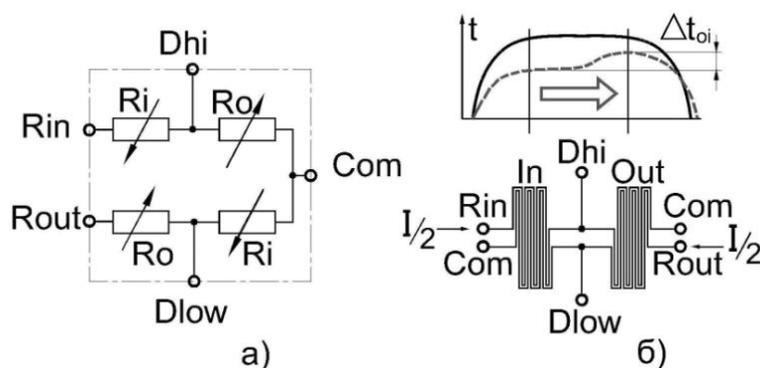


Рис.2. Принцип работы термомоста: а) электрическая схема подключения терморезисторов; б) изотерма теплового облака и схема прохождения токов в плечах термомоста.

На резисторах  $R_i$  и  $R_o$  изображены стрелки, показывающие увеличивается или уменьшается значение сопротивления соответствующего терморезистора при появлении потока газа, обдувающего мембрану. Между резисторами  $R_i$  и  $R_o$  сформированы выводы диагонали термомоста Dhi и Dlow, подведенные к соответствующим контактным площадкам (рис. 1). На выводе Dhi напряжение возрастает с увеличением потока газа, а на выводе Dlow – уменьшается.

На рис. 2. б) показана схема прохождения токов по плечам моста и изотерма теплового облака, которое формируется при прохождении тока  $I$  через мост. Причем по каждому плечу в силу симметрии протекает половина тока моста.

Экспериментальные исследования чувствительного элемента проводились на автоматизированном стенде [3], оснащённом средствами задания потока газа и средствами измерения, сертифицированными в РФ. Для задания величины потока газа использовались 12-и разрядные цифроаналоговые, а для фиксации результатов 16-и разрядные аналогово-цифровые преобразователи.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Если мост нагружен управляемым источником тока  $I$  и поток газа отсутствует, то сопротивление  $R_t$  каждого из резисторов термомоста составит:

$$R_t = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta t_0).$$

Здесь  $R_0$  – сопротивление терморезистора при нормальной температуре,  $\alpha$  – температурный коэффициент сопротивления (ТКС),  $\Delta t_0$  – повышение температуры терморезистора относительно нормальной.

Сигнал на диагонали  $\Delta D = (D_{hi} - D_{low})$  при появлении потока газа, искажающего теплового облака будет равен:

$$\Delta D = \frac{I}{2} R_t \cdot \alpha \cdot \Delta t_{oi}, \dots \dots \dots (1)$$

здесь  $\Delta t_{oi}$  – перепад температуры между выходной и входной секцией термомоста.

При увеличении тока  $I$  через мост сигнал  $\Delta D$  с диагонали возрастает, во первых, из-за того, что ток входит в этот сигнал в качестве множителя, во вторых за счет увеличения значения  $R_t$  из-за дополнительного разогрева резисторов. А дополнительный разогрев пропорционален квадрату тока. И в третьих, за счет перераспределения мощности между входной  $I_n$  и выходной  $O_u$  секциями из-за искажения изотермы теплового облака потоком газа, обдувающего мембрану. В секции, температура которой больше сопротивление возрастает и, при равенстве токов, выделяется большая мощность. Т.е. в физическом процессе формирования сигнала рассматриваемого сенсора, запитанного постоянным током, присутствует механизм положительной обратной связи.

Все это приводит к уникально высокой чувствительности термомоста при питании его источником тока. Такие схемы с повышенной чувствительностью могут быть перспективны для использования в газовых хроматографах.

Сенсор, запитанный источником тока, использовался для создания аналога датчика массового расхода AWM720P1 фирмы Honeywell [2]. Он был вставлен в байпасный канал и смонтирован вместе со схемой обработки сигнала в корпусе этого датчика. Испытания показали, что при токе питания термомоста около 4,5 мА и коэффициенте усиления около 60-и происходило насыщение сигнала напряжением питания. Усиление было слишком велико.

На рис. 3 представлено сравнение стандартного сигнала датчика AWM720P1 и опытного образца МЭМС-сенсора, когда на выходе байпасного канала корпуса был установлен дроссель с диаметром отверстия 0,75 мм. Это заметно снизило величину выходного сигнала.

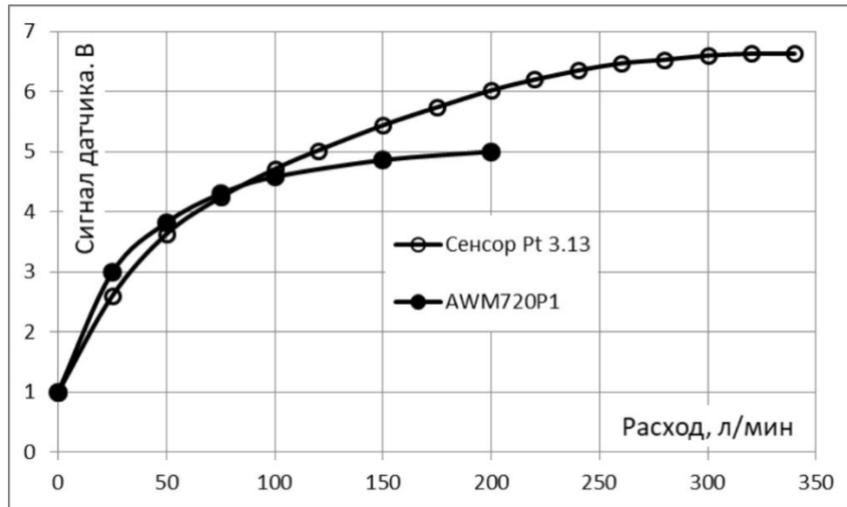


Рис.3. Стандартный сигнал датчика AWM720P1 и датчика с опытным образцом МЭМС-сенсора.

Из рисунка видно, что диапазон измерения потока с новым МЭМС-сенсором стал шире и есть возможность повторить характеристику датчика AWM720P1 за счет подбора тока питания, дросселирования байпасного канала и выбора коэффициента усиления схемы датчика.

Другая схема получения сигнала с измерительного термомоста показана на рис. 4. Такая схема использовалась для обработки сигнала полупроводникового датчика давления [3]. Это два идентичных источника тока, управляемых сигналом  $U_d$ . Выходной сигнал  $U_{tm}$  этой схемы равен:

$$U_{tm} = U_{out} - U_{in} = U_d \cdot Rt \left( \frac{1}{Ri(t)} + \frac{1}{Ro(t)} \right) \cdot \alpha \cdot \Delta t_{oi} = U_d \cdot Rt \cdot \frac{\rho_{tm}}{2} \cdot \alpha \cdot \Delta t_{oi} \dots \dots \dots (2)$$

Здесь  $R_t$ , как и в предыдущем случае, установившееся сопротивление терморезистора моста при отсутствии потока газа;  $\alpha$  – ТКС;  $\Delta t_{oi}$  – перепад температуры между выходной и входной секцией термомоста;  $R_i(t)$ ,  $R_o(t)$  – сопротивление резистора входной и выходной секции при потоке газа;  $\rho_{tm}(t)$  – проводимость термомоста.

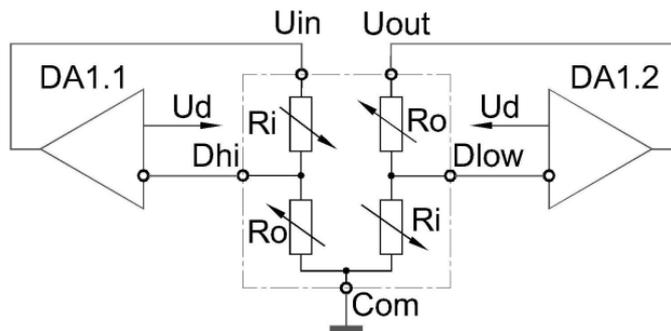


Рис.4. Вариант схемы для получения сигнала с МЭМС-сенсора расхода газа.

Анализ формулы (2) показывает, что выходной сигнал термомоста зависит не только от разности температур входной и выходной секций  $\Delta t_{oi}$  и сопротивления  $R_t$ , но от проводимости термомоста. Когда поток из ламинарного становится турбулентным, сигнал разности температур  $\Delta t_{oi}$  перестает увеличиваться с возрастанием расхода. Возрастает только отвод тепла, средняя температура термомоста падает, а его проводимость  $\rho_{tm}(t)$  возрастает. Выходной сигнал продолжает расти. Это расширяет диапазон скоростей потока газа, измеряемых МЭМС-сенсором.

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных исследований второго варианта схемы (рис. 4). Сенсор был установлен в пристеночной области основного канала датчика диаметром 0,5'.

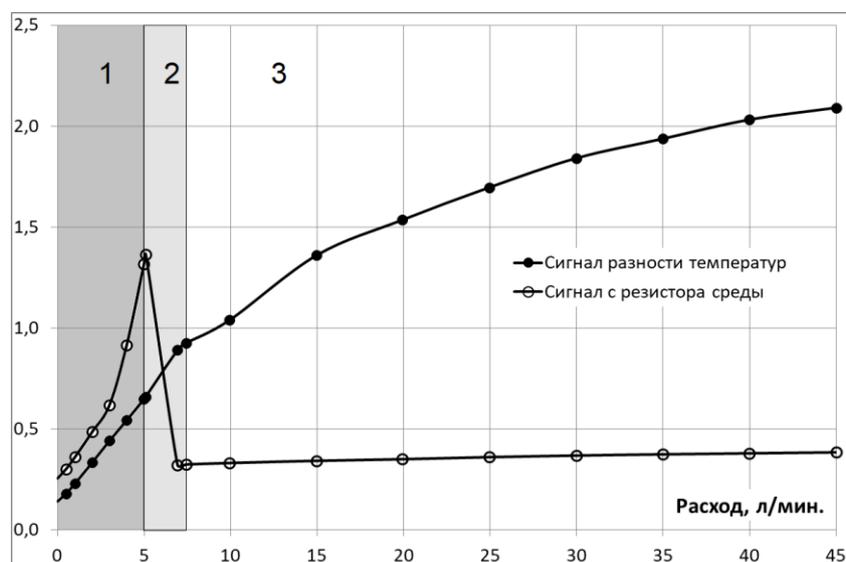


Рис. 5. Экспериментальные зависимости усиленного выходного сигнала термомоста сенсора и сигнала, снимаемого с резистора среды.

График, показанный на рис. 5, четко распадается на три зоны. В зоне 1 поток ламинарный, тепловое облако с увеличением расхода все больше прижимается к поверхности кристалла, его температура и сигнал с резистора среды растут. Сигнал с термомоста практически линеен. В зоне 2 начинается срыв ламинарного потока, температура кристалла падает. Это переходная зона. Поток становится турбулентным в зоне 3. Отвод тепла от термомоста с увеличением скорости потока растет, температура падает. Сигнал с сенсора продолжает расти, так как растет проводимость термомоста  $\rho_{tm}(t)$  с понижением его температуры.

## ВЫВОДЫ

Рассмотренный термомост МЭМС-сенсора из четырех терморезисторов, расположенных в двух секциях, входной и выходной по потоку газа, позволяет:

- одновременно служить нагревателем, т.е. создавать «тепловое облако» и измерять перепад температур между его фронтом и спадом;
- существенно повысить чувствительность сенсора при питании термомоста источником тока и снизить требования к схеме последующего усиления и нормализации сигнала датчика;
- расширить диапазон измеряемых расходов МЭМС-сенсора и объединить в одном сигнале перепад температур и падение температуры в зависимости от массового расхода газа;
- позволяет вести измерения массового расхода в условиях ламинарного, переходного и турбулентного течения газа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Cole, Jason B. 1971-, "Bulk-micromachined mass airflow sensor fabrication and testing methodology for an undergraduate microfabrication course." (2000). Electronic Theses and Dissertations. Paper 264. <https://doi.org/10.18297/etd/264>.

2. Airflow Sensors AWM700 Series, Compensated/Amplified. 32301627-B-EN IL50 July 2015  
© 2015 Honeywell International Inc. URL: <https://sensing.honeywell.com/products/sensing-and-iot>.

3. Дюжев Н.А., Новиков Д.В., Рябов В.Т. Автоматизация процесса измерения параметров чувствительных элементов датчиков расхода газов. // Изв. вузов. Электроника. – 2018. – Т. 23. – № 1. – С. 62–71.

4. Полупроводниковый датчик давления: пат. 2165602 Рос. Федерация : МПК<sup>7</sup> G01 L 9/04, G01 L 19/04 / Рябов В.Т.; заявл. 10.08.99 ; опубл. 20.04.01, Бюль. №11. – 3 с.: ил.