

Терморезистивный преобразователь скорости потока газа мембранного типа

В.А. Беспалов, И.А. Васильев, Н.А. Дюжев, Н.С. Мазуркин, Д.В. Новиков, А.Ф. Попков

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», djuzhev@unicm.ru

Аннотация — В данной работе рассматривается терморезистивный первичный преобразователь скорости потока мембранного типа на основе калориметрического принципа работы, разрабатываемый для теплового датчика расхода газа. Проведено исследование влияния конструктивных параметров преобразователя на его выходные характеристики. С помощью методов численного моделирования рассчитана оптимальная конструкция преобразователя и на основе полученных результатов создан экспериментальный образец. Приводятся сравнение результатов расчетной модели и эксперимента. Полученными данными можно руководствоваться при выборе конструкции преобразователя скорости потока для теплового датчика расхода конкретного назначения.

Ключевые слова — первичный преобразователь скорости, тепловой датчик расхода, терморезистор, МЭМС, моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день возрастает потребность более точной регистрации скоростей потока в различных областях промышленности, таких как химический анализ, медицинское оборудование, мониторинг окружающей среды и контроль технологических процессов [1]. Для удовлетворения поставленных требований необходимо создание теплового датчика расхода, который отличается высокой точностью измерений, быстродействием, низким уровнем энергопотребления, компактными размерами и способом изготовления с возможностью применения групповых методов полупроводниковых технологий.

Одним из перспективных направлений в этой области является использование МЭМС датчиков расхода газа мембранного типа [2]-[4]. Преимуществом данного вида датчика перед существующими аналогичными устройствами является его повышенная чувствительность к малым потокам, возможность совмещать сразу несколько методов измерения, отсутствие подвижных деталей и большой срок автономной работы. Малые размеры устройства открывают возможность производить ранее недоступные измерения. Также различные способы реализации первичного преобразователя позволяют создать требуемое устройство для решения конкретной задачи [5]. Принцип работы теплового МЭМС-датчика расхода заключается в изменении электрического сопротивления терморезисторов под воздействием теплового распределения, создаваемого

нагревателем. При отсутствии потока равновесное распределение тепла одинаково воздействует на оба резистора, но с появлением потока тепловое облако перераспределяется и оказывает различное влияние на терморезисторы (резистор, расположенный по потоку, нагревается, а резистор, расположенный против потока – остывает). Под действием различной температуры возникает изменение сопротивления резисторов. Таким образом, измеряя разность сопротивлений терморезисторов можно установить искомую величину скорости потока газа или жидкости. Данный способ измерения называется калориметрическим.

В работе приведены основные параметры, определяющие свойства теплового датчика расхода на основе программного пакета SolidWorks Flow Simulation. Результаты моделирования сравниваются с экспериментальными данными разработанного датчика расхода газа.

II. ОПИСАНИЕ СТРУКТУРЫ

Структура исследуемого первичного преобразователя представлена на рис. 1.

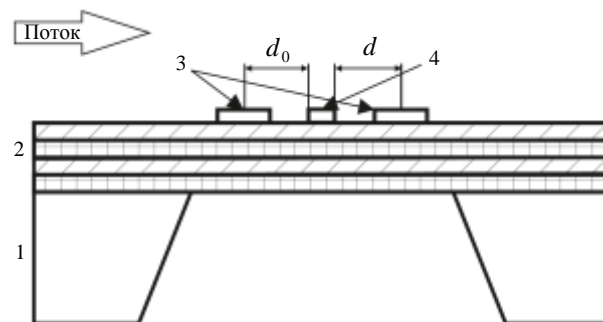


Рис. 1. Схематичное изображение структуры первичного преобразователя скорости потока: 1 – подложка Si; 2 – многослойная мембрана ($SiO_2 / Si_3N_4 / SiO_2 / Si_3N_4$); 3 – терморезисторы R_1 и R_2 ; 4 – нагревательный резистор R_3 ; d_0, d – расстояние между нагревателем и R_1, R_2 соответственно

На кремниевую подложку последовательно осаждаются слои SiO_2 и Si_3N_4 толщиной 0,6 и 0,12 мкм, соответственно. В результате получаются четыре функциональных слоя, которые представляют собой многослойную мембрану. Толщины мембранных слоев выбираются из соображений достижения наибольшей прочности и наименьших напряжений. Далее форми-

руются платиновые резисторы, выполняющие роль нагревателя и измерительных элементов (терморезисторов). Для уменьшения теплопроводности в подложку обратная её сторона протравливается до достижения слоя оксида кремния. Полученный кристалл монтируется на печатную плату и устанавливается в проточном канале.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование проводилось с помощью программной среды SolidWorks Flow Simulation. В процессе расчета с помощью метода конечных элементов находилось совместное решение уравнения Навье-Стокса и уравнения теплопроводности

$$\begin{cases} -(\vec{v} \cdot \nabla)\vec{v} + \nu \Delta \vec{v} - \frac{1}{\rho} \nabla p = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}, \\ \nabla \cdot \vec{v} = 0 \\ \lambda \nabla^2 T + \frac{F(\vec{r}, t)}{c\rho} = \frac{\partial T}{\partial t} - \vec{v} \nabla T, \end{cases}$$

где ν – кинематическая вязкость, ρ – плотность, p – давление, c – удельная теплоемкость, λ – коэффициент температуропроводности, $F(\vec{r}, t)$ – плотность тепловых источников. Более подробно об используемых физических приближениях и методе расчета можно ознакомиться в [6].

В ходе моделирования получен профиль распределение тепла вдоль мембраны в направлении обдува и его изменение под действием потока (рис. 2).

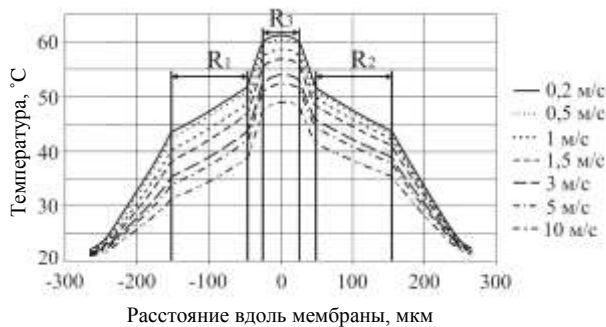


Рис. 2. Распределение теплового профиля вдоль поверхности мембраны в поперечном направлении при разных скоростях потока. R_1, R_2 – области расположения терморезисторов, R_3 – область расположения нагревательного резистора. Расстояние между границами резисторов R_3 и R_1, R_2 – 20 мкм, мощность нагрева – 7 мВт

Как видно из рисунка с увеличением скорости протекания воздуха появляется асимметрия в распределении температуры поперек мембраны. Вследствие этого возникает разностный сигнал $\Delta R = \alpha R_0 \Delta T$, где α – температурный коэффициент сопротивления (ТКС) резистора, R_0 – сопротивление резисторов при комнатной температуре, ΔR – разность сопротивлений,

индуцированная разной температурой нагрева $\Delta T = T(d) - T(-d)$ терморезисторов, расположенных симметрично на расстоянии $d = d_0$ от центрального нагревателя. Разностная температура, определяющая выходной сигнал первичного преобразователя, представлена на рис. 3.

Кривая зависимости $\Delta T(V)$ разности температуры резисторов от скорости потока имеет область насыщения, что ограничивает верхний диапазон измерений теплового датчика расхода. Это объясняется тем, что при больших скоростях поток уносит большое количество тепла, в результате чего более нагретый резистор начинает остывать, и тем самым разница температур начинает уменьшаться.

Нижний предел измерений определяется чувствительностью первичного преобразователя, задаваемой тангенсом угла наклона кривой на приведенном графике $\eta = d\Delta T / dV$, а также шумовым пределом измерения сопротивления резисторов в мостовой измерительной схеме теплового датчика расхода. С падением угла наклона на кривой зависимости разностного сигнала от скорости $\Delta T(V)$ уменьшается чувствительность теплового датчика расхода к изменению скорости. В этой связи для увеличения минимальной чувствительности и расширения динамического диапазона измерения скорости потока практический интерес представляет увеличение угла наклона кривой на начальном участке и сдвиг участка насыщения в область больших скоростей потока.

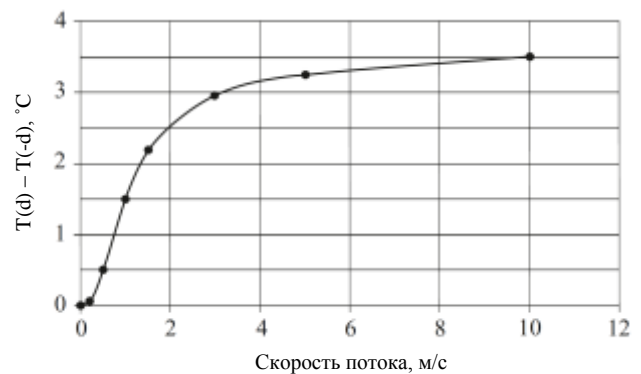


Рис. 3. Разностная температура, определяющая выходную характеристику первичного преобразователя скорости потока. Расчет проведен для расстояния между резисторами равным 20 мкм

A. Расположение резисторов

При моделировании зависимости выходных характеристик от расположения чувствительных элементов нагревательный резистор фиксировался на середине мембраны, а расстояние до терморезисторов варьировалось в пределах размера мембраны.

Из рис. 4 видно, что при малых скоростях потока терморезисторы необходимо располагать на большее расстояние, нежели при больших потоках. Отсюда следует вывод, что для увеличения динамического

диапазона теплового датчика расхода необходимо выбрать оптимальное расстояние, удовлетворяющее обоим случаям. В рассматриваемом первичном преобразователе скорости потока оно равно 1/4 ширины мембраны.

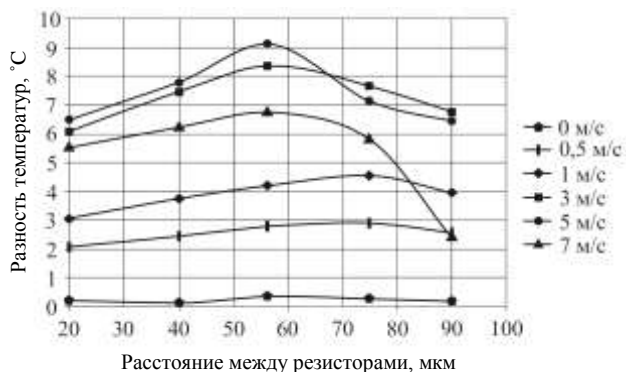


Рис. 4. Зависимость выходного сигнала от расстояния между резисторами при различных скоростях потока

Далее рассматривалась асимметричная структура, которая получается путем смещения резистора лежащего выше по потоку, в то время как расстояние до резистора, расположенного против потока, остается неизменным (рис. 1). На рис. 5 видно увеличение чувствительности на малых потоках, в то время как диапазон измерений в области больших скоростей увеличить не удалось.

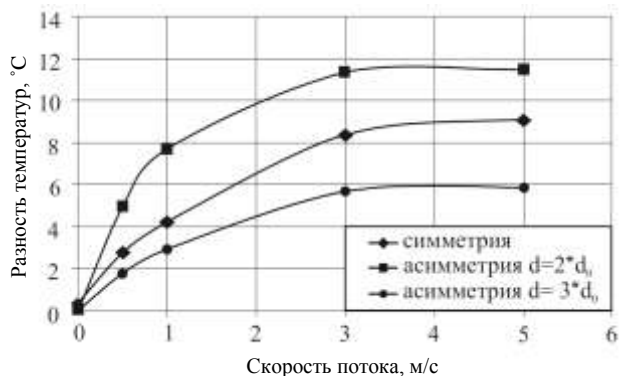


Рис. 5. Сравнение выходных характеристик первичного преобразователя скорости потока с асимметричным и симметричным расположением терморезисторов

В. Материал мембраны

Одним из способов увеличения полезного сигнала является уменьшение оттока тепла в подложку. Для этого протравливается ямка на обратной стороне кремниевой пластине. Также немаловажную роль играет материал мембраны. Он должен обладать малой теплопроводностью и достаточной жесткостью. Одним из материалов, отвечающим указанным свойствам, является полиимид. Значение его теплопроводности на порядок меньше по сравнению с оксидом кремния.

Моделирование выходных характеристик первичного преобразователя с мембраной из полиимида пока-

зывает сильное возрастание величины выходного сигнала. На рис. 6 можно также заметить снижения уровня разностного сигнала при увеличении толщины полиимидного слоя.

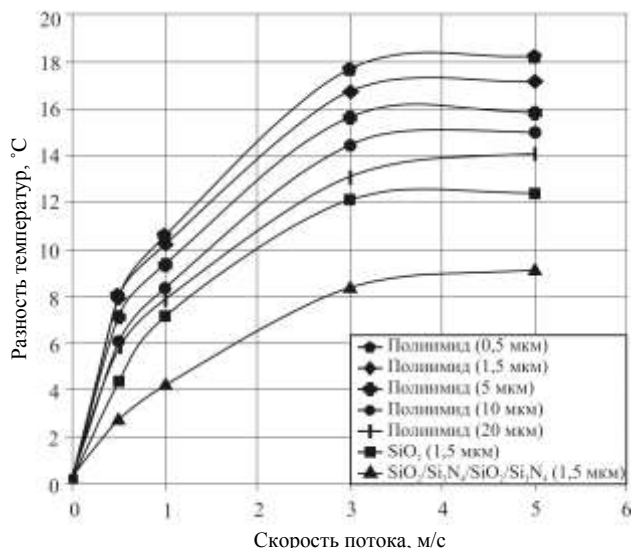


Рис. 6. Сравнение выходных характеристик первичного преобразователя скорости потока с многослойной мембраной и с мембраной из полиимида

С. Нарушение ламинарности течения

На чувствительность первичного преобразователя оказывает большое влияние режим протекания [7]. Движение среды на малых скоростях представляется собой ламинарное течение. При достижении некоторой критической величины происходит переход от ламинарного режима протекания к турбулентному [8]. В этом случае начинают появляться локальные нестационарные процессы (вихри), которые порождают неустойчивости в процессе измерения и понижают чувствительность первичного преобразователя скорости потока. Наибольшее влияние этих эффектов проявляется в ямке травления и в области расположения терморезисторов.



Рис. 7. Сравнение выходных характеристик первичного преобразователя с открытой и закрытой ямкой травления

В процессе исследования этого эффекта было произведено сравнение выходных характеристик первич-

ного преобразователя на основе полиимидной мембраны с открытой и закрытой ячейкой травления. Результаты моделирования представлены на рис. 7. Закрытая структура создавалась путем наложения тонкого слоя полиимида на обратную сторону подложки. Следует обратить внимание, что только с момента достижения некоторой величины скорости потока ($V_{крит} \approx 0,5$ м/с) кривые начинают постепенно расходиться.

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ

На основе результатов моделирования был разработан экспериментальный образец теплового датчика расхода газа. Многослойная мембрана ($SiO_2 / Si_3N_4 / SiO_2 / Si_3N_4$) изготавливалась путем первоначального окисления кремниевой подложки до достижения необходимой толщины слоя оксида, после чего проводилось плазмохимическое осаждение слоев Si_3N_4 , SiO_2 , Si_3N_4 . Формирование терморезисторов осуществлялось методом магнетронного напыления.

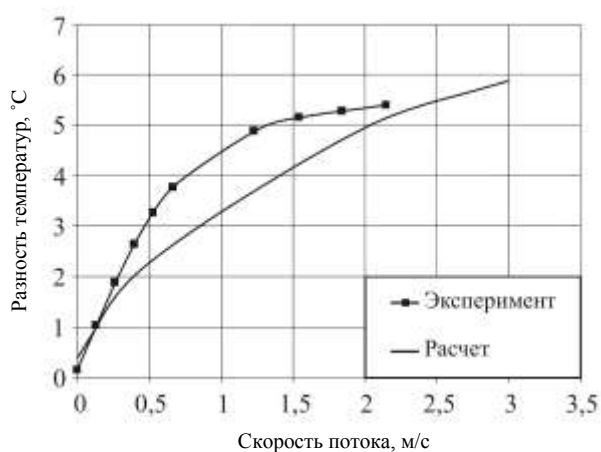


Рис. 8. Сравнение выходных характеристик модельного первичного преобразователя скорости потока и изготовленного теплового датчика расхода газа

Путем измерения сопротивлений выходных резисторов при разных скоростях обдува были получены выходные характеристики созданного первичного преобразователя скорости потока. Для этого использовалась установка, представляющая собой комплекс приборов и устройств, с помощью которых можно формировать поток заданной скорости и температуры. Более подробное описание измерительной установки и метода измерения представлены в работе [9]. На рис. 8 приведена измеренная характеристика теплового датчика расхода, которая была получена при следующих условиях: на нагревательный резистор подавалось постоянное напряжение при заданном потоке, далее измерялось сопротивление терморезисторов, которое затем пересчитывалось с помощью равенства $\Delta T = \Delta R / \alpha R$ в разность температур. Для окончательной подгонки под эксперимент применялось линейное масштабирование, предполагающее, что выходная характеристика теплового датчика расхода линейно связана с температурной разностью на резисторах.

Как видно из сравнения кривых, экспериментальная и расчетная зависимости $\Delta T(V)$ имеют качественное согласие. Различие может быть обусловлено отличием расчетных параметров материалов от параметров реальной структуры, так как при моделировании использовались справочные значения используемых величин.

V. ВЫВОДЫ

Приведенные выше результаты показывают, что влияние конструктивных параметров и используемых материалов заметно сказывается на рабочих характеристиках теплового датчика расхода. Расположение терморезисторов на определенном расстоянии позволяет создать устройство, предназначенное для решения конкретной задачи. Существенно влияет на чувствительность преобразователя материал и толщина диэлектрической мембраны. Однако вариация положения резисторов на мембране и их геометрической размеров не позволяет существенно сместить верхнюю границу диапазона в область больших скоростей. В качестве решения этой проблемы можно использовать обходной канала малого диаметра – байпас.

ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ в рамках постановления Правительства РФ от 9 апреля 2010 г. № 218 (ГК № 02.G25.31.0059).

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Liji Huang. City Natural Gas Metering // Natural Gas - Extraction to End Use / ed. Dr. Sreenath Gupta. InTech, 2012. P. 181-208.
- [2] Расчет терморезистивного анемометрического преобразователя на мембране / А.А. Бобров, А.Ф. Попков, Н.А. Дюжев [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 8. С. 34-39.
- [3] Сажин О.В., Первушин Ю.В. Микросенсор потока теплового типа для датчика массового расхода воздуха // Научное приборостроение. 2011. Т. 21. № 3. С. 52-61.
- [4] Yang-Qing Wu, Su-Ying Yao. MEMS Thermal Mass Flow Meter with Double-Heater Structure // International Conference of Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC). Tianjin. 2011. P. 1-2.
- [5] MEMS-based gas flow sensors / Yu-Hsiang Wang, Chang-Pen Chen, Chih-Ming Chang [et al] // Microfluid Nanofluid. 2009. № 6. P. 333-346.
- [6] SolidWorks Flow Simulation 2011 Technical Reference.
- [7] Hannes Sturm, Walter Lang Membrane-based thermal flow sensors on flexible substrates // Sensors and Actuators A: Physical. 2013. Vol. 195. P. 113-122.
- [8] Low Reynolds Number Flows and Transition / M.S. Genc, I. Karasu, H.H. Acikel, M.T. Akpolat // Low Reynolds Number Aerodynamics and Transition – InTech. 2012. Chap. 1. P. 1-28.
- [9] Исследование выходного отклика резистивного анемометрического преобразователя расхода газа мембранного типа в стационарном и импульсном режимах нагрева / А.А. Бобров [и др.] // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 9. С. 23-27.