

ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ДАТЧИКА ПОТОКА МЕМБРАННОГО ТИПА

© 2016 г. М.В. КАТЕЕВ

Национальный исследовательский университет «МИЭТ», г. Москва, Зеленоград

Аннотация

В данной работе было проведено моделирование первичного преобразователя скорости потока газа мембранного типа на основе калориметрического принципа работы. Проведен сравнительный анализ численного моделирования зависимости разности температур терморезисторов при горизонтальном расположении чувствительного элемента с экспериментом. Рассмотрено несколько вариантов конструкции сенсора. Получен результат численного моделирования различных вариантов конструкции датчика. Проведен поиск оптимального положения датчика в трубе с потоками измеряемого газа для достижения максимальной чувствительности. Показано влияние рабочей среды на работу сенсора. Результаты позволяют найти оптимальные на данный момент конфигурацию и расположение теплового сенсора.

Введение

Анализируя направления техники, прогресс в которых связан с идеей миниатюризации: микроэлектроники (закон Мура), микросистемную технику (МСТ), нанотехнологию, можно отметить, что мы имеем основание считать МСТ центральным звеном процесса совместного развития этих направлений.[1]

Технологии микромеханики, или микроэлектромеханических систем (МЭМС) быстро развиваются в настоящее время [2]. Это объясняется во многом тем, что их ключевые преимущества, которыми являются миниатюрность, функциональность, надёжность, малое энергопотребление, простота интегрирования, востребованы сегодня практически всеми рынками электроники. Области применений МЭМС ранжированы от самых массовых рынков (автомобильного и потребительского) до рынков сложных приборов специального назначения, производимых небольшими партиями: медицинских приборов, военной и аэрокосмической техники.

Один из видов, широко применяемых МЭМС приборов – измеритель потока газов на основе первичного преобразователя, использующего калориметрический метод. Считается абсолютным методом измерения[3], т.е. значение может быть считано в любой момент. Калориметрический принцип измерения разными способами актуален в научных исследованиях: сканирующая калориметрия [4], дифференциальная сканирующая калориметрия [5,6,7], проточная калориметрия [8], теплопроводящая [9], изотермическая [10], адиабатическая [11].

Одной из основных частей первичного преобразователя является чувствительный элемент, представляющий собой мембрану с расположенными на ней двумя датчиками температуры и находящимся между ними нагревателем. Пороговая чувствительность – это важнейший параметр измерительного преобразователя, критерием которого является определение минимального изменения температуры среды. Поэтому важен подбор материала, из которого будут изготовлены терморезисторы. Материал должен иметь линейно высокий температурный коэффициент сопротивления, а также быть химически инертным, т.е. не взаимодействовать с окружающей средой.

В работе [2] авторами подробно описан датчик потока подобного типа, разработана математическая модель прибора и проведено моделирование, которое позволило определить изменение профиля распределения тепла вдоль мембраны в зависимости от скорости потока, влияние расстояния между терморезисторами, толщины и материала мембраны на характеристики первичного преобразователя. Проведено сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными и показавшее хорошее совпадение расчетных и экспериментальных значений параметров.

Для создания математической модели теплового сенсора был использован пакет САПР SolidWorks. Математическая модель представляет собой трубу диаметром внутреннего сечения 15 мм с помещенным в нее чувствительным элементом на крыле (см. рис. 1). Установка датчика на крыло является одним из методов борьбы с неблагоприятным воздействием потока на сенсор. Повышение обтекаемости прибора позволило снизить как сопротивление датчика потоку, так и влияние турбулентных потоков на сенсор. Крыло было создано для эксперимента из ABS-пластика на 3D-принтере. В качестве исходных данных задаются параметры используемых материалов, а также начальные и граничные условия. На нагревательном элементе устанавливается температура в диапазоне от 100 до 120 °С, что было выявлено в ходе эксперимента.

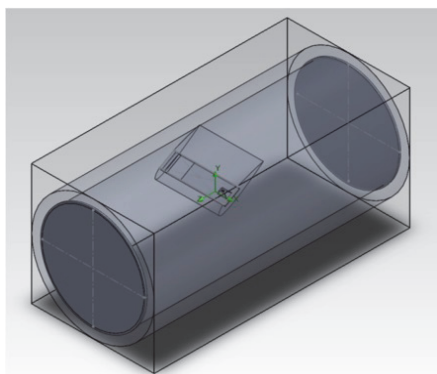


Рис. 1. Расчетная модель первичного преобразователя скорости поток в трубе.

Вместе с тем, представляет несомненный научный и практический интерес установить влияние расположения элементов первичного преобразователя (терморезисторов и нагревателя) относительно мембраны и потока газа.

Первичный преобразователь скорости потока представляет собой кремниевую подложку, на которой формируется микромеханическая диэлектрическая мембрана с расположенными на ней терморезисторами и нагревателем. В качестве материала терморезисторов и нагревателя используется платина в связи с высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) и химической стойкостью, что позволяет фиксировать локальные минимальные изменения температуры в доли градуса.

Численное моделирование

Сенсор представляет собой мост Уитстона с 4 резисторами, расположенными на мембране. Для оптимизации расчетов, т.е. для уменьшения времени расчета и упрощения построения расчетной сетки, были рассмотрены два варианта создания резисторов в Solidworks: 1) 4 резистора сформированы так, как они выглядят на реальных кристаллах (меандры); 2) упрощенная версия, выглядящая как параллелепипеды, площадью с два резистора-меандра.

В случае использования резисторов в форме меандров для обработки сигнала рассматриваются разницы температур между первым и третьим (по порядку слева направо) резисторами или вторым и четвертым. При «сплошных» резисторах мы следим просто за разницей температур между ними. Ниже приведены изображения резисторов и графики расчетов.

Таким образом, мы получили результат, говорящий о том, что упрощение геометрии модели вполне обосновано. Далее мы будем рассматривать именно упрощенный вид резисторов.

Для проведения моделирования используется модуль SolidWorks Flow Simulation (семейство дополнительных модулей по газо/гидродинамическим расчетам). Для проверки адекватности данного модуля для нашего эксперимента были проведен теоретический опыт по исследованию работоспособности датчика расхода газа конфигурации, пример которой показан на рис. 2.

Установка датчика на крыло является одним из методов противодействия с неблагоприятным воздействием потока на сенсор[12]. На рис. 3 представлены

результаты моделирования влияния расположения первичного преобразователя на крыло на его чувствительность. Заметное из графиков повышение чувствительности сенсора вследствие установки датчика на крыло можно объяснить улучшением обтекаемости конструкции, что позволяет снизить как сопротивление датчика потоку, так и влияние турбулентных потоков на сенсор.

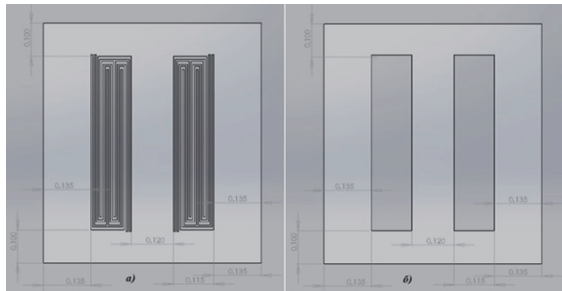


Рис. 2. Изображение резисторов: а) резисторы, которые выглядят как на реальной сенсоре (меандры, 4 штуки); б) упрощенная версия.

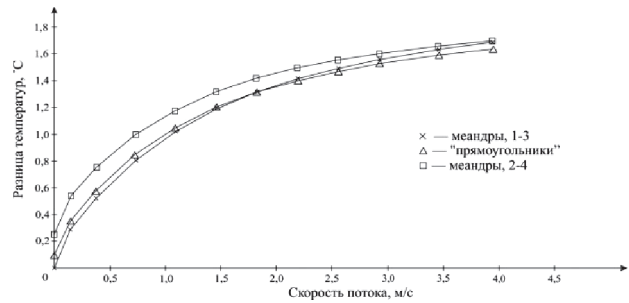


Рис. 3. Графики зависимости разницы температур между резисторами от скорости потока при разных формах резисторов.

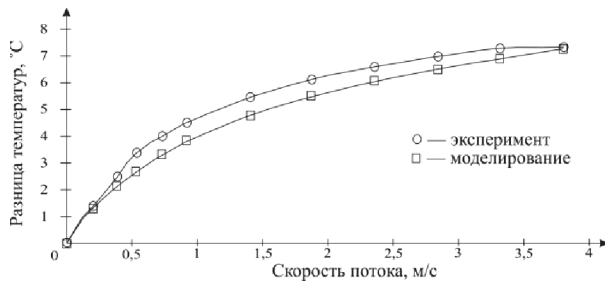


Рис. 4. Зависимость разности температур терморезисторов, горизонтальное положение чувствительного элемента при расстоянии между резисторами 60 мкм при многослойном материале мембраны.



Рис. 5. Зависимость разности температур терморезисторов при конфигурациях с крылом и без крыла.

Нами были проведены расчеты с целью поиска такого расположения резисторов на мембране, при котором достигается наибольшая чувствительность сенсора. Результаты моделирования обдува датчика при изменении угла наклона крыла в трубе показаны на рис. 6.

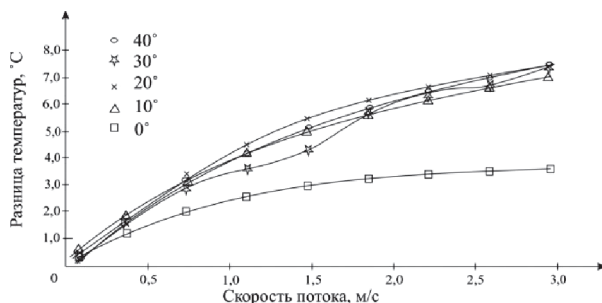


Рис. 6. Зависимость разности температур терморезисторов от угла наклона сенсора в трубе.

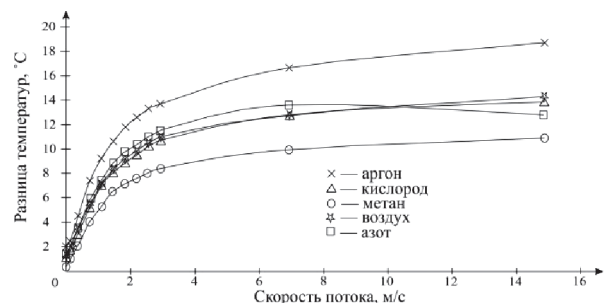


Рис. 7. Зависимость разности температур терморезисторов от величины скорости потока при различном молекулярном составе среды.

Мембрана представляет собой многослойную структуру, состоящую из слоев $SiO_2/Si_3N_4/SiO_2/Si_3N_4$ или слоя полиимида, и предназначена для уменьшения отво-

да тепла от нагревателя (в некоторых случаях терморезисторы являются нагревателями, то есть они и нагреватели, и измерительные резисторы).

Потоки газов различаются по скорости, температуре как газа, так и окружающей среды, молекулярному составу и т.д. На рынке сенсоров существует широкий ассортимент устройств. Выбор датчика обусловлен определёнными условиями его эксплуатации. Следующий график показывает, что различия в составе газа влекут за собой отличия в показаниях прибора. Кривые, представленные на рис. 5, получены в результате нахождения разницы температур двух терморезисторов. Из рис. 7 видно, что различный молекулярный состав потока обеспечивает качественно схожие кривые графика чувствительности, но отличающиеся по крутизне. Таким образом, выбирая устройство, нужно знать и понимать, с потоками каких веществ будет работать сенсор. При моделировании параметр «выделяемая мощность» на резисторах, который отвечает за нагрев, не менялся при переходе от одного газа к другому. Температура резисторов менялась при изменении среды, в которой находится сенсор. Зависимость температуры терморезистора от среды представлена в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость температуры терморезистора от среды

Скорость потока, м/с	Температура резистора, К				
	Воздух	Азот	Кислород	Метан	Аргон
0	408,3612	412,9586	406,2631	383,4463	443,1589
3	388,5206	391,783	386,6931	368,4721	417,4773

Результат работы сенсора может быть как разницей температур между двумя терморезисторами, находящимся на мембране под действием потока газа, так и разницей температуры на одном из терморезисторов, т.е. идет наблюдение за потерей температуры нагревателя при увеличении скорости потока (рис. 8).

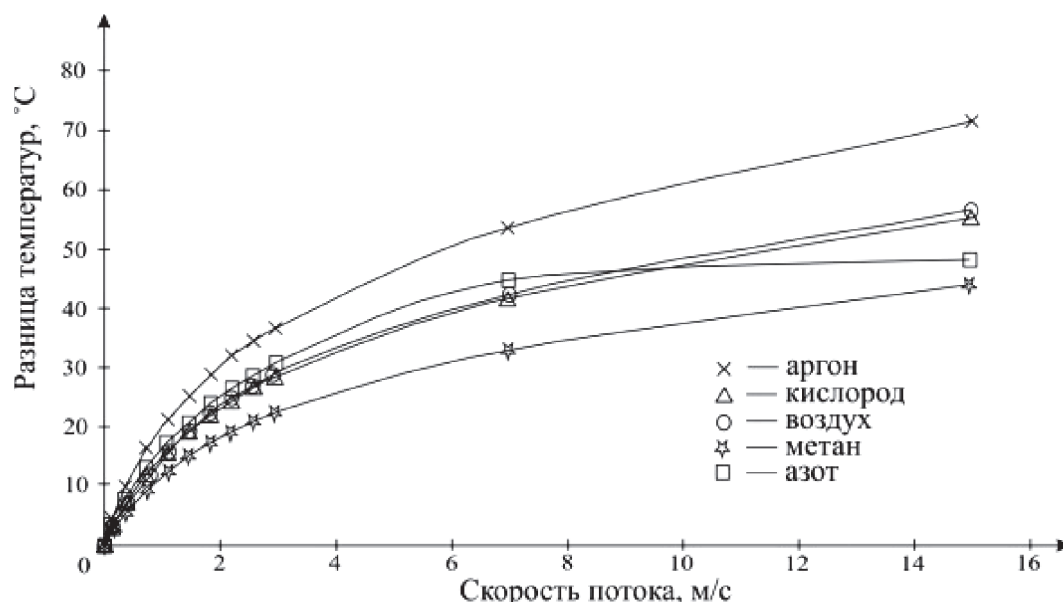


Рис. 8. График потери температуры на одном терморезисторе при увеличении скорости потока с разным молекулярным составом.

Этот метод зачастую необходим, так как при больших скоростях потока (более 3 м/с) он обеспечивает лучшую чувствительность сенсора, что заметно в сравнении с рис. 7. Для достижения наибольшей точности измерений следует использовать оба метода считывания сигнала: на малых потоках использовать разницу температур, а на больших — метод отслеживания потери температуры на одном резисторе.

Выводы

На основании проведенной работы установлено, что из рассмотренных возможных конфигураций сенсора наилучшим с точки зрения чувствительности является вариант с нанесенными на обратную сторону мембраны терморезисторами с расположением на крыле. Показана схожесть экспериментальных и полученных в ходе численного моделирования выходных характеристик сенсора. Продемонстрировано, что улучшение аэродинамики чувствительного элемента ведет к увеличению чувствительности устройства. Наглядно показано, что поворот конструкции на угол, больший, чем на 10° к потоку газа, обеспечивает повышение чувствительности в 2 раза. Установлено, что молекулярный состав среды, исследование в которой проводится, влияет на чувствительность сенсора.

Работа была выполнена при поддержке Минобрнауки России, ГК № 3.2501.2014/К, с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Микросистемная техника и электронная компонентная база» МИЭТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернер В.Д., Мальцев П.П., Сауров А.Н., Чаплыгин Ю.А. Синергетика миниатюризации: микроэлектроника, микросистемная техника, наноэлектроника // Микросистемная техника. - 2004. - N 7. - с. 23-29.
2. Беспалов В.А., Васильев И.А., Дюжев Н.А., Мазуркин Н.С., Новиков Д.В., Попков А.Ф. Моделирование первичного преобразователя скорости потока газа мембранного типа // Известия Вузов. Электроника. №3, 2014, с. 50-56.
3. Колесов В.П. Основы термохимии // М.: Изд-во МГУ. 1996. 205 с.
4. Барышников С.В., Чарная Е.В., Милинский А.Ю., Шацкая Ю.А. Диэлектрические и калориметрические исследования KNO_3 в порах наноразмерных силикатных матриц МСМ-41 // Физика твердого тела, 2012, том 54, вып. 3.
5. Паникоровский Т.Л., Бритвин С.Н.. Об использовании дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования структурных особенностей органических и неорганических соединений // Ресурсный центр «Рентгенодифракционные методы исследования», Санкт-Петербургский государственный университет, 2013.
6. Бугаева А.Ю., Белый В.А. Метод дифференциальной сканирующей калориметрии для исследования наноматериалов // Учреждение Российской академии наук Институт химии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, 2011.
7. Барботько С.Л., Асеева Р.М., Серков Б.Б., Сивенков А.Б., Круглов Е.Ю.. Об определении теплот сгорания и тепловыделения при горении полимерных материалов // «Пожаровзрывобезопасность», т. 21, № 5, 2012 г.
8. Замышляева О.Г.. (Со)полимеры различной архитектуры на основе перфторированных гидридов германия: синтез, структура, свойства // Дис. д-ра хим. наук 02.00.06, 2013.
9. Кирюхин А.В., Поляков А.Ю., Мушинский А.В., Топчиева О.М.. Исследование тепловых свойств скальных пород геотермальных месторождений // Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-Камчатский, 2010.
10. Еськов А.В. Твердотельные охлаждающие свойства на основе электрокалорического эффекта в сегнетоэлектрических материалах // Дисс. кан-та тех. наук 05.27.01, 2014.
11. Смирнова Н.Н., Захарова Ю.А., Замышляева О.Г.. Калориметрическое изучение шитого (со)полимера на основе перфторированных гидридов германия // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского, №1, стр.91-99, 2011.
12. Измеритель потока / Дюжев Н.А. // Патент РФ №2014140442/28.