

УДК 681.121.83; 533.6.08

© О. В. Сажин, Ю. В. Первушин

МИКРОСЕНСОР ПОТОКА ТЕПЛООВОГО ТИПА ДЛЯ ДАТЧИКА МАССОВОГО РАСХОДА ВОЗДУХА

Разработана аналитическая модель сенсора потока теплового типа. Результаты применения модели использованы для разработки микросенсора потока теплового типа с оптимальными функциональными характеристиками. Описана технология изготовления микросенсора. Изготовлен опытный образец микросенсора, пригодный для использования в датчике массового расхода воздуха. Представлены основные характеристики микросенсора.

Кл. сл.: сенсор потока теплового типа, массовый расход, тепломассоперенос, датчик массового расхода, MEMS

ВВЕДЕНИЕ

Среди современных микроэлектромеханических систем (MEMS) особое место занимают так называемые сенсоры потока теплового типа [1–3], общий принцип действия которых основан на зависимости интенсивности конвективного переноса тепла от скорости движущейся среды (флюида). Изучение баз данных зарубежных патентов свидетельствует о возросшем в последнее время интересе к разработке новых конструкций микросенсоров потока теплового типа, основанных на применении технологий формирования микро и наномасштабных поверхностных структур (см., например, [4] и US Patents 7776227, 20090158859, 20090158838). Действительно, благодаря быстрому развитию методов формирования новых поверхностных микроструктур с улучшенными эксплуатационными характеристиками достигнут значительный прогресс в большинстве критических промышленных технологиях, как и в технологии производства микросенсоров. В частности, миниатюризация сенсоров открыла новые возможности для их практического использования, существенно снизила стоимость их производства и потребляемую электроэнергию.

Области использования микросенсоров потока теплового типа — автомобильная [5–7], химическая [8] и электронная промышленности [9], медицина [10], космические приложения [11], кондиционирование и вентиляция [12], а также и другие отрасли [1]. Микросенсоры потока теплового типа используются в интенсивно разрабатываемой в последнее время микросистеме общего анализа (μ TAS) [13].

По принципу измерения сенсоры потока теплового типа можно подразделить на три основные класса: времяпролетные, термоанемометрические

и калориметрические.

Принцип измерения скорости или расхода флюида с использованием времяпролетных сенсоров заключается в определении времени задержки теплового импульса. Нагреватель подвергается импульсному нагреву, и через некоторый промежуток времени (время задержки) термочувствительный элемент, расположенный по направлению течения флюида, улавливает этот импульс. Очевидно, что время задержки зависит от скорости течения флюида.

Термоанемометрические сенсоры — одни из самых распространенных сенсоров для диагностики потока флюида, и существует достаточно большое количество их практических реализаций. В частности, суть одной из них заключается в определении динамики остывания электрически нагретого элемента вследствие процесса теплообмена с флюидом. Интенсивность теплообмена в свою очередь существенным образом зависит от массового расхода флюида. Так как электрическое сопротивление большинства материалов существенно зависит от температуры, то для определения температуры элемента измеряют его сопротивление.

Принцип работы калориметрического сенсора основан на изменении температурного поля вблизи нагретого элемента потоком флюида. Разница температур между термочувствительными элементами, расположенными по направлению течения и против относительно нагревателя, определяется массовым расходом флюида.

Разработаны также сенсоры потока, работа которых основана на комбинации вышеуказанных принципов измерения. Калориметрический сенсор более чувствителен к малым потокам, в то время как времяпролетный и термоанемометрический сенсоры предпочтительны для диагностики больших потоков. В работах [14;15] представлены сен-

соры потока на основе комбинации калориметрического и времяпролетного принципов измерений. Возможность детектировать воздушные потоки в широком динамическом диапазоне с определением направления потока показана в [16]: измерение малых потоков основано на принципе измерения разницы и средней температуры двух термочувствительных элементов, измерение больших потоков — на термоанемометрическом принципе.

Заслуживает внимания разработанный в [17] термоанемометрический микросенсор для измерения расходов жидкостей и газов. Благодаря малой теплоемкости этот микросенсор пригоден также и для динамических измерений в жидкостях, например для измерения пульсаций в потоке частотой до нескольких сотен герц.

В целом в зависимости от потребности практики с использованием сенсоров потока теплового типа можно измерять малые расходы газа от 0.01 мл/мин [18] и 10 мл/мин [8] до значений несколько л/мин, как в [19–21]. Существенно увеличить величину максимально измеряемого расхода газа можно путем регистрации сенсором малой части потока газа с последующей процедурой масштабирования для получения общего расхода газа в исследуемой системе. В частности, такой подход реализован в датчике массового расхода воздуха Bosch HFM5, который позволяет измерять массовый расход воздуха до 10^3 кг/ч ($1.4 \cdot 10^4$ л/мин) с относительной погрешностью менее 3 % в трубе внутренним диаметром 82 мм [7].

Важной характеристикой сенсора потока теплового типа является чувствительность. В частности, чувствительность калориметрического сенсора потока определяется, как

$$S_c = \left. \frac{\partial \Delta T}{\partial Q} \right|_{Q=0}, \quad (1)$$

где ΔT — разница температур термочувствительных элементов, расположенных против и по течению флюида относительно нагревателя, Q — массовый расход флюида.

В работе [22] экспериментально и численно исследована чувствительность калориметрического сенсора потока. Показано, что положение термочувствительных элементов, размер нагревателя и подводимая к нагревателю тепловая мощность существенно влияют на чувствительность сенсора. В [23] экспериментально показано, что чувствительность калориметрического сенсора потока также зависит от диапазона измеряемых расходов: чем ниже диапазон, тем выше чувствительность.

Кроме того, на чувствительность сенсора существенным образом влияет тепловая изоляция термочувствительных элементов сенсора от подложки: чем лучше тепловая изоляция, тем выше чувствительность.

В настоящее время уменьшение "паразитного" влияния подложки, заключающегося в понижении уровня полезного сигнала, осуществляется на основе использования новых технологических методов и материалов. В частности, в работе [24] предложен способ формирования подложки с высоким термическим сопротивлением на основе пористого кремния. Действительно, теплопроводность пористого кремния в зависимости от размера пор и морфологии материала находится в диапазоне 0.1–2 Вт/м/К, что существенно ниже теплопроводности (порядка 170 Вт/м/К) широко используемого в микроэлектронике поликристаллического кремния [25]. Кроме пористого кремния используют и другие материалы с низкой теплопроводностью, например стекло (кварц или пирекс) и диоксид кремния с теплопроводностями около 1–1.4 Вт/м/К.

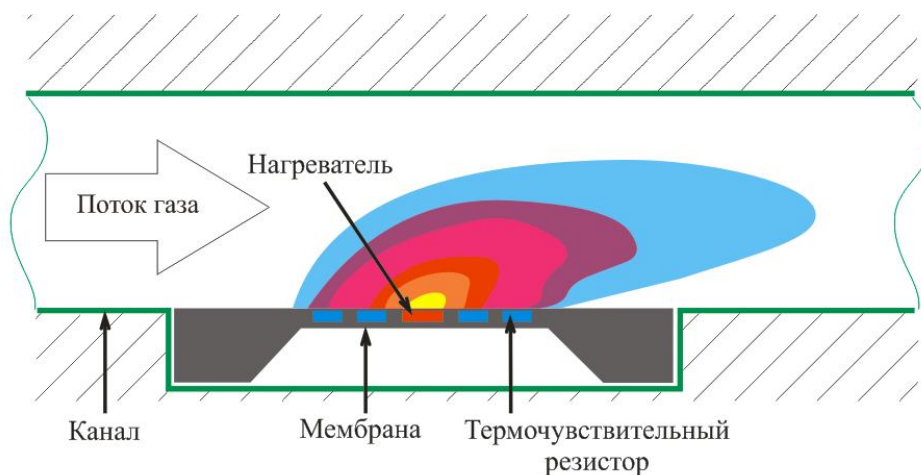


Рис. 1. Физический принцип диагностики потока газа в канале с использованием калориметрического сенсора потока

Эффективным технологическим способом добиться хорошей теплоизоляции является формирование воздушной полости, отделяющей диэлектрическую несущую структуру с расположенным на ней термочувствительным элементом от подложки [26]. Действительно, теплопроводность воздуха порядка 0.03 Вт/м/К является очень низкой величиной по сравнению с теплопроводностью твердых тел, и суммарное термическое сопротивление подложки будет велико. Очевидно, что хорошая тепловая изоляция позволяет также существенно снизить потребляемую сенсором электрическую мощность.

В настоящей работе основное внимание будет уделено калориметрическому микросенсору потока, т. к. его практическая реализация позволяет сочетать в себе все три упомянутых принципа измерения скорости и расхода флюида. На рис. 1 иллюстрирован физический принцип диагностики потока газа в канале с использованием калориметрического сенсора. Сенсор надежно монтируется внутри канала как на поверхности, так и на некотором удалении от нее. Измерительная часть сенсора представляет собой тонкую мембрану, удерживающуюся на массивной подложке. На мембране расположены нагреватель и термочувствительные элементы, количество которых может варьироваться от двух до нескольких штук.

С теоретической точки зрения описание процесса тепломассопереноса при внутреннем течении газа является достаточно сложной задачей. Действительно, процесс тепломассопереноса в каналах зависит от множества факторов, таких как режим течения газа [27], форма и размер канала [28, 29], химический состав поверхности канала и род газа [30–32], температурный профиль на поверхности [33] и степень ее шероховатости [34]. Тепломассоперенос также определяют макроскопические и физические параметры газа.

Несомненно, что для более корректного и точного исследования процесса тепломассопереноса предпочтительней использовать численные методы, например такой как метод конечных элементов (FEM), который свободен от ряда предположений и упрощений, свойственных аналитическим подходам. Однако для более глубокого понимания проблемы и разработки рекомендаций по конструкции сенсора также крайне необходима и аналитическая модель.

Часто используемой является аналитическая модель калориметрического сенсора потока, предложенная в [35]. Однако недостатком этой модели является неучет конечного размера мембраны. Действительно, согласно этой модели, температура мембраны равна температуре окружающей среды

на бесконечном удалении от нагревателя. В реальности же температура мембраны равна температуре окружающей среды на конечном расстоянии от нагревателя в месте крепления к массивной удерживающей подложке.

Теоретической целью настоящего исследования является разработка адекватной реальности аналитической модели калориметрического сенсора потока, пригодной для проведения инженерных расчетов. Результатами подобных расчетов могут являться предварительные данные о функциональных характеристиках сенсора, выявление наиболее ответственных частей системы, сравнение нескольких альтернативных конструкций, оптимизация системы по заданным параметрам и расчет рабочих режимов. Практическая цель работы заключается в разработке и создании калориметрического микросенсора потока с максимально приближенными к оптимальным функциональными и конструктивно-технологическими параметрами.

1. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Рассмотрим мембрану, с расположенными на ней нагревателем и термочувствительными элементами, в виде тонкой прямоугольной пластины поперечного сечения S и периметра p . Пластина предполагается настолько тонкой, что температуру во всех точках поперечного сечения можно считать одинаковой, что позволяет нам использовать одномерную постановку задачи.

Пусть пластина расположена вдоль оси x , вдоль которой течет газ со скоростью U (рис. 2). Длина стержня в направлении оси x составляет $2L$, длина нагревателя $2l$. К нагревателю приложена электрическая мощность P . В зонах $-L < x_s < -l$ и $l < x_s < L$ расположены термочувствительные элементы.

С целью расчета установившегося температурного распределения в пластине воспользуемся дифференциальным уравнением теплопроводности для элемента объема, ограниченного сечениями, проходящими через x и dx перпендикулярно оси пластины

$$\frac{\lambda}{\rho c} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - U \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{Hp}{\rho c S} (T - T_{amb}) + \frac{P}{2l \rho c S} = 0, \quad (2)$$

где T — температура пластины; T_{amb} — температура окружающей среды; H — коэффициент теплоотдачи; ρ , c и λ — плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности материала пластины соответственно. Граничные условия к этому уравнению зададим следующим образом:

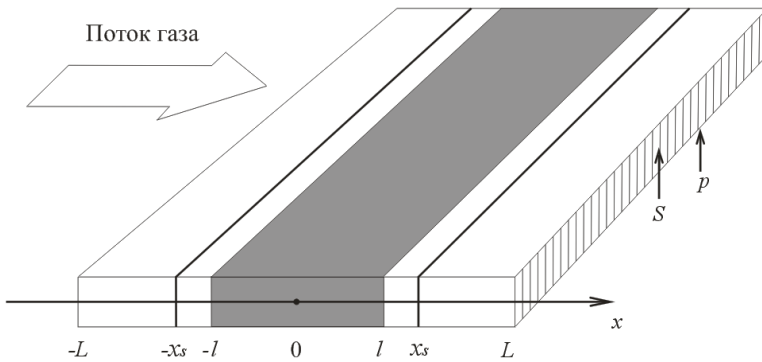


Рис. 2. Мембрана.

Тонкая прямоугольная пластина длиной $2L$, поперечного сечения S и периметра p , обтекаемая потоком газа. В зоне $-l \leq x \leq l$ расположен нагреватель, в зонах $-L < x_s < -l$ и $l < x_s < L$ — термочувствительные элементы

$$\begin{aligned}
 -L \leq x < -l : P = 0, T(x = -L) = T_{amb}; \\
 -l \leq x \leq l : P \neq 0, T(x = -l) = T_{(-l)}, \\
 T(x = l) = T_l; \\
 l < x \leq L : P = 0, T(x = L) = T_{amb}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

На практике одна из основных проблем изучения процесса теплообмена в системе "флюид—твердое тело" заключается в корректном нахождении коэффициента теплоотдачи H , который зависит от множества факторов. В частности, существенное влияние на эффективность теплоотдачи оказывает характер течения флюида, т. к. им определяется механизм переноса тепла. При ламинарном течении частицы флюида движутся не перемешиваясь, поэтому перенос тепла по нормали к направлению движения осуществляется путем теплопроводности. При турбулентном течении частицы флюида движутся неупорядоченно, направление и скорость движения отдельных частиц непрерывно меняются, а перенос тепла по нормали к направлению осредненного движения осуществляется как за счет теплопроводности, так и за счет конвекции, при этом конвективный перенос тепла может существенно превышать передачу его путем теплопроводности.

Для решения задачи теплообмена в полной постановке с целью определения коэффициента теплоотдачи необходимо совместное решение уравнений неразрывности, движения (Навье—Стокса) и переноса энергии. Совместное решение этих уравнений представляет собой достаточно сложную задачу, поэтому для практических расчетов целесообразно воспользоваться методами теории подобия.

Уравнение подобия для процессов теплообмена при вынужденном движении флюида имеет вид

$$Nu = f(Re; Pr), \tag{4}$$

где Nu , Re и Pr — критерии подобия: числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля соответственно.

При обтекании пластины с однородной температурой, находящейся в цилиндрическом канале диаметром D , критериальное уравнение можно записать в виде системы уравнений для каждого из режимов течения следующим образом [36]:

$$Nu = \begin{cases} 0.664 Re^{1/2} Pr^{1/3} & \text{для ламинарного режима;} \\ (0.037 Re^{4/5} - A) Pr^{1/3} & \text{для смешанного режима;} \\ 0.037 Re^{4/5} Pr^{1/3} & \text{для турбулентного режима,} \end{cases} \tag{5}$$

где $A = 0.037 Re_{cr}^{4/5} - 0.664 Re_{cr}^{1/2}$, Re_{cr} — критическое число Рейнольдса.

Критерии подобия в этой системе уравнений запишем, как

$$\left. \begin{aligned} Nu &= H 2L / \lambda_f, \\ Re &= UD / \nu_f, \\ Pr &= \eta_f c_{pf} / \lambda_f, \end{aligned} \right\} \tag{6}$$

где λ_f — коэффициент теплопроводности флюида; ν_f и η_f — его кинематическая и динамическая вязкости; c_{pf} — удельная теплоемкость флюида при постоянном давлении. Заметим, что т. к. мембрана находится внутри канала, то коэффициент теплообмена зависит от гидродинамической картины течения газа в канале, поэтому характерным размером при определении числа Рейнольдса Re целесообразно выбрать диаметр цилиндрического или высоту прямоугольного канала.

Переход от ламинарного к турбулентному режиму течения происходит при достижении критического числа Рейнольдса Re_{cr} . При $Re < Re_{cr}$ течение происходит в ламинарном режиме, при $Re >$

$> Re_{cr}$ возможно возникновение турбулентности. Критическое значение числа Рейнольдса для течения флюида в цилиндрическом канале $Re_{cr} \approx 2300$. Развитый турбулентный режим устанавливается при значениях $Re > 1 \cdot 10^4$, а диапазон изменения Re от $2 \cdot 10^3$ до $1 \cdot 10^4$ соответствует смешанному режиму течения.

В инженерных расчетах, чтобы не слишком усложнять расчет, часто используют приближенную формулу для нахождения коэффициента теплообмена

$$H = a + b\sqrt{U}, \quad (7)$$

где a и b — константы, определяемые из условия наилучшего согласования с данными конкретного эксперимента. В большинстве же встречающихся на практике случаев коэффициент теплоотдачи определяют экспериментальным путем.

Используя подход, предложенный в [37], получено решение уравнения (2) с граничными условиями (3) в следующей форме:

$$-L \leq x < -l:$$

$$T - T_{amb} = (T_{(-l)} - T_{amb}) \exp\left(\frac{U\rho c(l+x)}{2\lambda}\right) \frac{\text{sh}(\xi(L+x))}{\text{sh}(\xi(L-l))};$$

$$-l \leq x \leq l:$$

$$T - T_{amb} = \frac{(T_l - T_{amb}) \exp\left[-\frac{U\rho c(l-x)}{2\lambda}\right] \text{sh}(\xi(l+x)) + (T_{(-l)} - T_{amb}) \exp\left[\frac{U\rho c(l+x)}{2\lambda}\right] \text{sh}(\xi(l-x))}{\text{sh}(2\xi l)} + \frac{P}{2lHp}; \quad (8)$$

$$l < x \leq L:$$

$$T - T_{amb} = (T_l - T_{amb}) \exp\left(-\frac{U\rho c(l-x)}{2\lambda}\right) \frac{\text{sh}(\xi(L-x))}{\text{sh}(\xi(L-l))},$$

$$\text{где } \xi = \left[(U\rho c/2\lambda)^2 + (Hp/\lambda S) \right]^{\frac{1}{2}}.$$

В этом решении неопределенными являются температуры на концах нагревателя $T_{(-l)}$ и T_l . Зададим температуры на концах канала, как

$$\begin{cases} T_l = T_0 + \delta T, \\ T_{(-l)} = T_0 - \delta T, \end{cases} \quad (9)$$

где T_0 — температура в центре нагревателя при $x = 0$, $\delta T > 0$. Очевидно, что это грубое предположение, однако в данном теоретическом исследовании мы не претендуем на количественное соответствие результатов нашей аналитической модели результатам эксперимента. Важным для нас является получить качественное описание процесса.

Из (8) следует, что температура в центре нагревателя определяется выражением:

$$T_0 - T_{amb} = \frac{1}{2 \text{ch}(\xi l)} \left\{ (T_l - T_{amb}) \exp\left[-\frac{U\rho c l}{2\lambda}\right] + (T_{(-l)} - T_{amb}) \exp\left[\frac{U\rho c l}{2\lambda}\right] \right\} + \frac{P}{2lHp}. \quad (10)$$

Подставляя в это выражение наше предположение (9), можно получить формулу для δT , которая выглядит следующим образом:

$$\delta T = \frac{1}{\text{sh}\left(\frac{U\rho c l}{2\lambda}\right)} \times \left\{ (T_0 - T_{amb}) \left(\text{ch}\left(\frac{U\rho c l}{2\lambda}\right) - \text{ch}(\xi l) \right) + \frac{P}{2lHp} \text{ch}(\xi l) \right\}. \quad (11)$$

Рассмотрим часто встречающийся на практике случай работы нагревательного элемента в режиме постоянной температуры. При работе в этой режиме средняя температура нагревателя \bar{T}_h при различных величинах скорости течения флюида U поддерживается постоянной путем задания необходимой электрической мощности P , подводимой к нагревателю. Чтобы не усложнять расчет, сделаем

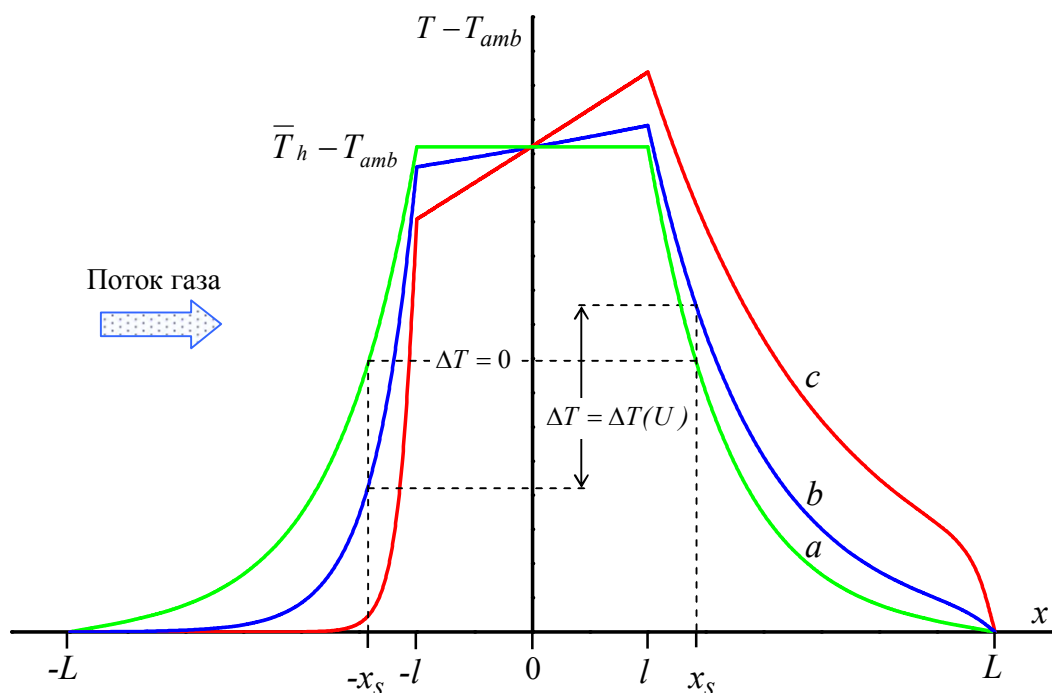


Рис. 3. Установившиеся температурные распределения в мембране $T = T(x)$ при работе калориметрического сенсора потока в режиме постоянной температуры для различной скорости U течения газа. $U = 0$ (a); 0.01 (b) и 0.1 (c)

второе предположение, что средняя температура нагревателя \bar{T}_h , определяемая на практике, совпадает с температурой в центре нагревательного элемента T_0 .

На рис. 3 представлен качественный результат расчета установившегося температурного распределения в мембране $T = T(x)$ при работе нагревателя сенсора в режиме постоянной температуры для различной скорости течения газа $U = 0, 0.01$ и 0.1 .

Разница температур между термочувствительными элементами, расположенными по направлению течения и против относительно нагревателя, определяется, как

$$\Delta T = T(x_s) - T(-x_s), (x_s > l). \quad (12)$$

Как следует из рис. 3, в отсутствие потока газа ($U = 0$) установившееся температурное распределение в мембране $T = T(x)$ представляет собой четную функцию и разница температур $\Delta T = 0$. Поток газа изменяет температурное распределение в мембране как в области до и после нагревателя так и в самом нагревательном элементе и разница

температур $\Delta T \neq 0$. С увеличением скорости потока газа разность температур увеличивается. Из рисунка также видно, что температура термочувствительного элемента, находящегося в области течения после нагревателя достаточно близко к нему, может превышать среднюю температуру нагревателя.

2. МИКРОСЕНСОР

Сенсор потока теплового типа должен удовлетворять достаточно строгим функциональным, технологическим и механическим требованиям. Важными функциональными требованиями являются высокое быстродействие, низкое энергопотребление и высокий уровень полезного сигнала. Сенсор должен быть надежно защищенным от повреждений и загрязнений, пассивным для химически активных веществ и достаточно прочным. Технология изготовления сенсора должна содержать максимальное число стандартных операций микроэлектронного производства.

В настоящей работе состав оборудования для создания сенсора определен требованиями к изготовлению интегральных микросхем (ГОСТ 18725-83. Микросхемы интегральные.). Изготовление производится на микроэлектронном производстве, в чистых комнатах с использованием стандартного оборудования для формирования микроэлектромеханических систем.

Микросенсор формируется на пластине из монокристаллического кремния ЕТО035.124ТУ 1А2КМЦ Ø78КЭФ-4.5(100)-380. Технология изготовления является интегральной, т. е. в одном производственном процессе проводится микромеханическая обработка партии пластин, содержащих сотни сенсоров на каждой. За счет этого удается получить однородность параметров микросенсоров и низкую себестоимость отдельного микросенсора в случае массового производства. На рис. 4 показана пластина со сформированными сенсорами после микромеханической обработки (планарная и непланарная стороны).

Первоначально необработанная пластина проходит гидромеханическую и химическую обработки с целью удаления технических загрязнений. На этом же этапе методом двухсторонней фотолитографии производится формирование меток для двухстороннего совмещения. Метки используются для совмещения топологий разных сторон пластины в процессе фотолитографии на последующих операциях.

На следующем этапе производится окисление пластин с обеих сторон на толщину слоя до 1.2–2.0 мкм с целью получения масок травления мембраны и изоляции электрической схемы от

подложки. Далее на поверхность планарной стороны пластины осаждается нитрид кремния слоем толщиной около 0.15 мкм.

Следующим слоем планарной стороны пластины является легированный поликристаллический кремний для формирования в нем электрических проводников, сопротивление которых зависит от температуры. Для этого на поверхность нитрида кремния газофазным методом производится осаждение поликристаллического кремния толщиной 1 мкм, который в дальнейшем легируется примесью. Легирование производится согласно режиму, обеспечивающему наибольший температурный коэффициент сопротивления (ТКС) при достаточно высоком уровне линейности зависимости сопротивления от температуры. В этом слое формируется конфигурация нагревательного и четырех термочувствительных резисторов, расположенных на мембране, а также одного резистора на краю сенсора для измерения температуры воздуха. На этом этапе формируется также система проводников для включения этой конфигурации во внешнюю электрическую схему с целью регистрации и обработки полезного сигнала.

Электрическая схема в слое поликремния формируется методом фотолитографии. На рис. 5 представлено расположение нагревательного (в центре) и четырех термочувствительных резисторов на мембране. Размеры нагревателя и термочувствительных резисторов, а также их расположение на мембране выбраны, исходя из предварительных теоретических расчетов согласно разработанной аналитической модели и возможностей имеющейся технологии и оборудования.

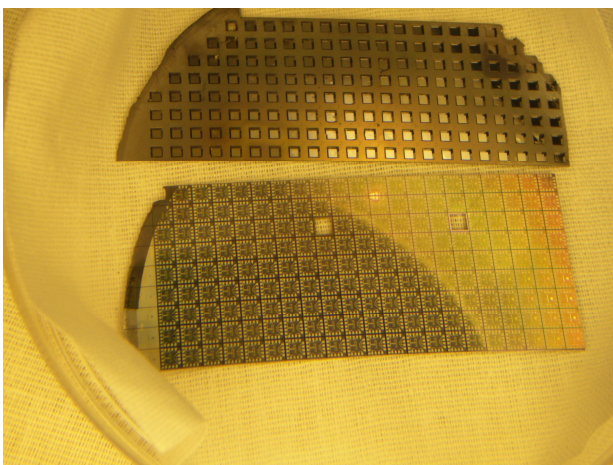


Рис. 4. Кремниевая пластина после микромеханической обработки.
Планарная и непланарная стороны

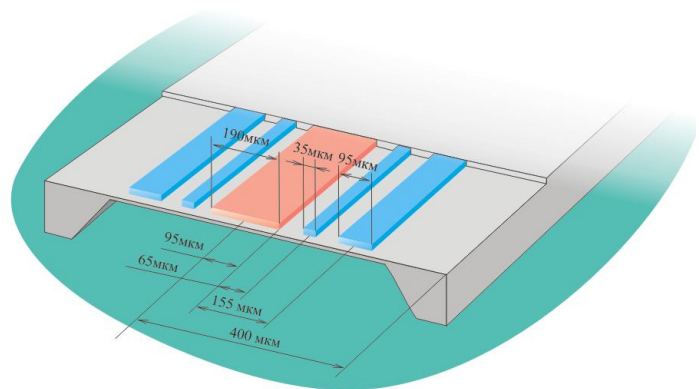


Рис. 5. Расположение нагревательного (в центре) и четырех термочувствительных резисторов на мембране

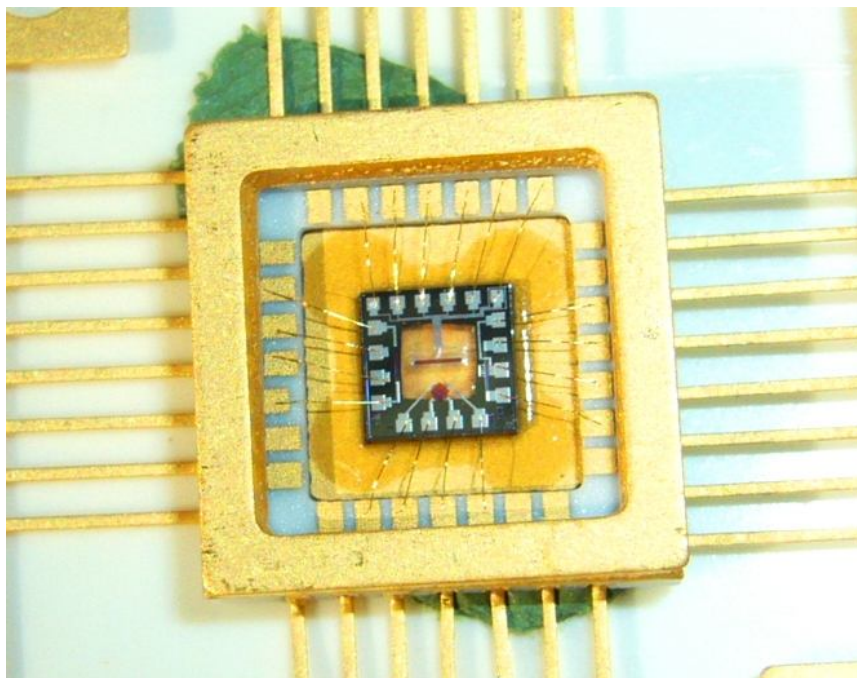


Рис. 6. Микросенсор в испытательном корпусе

Затем на сформированную поверхность планарной стороны пластины вновь осаждается нитрид кремния толщиной до 0.2 мкм. Таким образом, проводящий слой "запакован" в непроницаемую оболочку нитрида кремния и не подвержен в дальнейшем химическому воздействию окружающей среды и технологических реагентов.

На заключительном этапе производится микромеханическая обработка пластины (рис. 4). С использованием ранее сформированных меток проводится процедура фотолитографии с целью определения топологии поверхности пластины в целом, в частности формируются скрайберные дорожки и маски травления мембран. В области мембран на непланарной стороне пластины производится травление кремния до толщины 10–20 мкм, достаточной для обеспечения механической прочности для выполнения последующих операций.

На этом же этапе вакуумным напылением алюминия формируются площадки для последующего включения микросенсора во внешнюю электрическую схему. Для разделения пластины на отдельные кристаллы, на каждом из которых формируется отдельный микросенсор, производится скрайбирование пластины с помощью алмазной фрезы.

Завершающей операцией является полное удаление монокристаллического кремния в области мембраны с целью снижения "паразитного" влияния подложки и снятия механических напряже-

ний, которые обусловлены различием температур формирования пленок различных материалов. Таким образом, несущим элементом сформированной мембраны будет являться нитрид и окись кремния. В результате общая толщина мембраны с расположенной внутри электрической схемой составила менее 2 мкм.

На рис. 6 представлен микросенсор в испытательном корпусе. Как видно из рисунка, мембрана настолько тонкая, что хорошо видно золоченое покрытие под ней. Согласно измерениям, типовое сопротивление сформированных резисторов при нормальных климатических условиях (ГОСТ 15150-69) составило: для нагревателя 498 Ом, для первого термочувствительного резистора 4469 Ом (рис. 5, счет слева направо), для второго, третьего и четвертого 3399, 3383 и 4452 Ом соответственно. Температурный коэффициент сопротивлений (ТКС) резисторов α составил $1.3 \cdot 10^{-4} \text{ (K}^{-1}\text{)}$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основными результатами выполненной работы являются аналитическая модель калориметрического сенсора потока и опытный образец микросенсора для датчика массового расхода воздуха.

Разработанная аналитическая модель сенсора пригодна для проведения инженерных расчетов. Конструкция и технология изготовления микро-

сенсора обеспечивает возможность массового производства, проведения всех последующих операций сборки в состав устройства и надежной эксплуатации.

Полученные результаты важны для разработки, производства и оптимизации микросенсоров потока теплового типа и позволяют самостоятельно, используя производственные мощности НПО Автоматики имени акад. Н.А. Семихатова, производить промышленное изготовление подобных сенсоров. Следующим этапом исследований будет разработка и создание датчика массового расхода воздуха для автомобильной промышленности на основе представленного в настоящей работе микросенсора потока теплового типа. Подробная информация о выполненной научно-исследовательской работе содержится в отчете [38].

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг., Государственный контракт № П 360.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Beeby S., Ensell G., Kraft M., White N. MEMS Mechanical Sensors. Microelectromechanical systems series Artech House, Inc., 2004.
2. Encyclopedia of micro- and nano-fluidics / Ed. Dongqing Li. Springer, NY., 2008.
3. Elwenspoek M.C. Thermal flow micro sensors // Proceedings of the 1999 International Semiconductor Conference (CAS '99), 05-09 Oct. 1999, Sinaia, Romania. P. 423–435.
4. Micromachined thermal mass flow sensors and insertion type flow meters and manufacture methods. US Patent 7536908, 05/26/2009.
5. Fleming W.J. Overview of automotive sensors // IEEE Sensors Journal. 2001. V. 1, N 4. P. 296–308.
6. Marek J., Illing M. Microsystems for the automotive industry // Proc. International Electron Devices Meeting, San Francisco, CA, 2000.
7. URL: (<http://www.bosch.com>).
8. Shin W.C., Besser R.S. A micromachined thin-film gas flow sensor for microchemical reactors // J. Micromech. Microeng. 2008. V. 16. P. 731–741.
9. Scholer L., Lange B., Seibel K., et al. Monolithically integrated micro flow sensor for lab-on-chip applications // Microelectron. Eng. 2005. N 78-79. P. 164–170.
10. Oberg P.A., Togawa T., Spelman F.A. Sensors in medicine and health care. Series: Sensors Applications, V. 3., Wiley-VCH, 2004. 420 p.
11. Domínguez M., Jiménez V., Ricart J., et al. A hot film anemometer for the Martian atmosphere // Planetary and Space Science. 2008. V. 56, N 8. P. 1169–1179.
12. Kang J., et al. Comfort sensing system for indoor environment // Proc. Transducers, Chicago, IL, 1997. P. 311–314.
13. Van den Berg A., Lammerink T.S.J. Micro total analysis systems: microfluidic aspects, integration concept and applications // Microsystem Technology in Chemistry and Life Science. Springer-Verlag, Berlin, 1998. V. 194. P. 21–49.
14. Ashauer M., Glosch H., Hedrich F., et al. Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles // Sensors and Actuators. 1999. V. 73, P. 7–13.
15. Rodrigues R.J., Furlan R. Design of microsensor for gases and liquids flow measurements // Microelectronics Journal. 2003. V. 34. P. 709–711.
16. De Bree H.E., Jansen H.V., Lammerink T.S.J., et al. Bidirectional fast flow sensor with a large dynamic range // J. Micromech. Microeng. 1999. V. 9. P. 186–189.
17. Ahrens R., Schlote-Holubek K. A micro flow sensor from a polymer for gases and liquids // J. Micromech. Microeng. 2009. V. 19. 074006.
18. Glaninger A., Jachimowicz A., Kohl F., et al. Wide range semiconductor flow sensors // Sensors and Actuators 2000. V. 85. P. 139–146.
19. Sabate N., Santander J., Fonseca L., Gracia I., Cane C. Multi-range silicon micromachined flow sensor // Sensors Actuators. 2004. V. A110. P. 282–288.
20. Kaltsas G., Petropoulos A., Tsougeni K., et al. A novel microfabrication technology on organic substrates — application to a thermal flow sensor // J. Phys.: Conf. Ser. 2007. V. 92. 012046.
21. Tan Z., Shikida M., Hirota M., Sato K., Iwasaki T., Iriye Y. Experimental and theoretical study of an on-wall in-tube flexible thermal sensor // J. Micromech. Microeng. 2007. V. 17. P. 679–686.
22. Kim T.H., Kim D.-K., Kim S.J. Study of the sensitivity of a thermal flow sensor // Int. J. Heat Mass Trans. 2009. V. 52, N 7-8. P. 2140–2144.
23. Roh S.-Ch., Choi Y.-M., Kim S.-Y. Sensitivity enhancement of a silicon micro-machined thermal flow sensor // Sensors and Actuators A. 2006. V. 128. P. 1–6.
24. Nassiopoulou A.G. Porous silicon for sensor application // Nanostructured and Advanced Materials. 2005 / Vaseashta A. (ed.). P. 189–204.
25. Kamins T. Polycrystalline silicon for integrated circuits and displays. Kluwer Academic Publishers, Norwell, MA, USA, 1998. 400 p.
26. Pagonis D.N., Kaltsas G., Nassiopoulou A.G. Fabrication and testing of an integrated thermal flow sensor employing thermal isolation by a porous silicon membrane over an air cavity // J. Micromech. Microeng. 2004. V. 14. P. 793–797.
27. Sazhin O. Gas flow through a slit into a vacuum in a wide range of rarefactions // ЖЭТФ. 2008. Т. 134, № 1. С. 196–204.
28. Sazhin O. Rarefied gas flow through a channel of finite length into a vacuum // ЖЭТФ. 2009. Т. 136, № 4. С. 811–819. (Поправка 138(6), 1193 (2010)).
29. Varoutis S., Valougeorgis D., Sazhin O., Sharipov F. Rarefied gas flow through short tubes into vacuum // J. Vac. Sci. Technol. A. 2008. V. 26, N 2. P. 228–238.
30. Sazhin O.V., Borisov S.F., Sharipov F. Accommodation coefficient of tangential momentum on atomically clean and contaminated surfaces // J. Vac. Sci. Technol. A. 2001. V. 19. P. 2499–2503.
31. Сажин О.В., Борисов С.Ф. Влияние состояния поверхности на формирование потока разреженного

- газа в канале // ИФЖ. 2001. Т. 74, № 5. С. 131–135.
32. Sazhin O. Impact of the gas-surface scattering and gas molecule-molecule interaction on the mass flow rate of the rarefied gas through a short channel into a vacuum // J. Vac. Sci. Technol. A. 2010. V. 28. P. 1393–1398.
33. Sazhin O., Kulev A., Borisov S., Gimelshein S. Numerical analysis of gas-surface scattering effect on thermal transpiration in the free molecular regime // Vacuum. 2008. V. 82, N 1. P. 20–29.
34. Сажин О.В., Кулев А.Н., Борисов С.Ф. Роль структуры поверхности в формировании потока ультра-разреженного газа в канале // Теплофизика и аэромеханика. 2001. Т. 8, № 3. С. 391–399.
35. Lammermk T.S.J., Tas N.R., Elwenspoek M., Fluitman J.H.J. Micro-liquid flow sensor // Sensors and Actuators A. 1993. V. 37-38. P. 45–50.
36. Incropera F.P., DeWitt D.P., Bergman T.L., Lavin A.S. Fundamentals of heat and mass transfer, 6th edition. Wiley, 2007. 1024 p. (Chapter 7: External Flow).
37. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел (пер. с англ.). М.: Наука, 1964. 488 с.
38. Сажин О.В., Сычугов Е.М., Первушин Ю.В. и др. Научно-технический отчет о выполнении II этапа Государственного контракта № ПЗ60 "Изучение

тепломассопереноса в микро-и наноэлектромеханических системах с целью разработки и создания недорогостоящих датчиков массового расхода жидкости и газа". Уральский госуниверситет, 2010. 177 с.

**Уральский государственный университет
им. А.М. Горького, г. Екатеринбург (Сажин О.В.)**

**НПО Автоматики им. акад. Н.А. Семихатова,
г. Екатеринбург (Первушин Ю.В.)**

Контакты: Сажин Олег Владимирович,
oleg.sazhin@uralmail.com

Материал поступил в редакцию 6.05.2011.

FLOW MICRO SENSOR OF THERMAL TYPE FOR AIR MASS FLOW METER

O. V. Sazhin¹, Yu. V. Pervushin²

¹Ural State University, Ekaterinburg

²Scientific and Production Association of Automatics
named after academician N.A. Semikhatov, Ekaterinburg

The analytical model of the thermal type flow sensor is developed. Results of model application are used for the manufacture of the flow micro sensor of thermal type with optimum functional characteristics. The manufacturing technology of the micro sensor is described. The prototype of the micro sensor for air mass flow meter is made. The main characteristics of this micro sensor are presented.

Keywords: thermal flow sensor, mass flow rate, heat mass transfer, mass flow meter, MEMS