

Оптимизация конструкции 3х осевого терморезистивного акселерометра для улучшения показателей на широком отрезке измеряемых значений

Оводов А.И., магистрант Института НМСТ,
Демин Г.Д., К.ф.-м.н., начальник НИЛ ИИИ (ЦКП "МСТ и ЭКБ" МИЭТ).

Симонов Б.М. к.т.н, доцент Института НМСТ
Национальный исследовательский университет «МИЭТ»,
г. Москва, Россия,

E-mail: a@ovdv.ru, serborsel@mail.ru, gddemin@gmail.com

Optimized Design of the MEMS-based Three-Axis Thermal Accelerometer for Its Better Performance In a Wide Measurement Range

Ovodov A.I. graduate student of Institute of Nano and Microsystem Technology (NMST)

Demin G.D. MEMSEC R&D Center Moscow Institute of Physics and Technology (State University) National Research University of Electronic Technology (MIET)

Simonov B.M. Candidate of Eng. Sc. Associate Professor of Institute of Nano and Microsystem Technology (NMST)
National Research University of Electronic Technology,
Moscow, Russia.

Аннотация

В работе проводится моделирование новой конструкции трёхосевого теплового МЭМС акселерометра с набором трёх чувствительных терморезистивных (термоэлектрических) элементов в направлении каждой оси, расположенных на тонкопленочной SiO₂ мембране. Показано, что разница температур на симметричных терморезисторах линейно увеличивается с вариацией ускорения в диапазоне от 1g до 10g, причём чувствительность симметрично расположенных от нагревателя терморезистивных элементов плавно уменьшается с удалением их расположения от центрального нагревателя. Также было получено, что для достижения максимума тепловой чувствительности по ускорению в латеральном направлении следует располагать терморезисторы по соответствующим осям асимметрично, причём с увеличением ускорения данная асимметрия расположения терморезисторов возрастает. Получен-

ные результаты могут служить для оптимизации конструкции МЭМС акселерометров, работающих на тепловом эффекте.

Abstract

A new design of the three-axis thermal accelerometer with a set of temperature sensing elements (thermistors) in the direction of each axis located on a thin-film SiO₂ membrane is proposed. Finite-element study of the accelerometer with the selected design shows that the temperature difference between the symmetrically placed thermistors linearly increases with acceleration in the range from 1g to 10g. At the same time, with increasing their distance from the central heater the sensitivity of thermistors reaches a maximum value, and then gradually drops to zero near the edge of the membrane. It was also found that in order to achieve the maximum thermal sensitivity when detecting acceleration in the lateral direction, thermistors should be asymmetrically placed relative to the heater along the corresponding axis, and the asymmetry of their optimal location on the membrane increases with acceleration. The results obtained can be used to improve the design of MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) accelerometers based on thermal effects.

Ключевые слова: Трехосевой термоакселерометр, МЭМС, терморезистивный сенсор, газ, кремниевые технологии.

Keywords: three-axis thermal accelerometer, MEMS, thermoresistive sensors, fluid, silicon technology

1. Введение.

В настоящее время все более возрастает роль сенсорики в развитии индустрии мобильных телефонов и гаджетов, современных устройств бытовой электроники, биосистем контроля жизнедеятельности человека (температура тела, пульс, давление), а также умных электронных систем для автомобилей, космических спутников, беспилотных летательных аппаратов [1]. Ведущее место в этом направлении занимают малогабаритные МЭМС (микроэлектромеханические системы) - акселерометры, позволяющие сообщать о гравитационном ускорении, динамическом ударе или вибрации, что незаменимо для предотвращения падения портативных электронных устройств (жестких дисков, handbooks), мониторинга разрушения жилых зданий и отказа работы оборудования, повышения безопасности человека при дорожно-транспортных происше-

ствиях (системы АБС) и контроля за углом поворота и ориентацией в цифровых камерах, дронах, планшетах.

Существуют различные типы акселерометров, конструкция которых подразумевает использование proof mass для детектирования ускорения – автоэлектронные [2], пьезорезистивные [3], емкостные [4] акселерометры. Основным их недостатком является малая устойчивость к ударам, в частности, при работе в экстремальных условиях, что обусловлено механической подвижностью proof mass, приводящей к разрушению хрупких деталей конструкции. В отличие от указанных типов акселерометров, принцип действия тепловых МЭМС-акселерометров основан на смещении теплового облака в пределах полости с газом под действием ускорения (рис. 1), что не требует использования подвижных механических объектов.

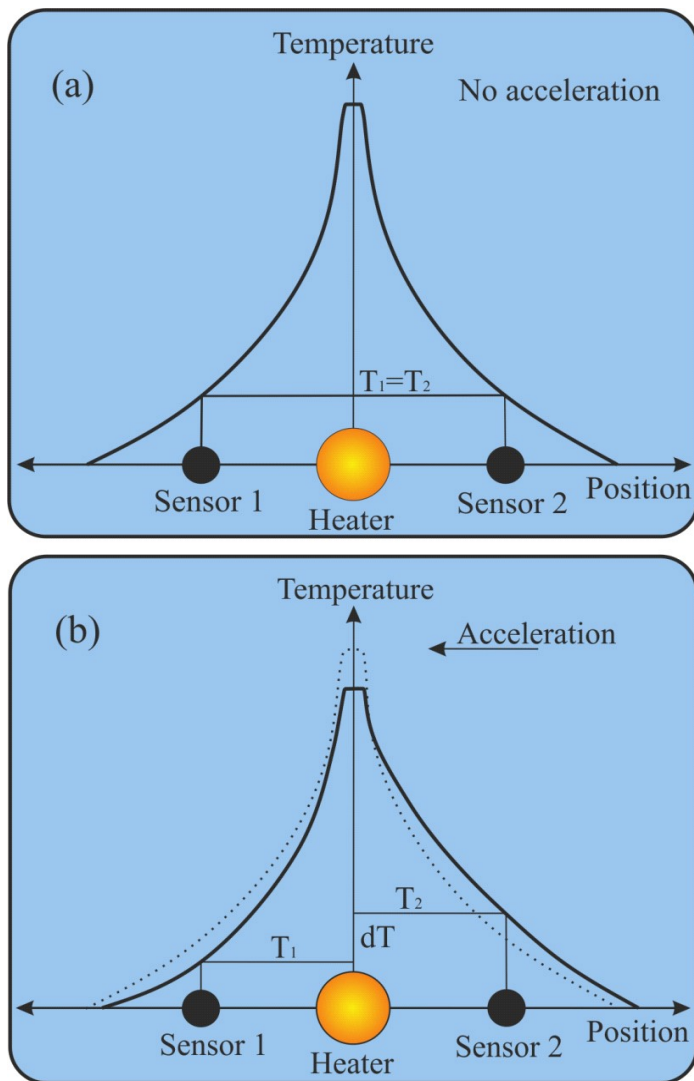


Рисунок.1. Принцип действия теплового акселерометра

Снос тепла от нагревателя приводит к различию температуры чувствительных элементов, расположенных по обе стороны от нагревателя

вдоль заданного направления ускорения, что приводит к возникновению ненулевого сигнала за счёт терморезистивного [5] или термоэлектрического эффекта [6]. Для детектирования двух проекций ускорения (OX, OY) в плоскости, как правило, располагают симметричные чувствительные элементы по соответствующим осям [7,8]. Ранее было проведено большое количество работ по оптимизации конструкции двухосного теплового акселерометра [9,10], главным образом направленные на повышение чувствительности и расширение частотного диапазона работы сенсора, которые являются взаимодополняемыми задачами.

Данные задачи могут быть достигнуты подбором газов, выбором оптимальной формы нагревателя, параметров проводящей подложки и т.д. Однако, несмотря на заметный прогресс в этой области, до сих пор нет однозначного ответа на принцип построения конструкции трехосного акселерометра, где снос тепла также происходит в перпендикулярном к плоскости тонкопленочной мембраны с нагревающим элементом направлении. Расположение терморезисторов/термопар вдоль перпендикулярной оси усложняет технологический процесс создания акселерометра, а также его массу и компактность.

Ранее была предложена идея расположения всех чувствительных элементов в плоскости разогревающего резистора, что может быть реализовано посредством создания асимметричной по оси OZ полости, что делает возможным латеральное изменение теплового облака в зависимости от направления перпендикулярного ускорения и детектирование данной компоненты [11-14]. Однако чувствительность в этом направлении на порядки меньше сигнала в латеральном направлении [15], а добавление латеральных проекций ускорения в тепловом акселерометре приводит к cross-axis sensitivity и невозможности однозначно определить соответствие изменения температуры и относящейся к нему проекции ускорения [16]. В связи с указанными причинами поиск оптимального решения в построении конструкции трехосного акселерометра является актуальной и востребованной задачей на сегодняшний день.

2. Теория и конструкция сенсора.

Для оптимизации параметров работы трехосного теплового акселерометра был использован программный пакет Comsol MultiPhysics версии 5.4 [17], в который были интегрированы физико-математическая модель теплового переноса в присутствии ламинарного потока и предложенный дизайн чувствительных элементов, работающих на терморезистивном эффекте

А. Теория.

Для расчёта изменения в распределении температуры в тепловом акселерометре используется следующая система уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \\ \rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{F}_v \\ \rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla T \right) = k \nabla^2 T \end{cases}, \quad (1)$$

где \mathbf{u} вектор скорости потока, p давление, T температура среды, $\boldsymbol{\tau} = \mu(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - 2\mu(\nabla \cdot \mathbf{u})\mathbf{I} / 3$ тензор

язких напряжений, \mathbf{I} тождественная матрица, $\mathbf{F}_v = -\rho \mathbf{a}$ вектор силы, $\mathbf{a} = \sum_{i=x,y,z} a_i \mathbf{e}_i$ вектор ускорения, a_i и \mathbf{e}_i ускорение и единичный вектор

i -оси, ρ, μ, k, C_p плотность, динамическая вязкость, теплопроводность и удельная теплоемкость жидкости, соответственно. Для окончательного описания определяющих уравнений, предсказывающих распределение температуры в тепловом акселерометре, далее мы используем закон идеального газа для плотности жидкости ρ , который действует в случае сжимаемого потока (когда число Маха меньше 0.3):

$$\rho = p M_f / RT, \quad (2)$$

где M_f молярная масса газа, R универсальная газовая постоянная. В качестве граничных условий для потока жидкости мы предполагаем, что нет условия скольжения ($\mathbf{u} = 0$) на границе газа/твердой поверхности.

Данная система уравнений интегрируется в Comsol MultiPhysics и численно реализуется посредством связи трех различных физических модулей, включающих в себя Джоулев разогрев (module «Electric current»), диссипацию тепла (module «Heat transfer») и эффект ламинарного движения газа под действием ускорения (module «Laminar flow»). Взаимодействие этих модулей представлено на Рис.2 .

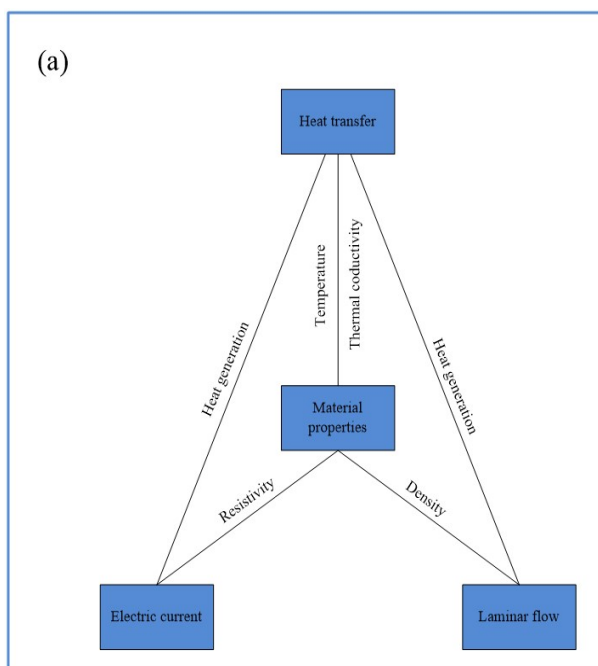


Рисунок 2. Взаимодействие модулей в среде физического моделирования Comsol Multiphysics

Модуль «Electric current» предназначен для определения мощности, подаваемой на нагреватель, на основе чего модуль «Heat transfer» определяет количество выделяемого тепла, передаваемого к газовой среде. В свою очередь, модуль «Laminar flow» определяет снос тепла, что по формуле (1) связано с изменением плотности газа при ненулевом ускорении.

В. Конструкция предлагаемого теплового акселерометра.

В настоящей работе предлагается конструкция теплового акселерометра, представленная на рис. 3.

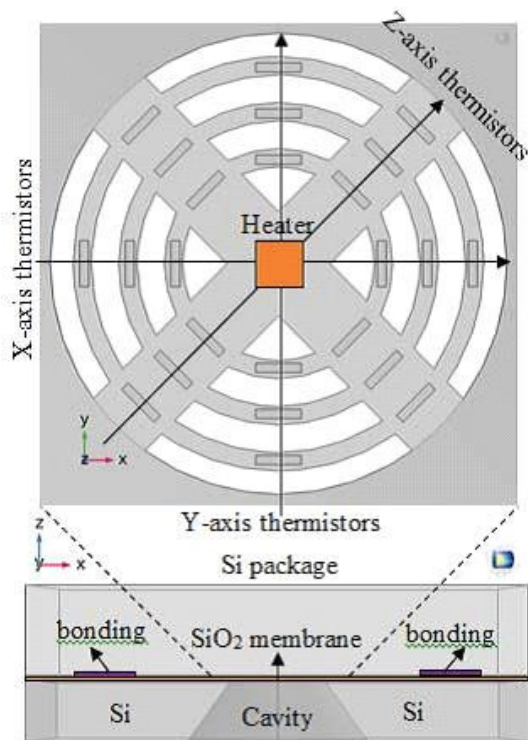


Рисунок 3. Предполагаемая конструкция 3х осевого терморезистивного акселерометра.

Нагревающий центральный резистор и набор чувствительных элементов по трем направлениям детектирования расположены на тонкопленочной диэлектрической мембране SiO₂ в полости кремниевой подложки. Расположение чувствительных терморезисторов на разном удалении от нагревателя позволяет повысить общую чувствительность теплового акселерометра и выбрать их оптимальное расположение в процессе моделирования. В качестве материала терморезисторов выбрана Pt с высоким коэффициентом теплового сопротивления, равным в наших измерениях $3 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ [18]. Также, как альтернатива терморезисторам, для повышения точности измерений в качестве чувствитель-

ных элементов на их месте могут быть использованы термопары Al/Si* [19].

3. Результаты моделирования и обсуждение.

Рассмотрим случай, когда ускорение вдоль ось OY равна 5g, вдоль оси OZ - g, и ускорение X а вдоль оси OX изменяется в диапазоне от 1 g до 10 g. На рисунке 4 показан температурный профиль вдоль сечение XOZ теплового акселерометра, нагревательный резистор которого питается мощностью 3,1 мВт во время действия ускорения составляющая a_x 5g. Из рисунка следует, что при этой мощности максимум температура T на нагревателе изменяется на 120 K от начальной комнатной температуры T0 равной 293,15 K. Также видны шаги на температурном профиле, соответствующем расположению термисторов R_{-x1}, R_{-x2}, R_{-x3} слева и R_{+x1}, R_{+x2}, R_{+x3} справа по отношению к положению нагревателя по оси OX.

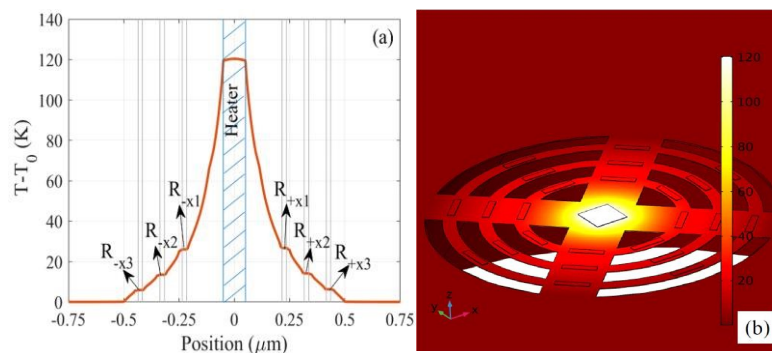


Рисунок. 4 (а) Температурный профиль $T - T_0$ по XOZ сечению терморезистивного акселерометра и (b) Температурное распределение вдоль плоскости мембраны в случае мощности на нагревателе 3.1 мВт, $a_z = g$, $a_y = 5g$, $a_x = 5g$.

На рисунке 5 (а) показано изменение разницы температур ΔT_{xy} вдоль оси OX, при изменении ускорения a_x от 1 g до 10 g и с в случае, когда $a_x = 0g$. С увеличением ускорения, температура термисторов на правой стороне R_{+x1}, R_{+x2}, R_{+x3} возрастает, а температура термисторов на левой стороне R_{-x1}, R_{-x2}, R_{-x3} падает, что обусловлено к смещением температурного фронта в направлении оси OX под действием ускорения. В этом случае максимальное изменение температуры наблюдается

в положении термисторов, соответствующих до расстояния от нагревателя, равного приблизительно 0,27 мкм.

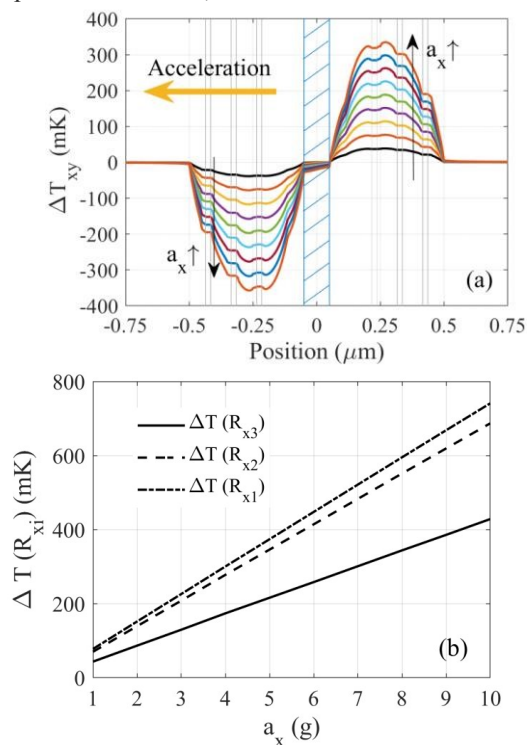


Рисунок. 5 (а) Температурные изменения $\Delta T_{xy} = \Delta T_{xy}(a_x) - \Delta T_{xy}(0g)$ вдоль оси Ox , при варьировании от ускорения a_x от 1g до 10g. (б) Зависимость разницы температур $\Delta T(R_{xi}) = \Delta T(R_{+xi}) - \Delta T(R_{-xi})$ между симметричными термисторами от ускорения a_x , где $i=1,2,3$, $a_z=g$, $a_y=5g$, мощность на нагревателе равна 3.1 мВт.

В то же время ясно, что изменение температуры $\Delta T(R_z) = \Delta T(R_{+z}) - \Delta T(R_{-z})$, где $i = 1,2,3$, представляет собой линейную функцию и увеличивается почти в 8 раз с увеличением a_x от 1 g до 10 g, что легко увидеть из рисунка 5 (б). В свою очередь, для случая изменения ускорения Z в аналогичном диапазоне, такой эффект увеличения разницы температур не так заметно и представлено на рисунке 6.

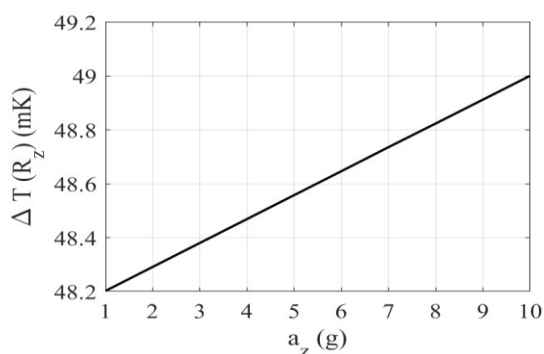


Рисунок 6. Зависимость разницы температур $\Delta T(R_z) = \Delta T(R_{+z}) - \Delta T(R_{-z})$ на термисторах, от ускорения вдоль оси OZ, при $a_x=0g$, $a_y=0g$, и мощности на нагревателе 3.1 мВт.

4. Выводы.

Таким образом, в работе представлена численная модель трехосного теплового акселерометра, и показаны возможные пути его оптимизации для детектирования ускорения в выбранных направлениях посредством использования набора удаленных на разное расстояние от нагревателя чувствительных элементов, что позволяет определить их оптимальное расположение. Асимметричное расположение терморезисторов служит к повышению чувствительности в области детектирования ускорений от 1g до 10g соответственно. Дальнейшая оптимизация конструкции может быть связана с модификацией геометрии мембраны и полости в пределах имеющихся технологических возможностей для успешного детектирования в широком диапазоне ускорений.

5. Благодарность.

Работы выполнялись на оборудовании МИЭТ. Центр основных услуг «MEMSEC» и при поддержке Министерство образования и науки РФ (контракт №14.581.21.0021, RFMEFI58117X0021).

Используемые источники:

1. A. Kumar, A.O. Salau, S. Gupta and K. Paliwal, "Recent trends in IoT and its requisition with IoT built eningeering: a review," Advances in Signal Processing and Communication, in Select Proceedings of ICSC 2018,

vol. 526, B. Rawat, A. Trivedi, S. Manhas and V. Karwal, Eds. Springer Singapore, pp. 15-25, 2018.

2. H. Liu, K. Wei, Z. Li, W. Huang, Y. Xu and W. Cui, "A novel, hybrid-integrated, high-precision, vacuum microelectronic accelerometer with nano-field emission tips," *Micromachines*, vol. 9, p. 481, 2018.

3. J.P. Lynch, A. Partidge, K. H. Law, T. W. Kenny, A.S. Kiremidjian and E. Carryer, "Design of piezoresistive MEMS-based accelerometer for integration with wireless sensing unit for structural monitoring," *J. Aerosp. Eng.*, vol. 16, pp. 108-114, 2003.

4. A. Aydemir, Y. Terzioglu and T. Akin, "A new design and a fabrication approach to realize a high performance three axes capacitive MEMS accelerometer," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 244, pp. 324-333, 2016.

5. T. Dinh, H.-P. Phan, A. Qamar, P. Woodfield, N.-T. Nguyen and D.V. Dao, "Thermoresistive effect for advanced thermal sensors: fundamentals, design considerations, and applications," *J. Microelectromech. Syst.*, vol. 26(5), pp. 966-986, 2017.

6. C.S. Silva, R.A. Dias, J.C. Viana, A.J. Pontes and L.A. Rocha, "Static and dynamic modelling of a 3-axis thermal accelerometer," *Proc. Eng.*, vol. 47, pp. 973-976, 2012.

7. X.B. Luo, Y.J. Yang, F. Zheng and Z.Y. Guo, "An optimized micromachined convective accelerometer with no proof mass," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 11, pp. 504-508, 2001.

8. A. Garraud, A. Giani, P. Combette, B. Charlot and M. Richard, "A dual axis CMOS micromachined convective thermal accelerometer," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 170(1-2), pp. 44-50, 2011.

9. M. Han, J.K. Kim, S.H. Kong, S.-W. Kang and D. Jung, "Effect of heater geometry and cavity volume on the sensitivity of a thermal convection-based tilt sensor," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 57, p. 06HJ01, 2018.

10. K.E. Kaplan, M.M. Winterkorn, C.L.M. Everhart, D.D. Shin, G.J.O' Brien, F.B. Prinz and T.W. Kenny, "Active temperature compensation of thermal accelerometer for improved stability," *Proceedings to the 2018 IEEE International Symposium of Inertial Sensors and Systems (INERTIAL)*, Moltrasio, Italy, March 26-29, 2018.

11. L. Jiang, Y. Cai, H. Liu and Y. Zhao, "A micromachined monolithic 3 axis accelerometer based on convection heat transfer," *Proceedings to the the 8th Annual IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems*, Suzhou, China, April 7-10, 2013.

12. *F. Maily, H.B. Nguyen, L. Latorre and P. Nouet*, "CMOS implementation of a 3-axis thermal convective accelerometer," Proceedings to the 2014 IEEE Sensors Conference, Valencia, Spain, November 2-5, 2014.
13. *R. Mukherjee, J. Basu, P. Mandal and P.K. Guha*, "A review of micromachined thermal accelerometers," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 27, p. 123002, 2017.
14. *J.K. Kim, M. Han, S.-W. Kang, S.H. Kong and D. Jung*, "Multi-axis response of a thermal convection-based accelerometer," *Micromachines*, vol. 9, p. 329, 2018.
15. *H.B. Nguyen, F Maily, L. Latorre and P. Nouet*, "A new monolithic 3 axis thermal convective accelerometer: principle, design, fabrication and characterization," *Microsyst. Technol.*, vol. 21(9), pp. 1867-1877, 2015.
16. *Y. Ogami, N. Murakita and K. Fukudome*, "Computational experiments on the step and frequency responses of a three-axis thermal accelerometer," *Sensors*, vol. 17, p. 2618, 2017.
17. COMSOL Multiphysics® v. 5.4, website, www.comsol.com, COMSOL AB, Stockholm, Sweden.
18. *N.A. Djuzhev, D.V. Novikov, G.D. Demin, A.I. Ovodov and V.T. Ryabov*, "An experimental study on MEMS-based gas flow sensor for wide range flow measurements," Proceedings to the the 2018 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS), Seoul, South Korea, March 12-14, 2018.
19. *J. Fraden*, "Velocity and acceleration," in *Handbook of Modern Sensors*, J. Fraden, Eds. Springer, Cham, pp. 379-411, 2016.