

КРИСТАЛЛ ДАТЧИКА ДАВЛЕНИЯ С ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМОЙ ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО КАСКАДА С ОТРИЦАТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ ДЛЯ ДИАПАЗОНА ДО 5 кПа

Басов М.В.

ФГУП ВНИИА им. Н.Л. Духова, Москва

Разработан и исследован высокочувствительный ($S=11,2\pm 1,8$ мВ/В/кПа с погрешностью по нелинейности $2K_{NL}=0,15\pm 0,09$ %/FS) малогабаритный ($4,00\times 4,00$ мм²) кремниевый кристалла датчика давления (ДД) с использованием новой электрической схемы для микроэлектромеханических систем (МЭМС) в виде дифференциального каскада с отрицательной обратной связью (ТДК с ООС) для измерения дифференциального диапазона до 5 кПа. Продемонстрировано преимущество по массиву выходных характеристик, доказывающих актуальность представленной разработки, относительно современных мировых разработок датчиков давления для данного диапазона давления.

Актуальность применения тензорезистивных ДД в виде МЭМС существует для множества различных направлений промышленности и исследований (атомная, нефтегазовая, медицинская, автомобильная и авиакосмическая промышленности, потребительский рынок, а также научные разработки в сферах сейсмологии, биофизики, робототехники и иных) [1]. Применимость обусловлена малыми габаритами, высоким выходным сигналом при низких показателях погрешностей и массовым производством чувствительных элементов.

Площадь кристалла является «главной ценой», определяющей как выходные характеристики датчика, так и стоимость его производства. Как известно, кристаллы ДД для низких диапазонов давления должны обеспечивать высокую пороговую чувствительность. В свою очередь чувствительность является параметром, ограниченным механической частью кристалла или мембраной. Наиболее влиятельным геометрическим размером мембраны является ее толщина, которая может быть сокращена до определенного предела [2]. Помимо проблем, связанных с неравномерностью утоненной части мембраны порядка 15 мкм и ниже при площади мембраны порядка 1...10 мм² и, как следствие, вызывающих высокий разброс по выходным характеристикам и более вероятный выход погрешностей за пределы требуемого, существуют значительные дополнительные эффекты от наличия остаточных механических напряжений (МН): влияние структур слоев диэлектриков от SiO₂ и Si₃N₄, металлизации и методов корпусирования [3]. Множество разработок рассматривают возможность увеличения МН в областях расположения тензорезисторов (ТР) за счет комбинирования концентраторов в виде жёстких центров (ЖЦ) или сложно профилированных механических структур [4-6], зачастую создаваемых с помощью

реактивно ионного плазменного травления (RIE) как с обратной, так и лицевой части элемента, применение которого является довольно дорогостоящим процессом при массовом производстве. Новым перспективным методом по увеличению чувствительности кристаллов ДД при сохранении или уменьшении его габаритных размеров является изменение электрической схемы элемента. Взамен использования классического тензорезистивного моста Уитстона может быть применена схема в виде ТДК с ООС с применением биполярного транзистора (БТ) с вертикальной структурой n-p-n-типа проводимости (V-NPN) [7-11]. Определенное расположение восьми ТР в областях сжатия или растяжения мембраны, как показано на рис. 1, в сочетании с работой БТ позволяет перераспределить потенциалы и токи в ветвях схемы таким образом, чтобы происходило более резкое изменение выходного сигнала от давления, чем на резистивном мосте при едином режиме питания для схемы. Использование ООС в электрической схеме с определенными номиналами ТР позволяют стабилизировать резкое изменение падения напряжения между базой и эмиттером БТ от температуры и, следовательно, значительно снизить температурные характеристики при существенном увеличении чувствительности (табл. 1).

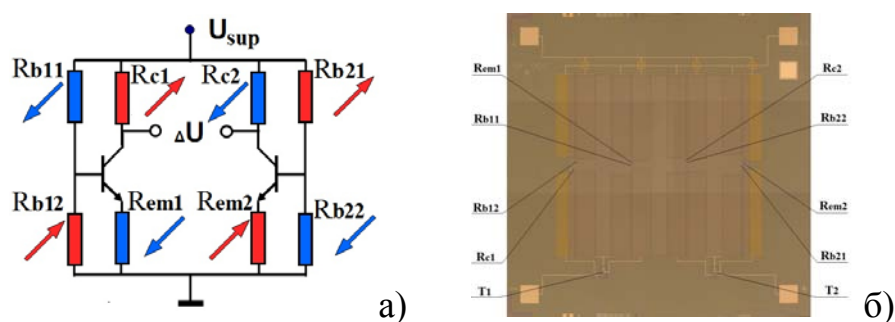


Рисунок 1. Кристалл ТДК с ООС:
а) электрическая схема, б) фото лицевой стороны

Таблица 1. Параметры электрической схемы кристалла ТДК с ООС

Элементы	Параметры	Значения
Общее	Напряжение питания схемы U_{sup} , В	5
БТ	Ток базы I_b , мкА	4,6
	Коэффициент усиления β	145
	Падение напряжения база-эмиттер ($U_b - U_{em}$), В	0,80
	Падение напряжения база-коллектор ($U_c - U_b$), В	0,80
	Потенциал на коллекторе U_c , В	2,79
ТР	$R_{b11, b21}$, кОм	4,47
	$R_{b12, B22}$, кОм	2,98
	$R_{c1, c2}$, кОм	3,33
	$R_{em1, em2}$, кОм	1,79

Мембранная структура кристаллов ТДК с ООС для диапазона до 5 кПа имеет конструкцию с тремя ЖЦ (рис. 2а; $L=4000\pm 50$ мкм, $W=10\pm 2$ мкм, $H=400\pm 5$ мкм, $A=2260\pm 15$ мкм, $D=23\pm 4$ мкм, $Z=790\pm 60$ мкм). После производства кристалл ТДК с ООС собирается в кремниевую сборочную конструкцию для снятия остаточных МН и герметичной подачи давления с одной из сторон кристалла, а затем сборка герметично помещается в коваровый корпус и разваривается на выводы (рис. 2б). Исследования выходных параметров происходит после проведения термо- и бароциклирования ДД.

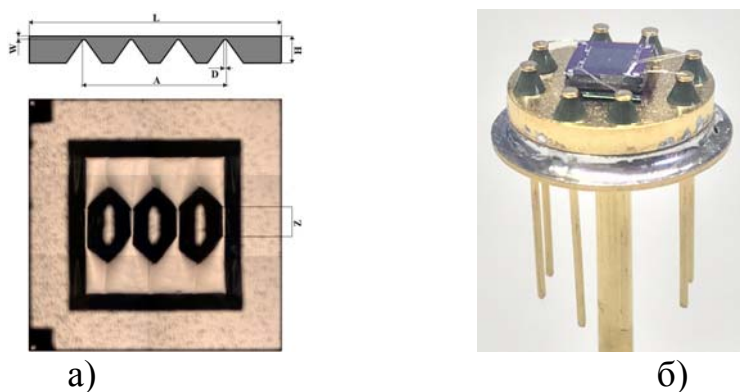


Рисунок 2. Кристалл ТДК с ООС:
а) обратная сторона, б) сборочная конструкция

В таблице 2 указаны все сравнительные характеристики для 7 актуальных на данный момент разработок относительно показаний кристалла ТДК с ООС до 5 кПа. Чувствительность кристалла ТДК с ООС в 2,2 выше относительно наиболее чувствительного аналога при условии фактического сохранения погрешности по нелинейности и снижении габаритных размеров утоненной части мембраны на 40% [12]. Разработка достигает высокую механическую прочность $P_{burst\ TDK\ с\ ООС} > 400$ кПа без использования каких-либо защитных конструкций [19], а также имеет незначительные погрешности по механическому гистерезису $H_{ТДК\ с\ ООС}=0,03\ \% FS$ и механической повторяемости $R_{ТДК\ с\ ООС}=0,08\ \% FS$. Среди параметров, которые не указаны у аналогов, стоит отметить достижения низких погрешностей по температурному гистерезису нулевого сигнала $TГН<0,08\ \% FS$ и чувствительности $TГЧ<0,24\ \% FS$, а также температурного коэффициента нулевого сигнала $ТКН<0,22\ \% FS/10\ ^\circ C$ и чувствительности $ТКЧ<2,4\ \% FS/10\ ^\circ C$ в диапазоне температур от -40 до $+60\ ^\circ C$. Разбаланс между нелинейностью при подаче давления с лицевой и обратной стороны минимален $\Delta 2K_{NL}=0,07\ \% FS$. Временная стабильность за 9 часов не более $U_{st}<0,05\ \% FS$. Шумовая составляющая выходного сигнала $U_{noise}<3$ мкВ/В, основной причиной которой является шум БТ.

Таблица 2. Сравнительный анализ кристалла датчика давления ТДК с ООС с наиболее актуальными аналогами на тензорезистивном мосте диапазона до 5 кПа (* - мат. модель)

Вид кристалла ДД для диап. до 5 кПа	ТДК с ООС	СВМР [12]	PMNBCB [16]*	FBBM [14]	FBBM [13]*	СВР [15]	Peninsula [17]	СВМ [18]
Площадь кристалла, мм ²	4,0x4,0	-	-	-	-	3,6x3,6	3,6x3,6	-
Площадь мембраны, мм ²	2,3x2,3	2,9x2,9	2,9x2,9	4,5x4,5	4,5x4,5	2,1x2,1	1,9x1,9	2,9x2,9
Толщина мембраны, мкм	10±2	12	12	30	30	10	10	20
Чувствительность S, мВ/В/кПа	11,2±1,8	5,14	6,93	4,65	5,1	4,44	3,68	1,55
Нелинейность 2K _{NL} , %FS	0,15±0,09	0,28	0,23	0,25	0,75	0,25	0,36	0,09
Гистерезис H, % FS	0,03	0,26	-	0,14	-	-	-	0,09
Повторяемость R, % FS	0,08	0,53	-	0,19	-	-	-	0,09
Нулевой сигнал U ₀ , мВ/В	< 8	1,6	-	-	-	2	0,4	3,2
Разрушение P _{burst} , кПа	> 400	-	-	-	-	62	-	-
Количество образцов	22	-	-	-	-	3	2	-

Анализ входных и выходных характеристик кристалл ТДК с ООС для ДД диапазона до 5 кПа доказал перспективность его потенциального применения в различных сферах промышленности и научных исследований.

Литература

- [1] Y. Charentenay, MEMS Pressure Sensor Market and Technologies 2018, I-Micronews. Market & Technology report. 2018, pp. 28-31.
- [2] S. Timoshenko, S. Woinowsky-Krieger, "Theory of Plates and Shells," 2nd ed., New York, USA: McGraw-Hill, 1970, pp. 156-160.
- [3] A.V. Tran, X. Zhang, B. Zhu, "Effects of temperature and residual stresses on the output characteristics of a piezoresistive pressure sensor," IEEE Access, vol. 7, pp. 27668-27676, 2019, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2901846.
- [4] T. Xu, D. Lu, L. Zhao, Z. Jiang, H. Wang, X. Guo, Z. Li, X. Zhou, Y. Zhao, "Application and Optimization of Stiffness Abruption Structures for Pressure Sensors with High Sensitivity and Anti-Overload Ability", Sensors, vol. 17, no. 9, 1965, 2017, DOI: 10.3390/s17091965.
- [5] M. Basov, D. Prigodskiy, "Investigation of High Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensors at Ultra-Low Differential Pressures," IEEE Sensors Journal, vol. 20, no. 14, pp. 7646-7652, 2020, DOI: 10.1109/JSEN.2020.2980326.

- [6] M. Basov, D. Prigodskiy, “Development of High-Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensors for -0.5...+0.5 kPa,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 30, no. 10, 105006, 2020, DOI: 10.1088/1361-6439/ab9581.
- [7] M. Basov, “Development of High-Sensitivity Pressure Sensor with On-chip Differential Transistor Amplifier,” *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 30, no. 6, 065001, 2020, DOI: 10.1088/1361-6439/ab82f1.
- [8] M. Basov, “High-sensitivity MEMS pressure sensor utilizing bipolar junction transistor with temperature compensation,” *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 303, 111705, 2020, DOI: 10.1016/j.sna.2019.111705.
- [9] M. Basov, “Ultra-High Sensitivity MEMS Pressure Sensor Utilizing Bipolar Junction Transistor for Pressures Ranging from -1 to 1 kPa,” *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 4, pp. 4357 – 4364, 2021, DOI: 10.1109/JSEN.2020.3033813.
- [10] M.V. Basov, D.M. Prigodskiy, D.A. Holodkov, “Modeling of Sensitive Element for Pressure Sensor Based on Bipolar Piezotransistor,” *Sensors and Systems*, vol. 6, pp. 17-24, 2017.
- [11] M.V. Basov, D.M. Prigodskiy, “Investigation of a Sensitive Element for the Pressure Sensor Based on a Bipolar Piezotransistor,” *Nano- and Microsystem Technology*, vol. 19, no. 11, pp. 685-693, 2017, DOI: 10.17587/nmst.19.685-693.
- [12] A. V. Tran, X. Zhang, B. Zhu, “The Development of a New Piezoresistive Pressure Sensor for Low Pressures,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6487-6496, 2018, DOI: 10.1109/TIE.2017.2784341.
- [13] C. Li, F. Cordovilla, R. Jagdheesh, J.L. Ocana, “Design and optimization of a novel structural MEMS piezoresistive pressure sensor,” *Microsyst Technol*, vol. 23, pp. 4531–4541, 2017, DOI: 10.1007/s00542-016-3187-6.
- [14] C. Li, F. Cordovilla, R. Jagdheesh, J.L. Ocana, “Design Optimization and Fabrication of a Novel Structural SOI Piezoresistive Pressure Sensor with High Accuracy,” *Sensors*, vol. 18, no. 2, 439, 2018, DOI: 10.3390/s18020439.
- [15] X. Huang, D. Zhang, “Structured diaphragm with a centre boss and four peninsulas for high sensitivity and high linearity pressure sensors,” *Micro and Nano Letters*, vol. 9, no. 7, pp. 460-463, 2014, DOI: 10.1049/mnl.2014.0154.
- [16] Tran, A.V., Zhang, X., Zhu, B., “Mechanical Structural Design of a Piezoresistive Pressure Sensor for Low-Pressure Measurement: A Computational Analysis by Increases in the Sensor Sensitivity,” *Sensors*, vol. 18, no. 7, 2023, 2018, DOI: 10.3390/s18072023.
- [17] X. Huang, D. Zhang, “High Sensitive and Linear Pressure Sensor for Ultra-low Pressure Measurement,” *Procedia Engineering*, vol. 87, pp. 1202-1205, 2014, DOI: 10.1049/mnl.2014.0154.

- [18] B. Tian, Y. Zhao, Z. Jiang, B. Hu, "The design and analysis of beam-membrane structure sensors for micro-pressure measurement," *Review of Scientific Instruments*, vol. 83, no. 4, 045003, 2012, DOI: 10.1063/1.3702809.
- [19] D.M. Prigodskiy, M.V. Basov, "Research of Pressure Sensitive Elements with Increased Strength," *Nano- and Microsystem Technology*, vol. 21, no. 6, pp. 368-376, 2019, DOI: 10.17587/nmst.21.368-376.

PRESSURE SENSOR CHIP UTILIZING ELECTRICAL
CIRCUIT OF PIEZOSENSITIVE DIFFERENTIAL AMPLIFIER
WITH NEGATIVE FEEDBACK LOOP (PDA-NFL) FOR 5 kPa

Basov M.

Dukhov Automatics Research Institute VNIIA, Moscow

High sensitive ($S=11.2\pm 1.8$ mV/V/kPa with nonlinearity error $2K_{NL}=0.15\pm 0.09$ % /FS) small-sized (4.00×4.00 mm²) silicon pressure sensor chip utilizing new electrical circuit for microelectromechanical systems (MEMS) in the form of differential amplifier with negative feedback loop (PDA-NFL) for 5 kPa differential was developed. The advantages are demonstrated in the array of output characteristics, which prove the relevance of the presented development, relative to modern developments of pressure sensors with Wheatstone bridge electrical circuit for 5 kPa range.