

## Тензомодуль датчика давления со встроенным датчиком температуры и защитой от механических перегрузок

**М.В. Басов**

ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» – Москва, Россия

Разработан и исследован малогабаритный кристалл датчика температуры в виде диода Шоттки с пониженным энергопотреблением, повышенным пробивным напряжением и высоким линейным температурным коэффициентом, расположенный в едином корпусе тензомодуля датчика давления. Представлен спектр преимуществ разработки относительно применяемого аналога датчика температуры в виде дискретных элементов для внешней схемы обработки сигнала датчика давления. Дополнительно сборочные конструкции кристалла датчика давления используют механические упоры с двух сторон для увеличения механической прочности датчиков давления для диапазонов до 25, 60 и 160 кПа, повышающих момент разрушения от 3 до 5 раз в зависимости от диапазонов.

### Pressure Sensor with Temperature Sensor and Defense for Overload Pressure

**M.V. Basov**

FSUE Dukhov Automatics Research Institute (VNIIA) – Moscow, Russia

The small-sized temperature sensor chip in a form of Schottky diode with reduced consumption, increased breakdown voltage and high linear temperature coefficient was developed. The temperature sensor chip is located in the single case of pressure sensor module. The research presents development adventures over previously used analogs of temperature sensor for external circuit of pressure sensor. Additionally, the assembly for pressure sensor chip for 25, 60 and 160 kPa ranges uses stops for both sides. It helps to increase the moment of burst pressure from 3 to 5 times relativity assembly without stops.

#### Введение

Начиная с 2014 г. во ФГУП «ВНИИА» налажено серийное производство тензомодулей датчиков давления (ТДД) ТЖИУ.408854.026 для 6 видов модификаций, отличающихся диапазоном измеряемого давления. ТДД (рис. 1) является головным элементом в составе датчика давления (ДД).

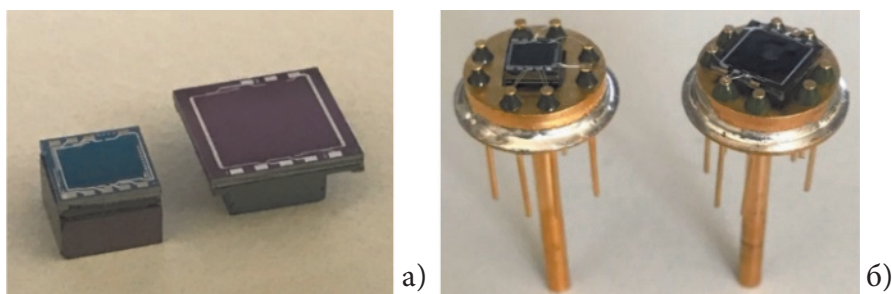
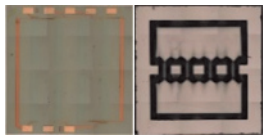
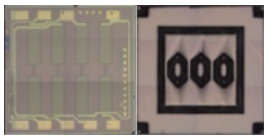
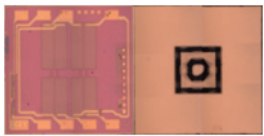


Рис. 1. Фото ТЖИУ.408854.026: а) кремниевая конструкция; б) ТДД

ТДД содержит кремниевый кристалл ДД (в составе кремниевой конструкции, рис. 1а), выполненный в виде микроэлектромеханической системы и функционирующий на базе тензорезистивного эффекта с использованием мостовой схемы. Существует 3 вида топологий лицевой части кристалла ДД, и для каждой из топологий лицевой части существует ряд конструкций мембранной структуры (табл. 1). Различные виды кристаллов ДД необходимы для балансного сочетания пороговой чувствительности (первостепенно) и основных/дополнительных погрешностей ТДД в зависимости от диапазона измеряемого давления [1–6].

Таблица 1

Виды модификаций кристаллов ДД для ТДД ТЖИУ.408854.026

ТЖИУ.408854.026	-01	-02	-03	-04	-05	-06
Кристалл ДД	ИПД52		ИПД60		ИПД91	
Вид (габаритные размеры кристалла/ мембраны, мм <sup>2</sup> )	 (6,15×6,15 / 4,20×4,20)		 (4,00×4,00 / 2,21×2,21)		 (4,00×4,00 / 1,10×1,10)	
Диапазоны P, кПа	1,6–25,0		10–60	25–160	100–600	1000–6000 1600–16000
Чувствительность S, мВ/кПа/В	> 1,500		> 0,460	> 0,216	> 0,076	> 0,003 > 0,002

### Недостатки ДД с ТЖИУ.408854.026

ТЖИУ.408854.026 для измерения дифференциального давления собираются изначально в гидроблок (ГБ) ДД и затем в полную конструкцию ДД. В ходе применения ДД выявлено два недостатка. Первый: разрушение кристалла ДД при пусконаладочных/аварийных ситуациях у потребителя. В составе ГБ применяется система сильфонов, позволяющая снизить перегрузочное давление на ТДД, но скорость срабатывания механизма довольно низкая, поэтому в первоначальный момент кристалл ДД может сломаться. Второй: для термокомпенсации погрешностей ДД внешняя схема использует данные с датчика температуры (ДТ), расположенного на существенном расстоянии от ТДД. Существует рассогласованность температурных реакций между ТДД и ДТ из-за наличия системы корпусных элементов, заполненных кремнийорганической жидкостью ПМС-20Р. Используется два варианта ДТ в виде дискретных элементов, каждый из которых имеет свои недостатки (помимо того, что элементы не являются внутренней продукцией предприятия и не могут быть расположены внутри ТДД) – это: 1) параллельное соединение стабилатора КС119 ( $U_{np} = 1,7 \dots 1,8$  В при  $I_{np} = 1$  мА) и диода КД522А, необходимого для повышения пробивного напряжения ( $U_{проб} = 30$  В) в случаях некорректных замыканий во внешней цепи. ДТ имеет высокое энергопотребление, сравнительно низкое пробивное напряжение и низкий температурный коэффициент ( $TK$ )  $TK = -3300$  ppm/°C; 2) диод Шоттки Diodes 1N5817 ( $U_{np} = 0,19$  В при  $I_{np} = 1$  мА,  $TK = -7400$  ppm/°C). ДТ имеет сравнительно низкое пробивное напряжение  $U_{проб} = 40$  В. ТЖИУ.408854.043 способен минимизировать недостатки по термокомпенсации в ДД за счет использования нового кристалла ДТ в едином корпусе ТДД. Также ТЖИУ.408854.043 для номинальных давлений до 25, 60 и 160 кПа содержит сборочную конструкцию кристаллов ДД с механическими упорами от пневмоудара.

### ДТ в составе ТДД ТЖИУ.408854.043

Разработан и реализован по планарной технологии кремниевый кристалл ДТ в виде диода Шоттки (ПДШ) (рис. 2).

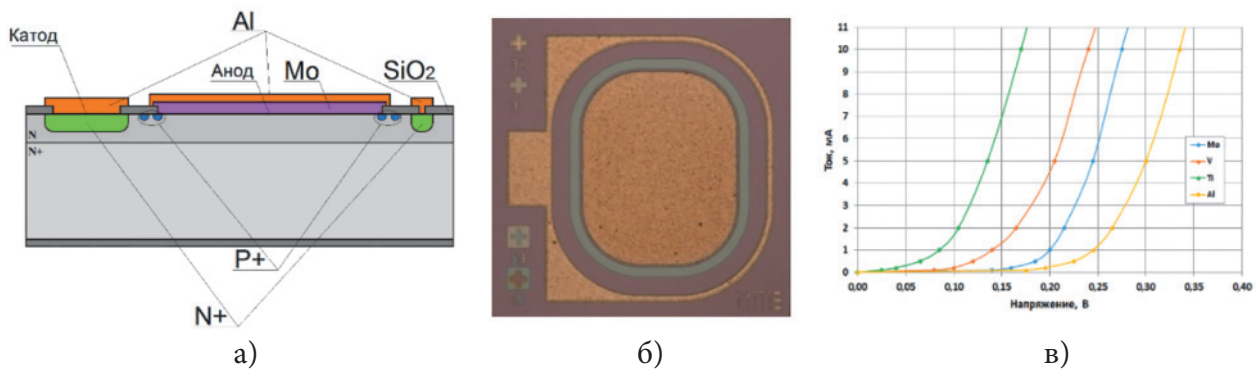


Рис. 2. Кристалл ПДШ: а) боковой разрез; б) фотография образца; в) график для прямой ветви ВАХ

Преимущества кристалла ПДШ:

- 1) малые габариты  $0,8 \times 0,8 \times 0,4$  мм<sup>3</sup>;
- 2) низкое энергопотребление на прямой ветви вольт-амперных характеристик (ВАХ)  $U_{пр\ ПДШ} = 0,19 \dots 0,23$  мВ при  $I_{пр} = 1$  мА;
- 3) высокое пробивное напряжение  $U_{проб\ ПДШ} > 85$  В;
- 4) высокий  $TK_{ПДШ} = -1,60 \dots -1,68$  мВ/°С ( $-7600 \dots -8000$  ppm/°С) при низкой погрешности  $dTK < 0,4\%$  для диапазона  $T = -65 \dots +85$  °С.

На лицевой стороне кристалла ПДШ, полученного на эпитаксиальной структуре кремния 15КЭФ2,2/380КЭС0,01(100), сформированы области в следующей последовательности микроциклов:

- 1) n<sup>+</sup> типа проводимости для контакта к подложке (катод,  $x_{jn^+} = 7,6$  мкм,  $W_{SiO_2n^+} = 0,48$  мкм,  $R_{Sn^+} = 1,2$  Ом/см<sup>2</sup>);
- 2) p<sup>+</sup> типа проводимости для охранных колец ( $x_{jp^+} = 1,3$  мкм,  $W_{SiO_2p^+} = 0,20$  мкм,  $R_{Sp^+} = 72$  Ом/см<sup>2</sup>);
- 3) контактные окна;
- 4) слой металла Мо для барьера Шоттки ( $W_{Mo} = 0,3$  мкм);
- 5) слой металла Al для разварки ( $W_{Al} = 0,8$  мкм).

Изначально было исследовано 4 вида слоя металлов для барьера Шоттки из Мо, Al, V и Ti. Слои V и Ti, продемонстрировав лучшие характеристики по прямой ветви ВАХ, не удалось технологически. Падение напряжения прямой ветви ВАХ на Мо ниже, чем на Al (рис. 2в). Благодаря геометрии охранных колец происходит смыкание областей пространственного заряда (ОПЗ) в момент достижения их пробоя каждого в отдельности [7–9], что повышает пробивное напряжение с 70 В до 85 В. Кристалл ПДШ был размещен в корпусе ТДД ТЖИУ.408854.043 на расстоянии менее 1 мм (рис. 3б, 3в). Из рис. 3а видно, что прежние варианты ДТ располагаются в отдалении ( $\approx 40$  мм) от ТДД. Для анализа разницы работ ДТ в виде соединения «стабистор+диод» и кристалла ПДШ между собой и относительно кристаллов ДД были рассмотрены два образца ГБ ДД. Исследования проводились для всех элементов ГБ ДД одновременно в режимах, указанных на рис. 4 (кривая 1 относится к правой оси ординат, 2 – к левой). Сопротивление схемы кристалла ДД изменяется нелинейно в рабочем диапазоне  $T = -65 \dots +85$  °С (рис. 4а). Актуально рассматривать функции всех элементов на наиболее линейной области  $T = -20 \dots +80$  °С (погрешность линейной аппроксимации до  $\sigma_T = 7$  °С). На рис. 4б показана разница измерений температур для двух видов ДТ между собой (до  $\Delta T = 12$  °С). Для наглядности симметричности реакций для всех элементов необходимо оценить скорости изменения выходных сигналов от температуры, взяв первую производную по температуре. Из рис. 4д, 4е для ДТ в виде кристалла ПДШ видно, как скорости реакций существенно приближаются к скоростям на кристалле ДД, в отличие изменений для ДТ в виде «стабистор+диод» на рис. 4в, 4г.

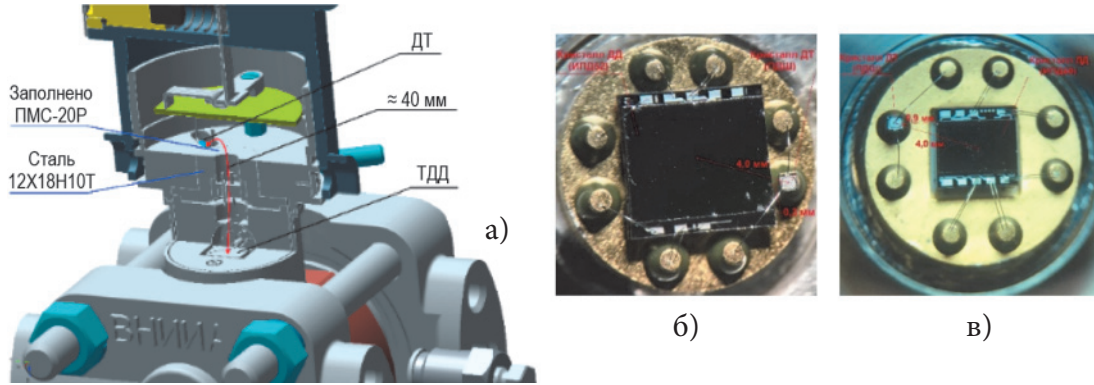


Рис. 3. Расположение ДТ: а) в ГБ ДД с ТДД ТЖИУ.408854.026; б) в ТДД ТЖИУ.408854.043 (до 25 кПа); в) в ТДД ТЖИУ.408854.043 (до 60 и 160 кПа)

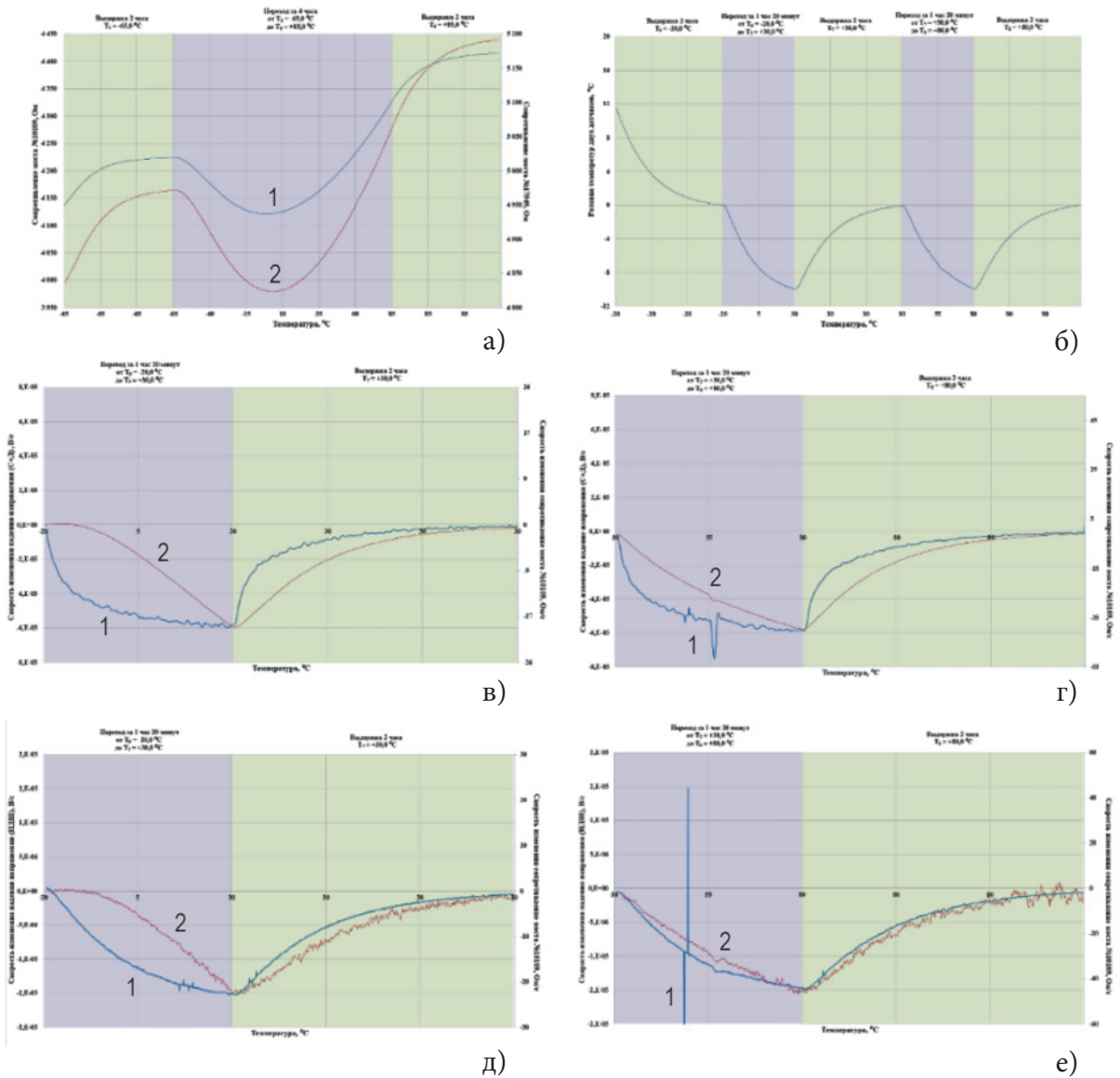


Рис. 4. Графики зависимости от температуры: сопротивления кристаллов ДД (а); разницы работ двух ДТ (б); скоростей реакции на ДТ «стабистор+диод» и на кристалле ДД (-20...+30 °C) (в) и (+30...+80 °C) (г); скоростей реакции на ДТ «кристалл ПДШ» и на кристалле ДД (-20...+30 °C) (д) и (+30...+80 °C) (е)



### Повышенная механическая прочность ТДД ТЖИУ.408854.043

Для защиты ДД при пневмоударе перегрузочным давлением ТДД ТЖИУ.408854.043 содержат сборочные конструкция кристаллов ДД с упорами для диапазонов дифференциального давления до 25, 60 и 160 кПа (рис. 5а, 5б и рис. 3б, 3в). Требуемый зазор между поверхностями мембраны и поверхностью упоров достигается за счет толщины соединительного стекла С65-1. Зазор между поверхностями мембраны и упорами позволяет беспрепятственно функционировать кристаллу ДД в пределах номинальных давлений. В табл. 2 представлены значения перегрузочного давления для ТДД с упорами (преимущества от 3 до 5 раз) и без, а также диапазон давления-посадки мембраны на упоры (рис. 5в, 5г, 5д). Исследования ТДД продемонстрировали, что процент выхода годных ТДД ТЖИУ.408854.043 фактически равен средним показаниям процента выхода годных ТДД ТЖИУ.408854.026, используемых при серийном производстве. Также проведены исследования по посадке мембраны на упор при  $T=+80\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $T=-30\text{ }^{\circ}\text{C}$  в составе ГБ ДД, заполненных кремнийорганической жидкостью, которые доказали, что момент срабатывания защиты происходит при одинаковом давлении, что и при  $T_{комн}=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  в ТДД на воздухе.

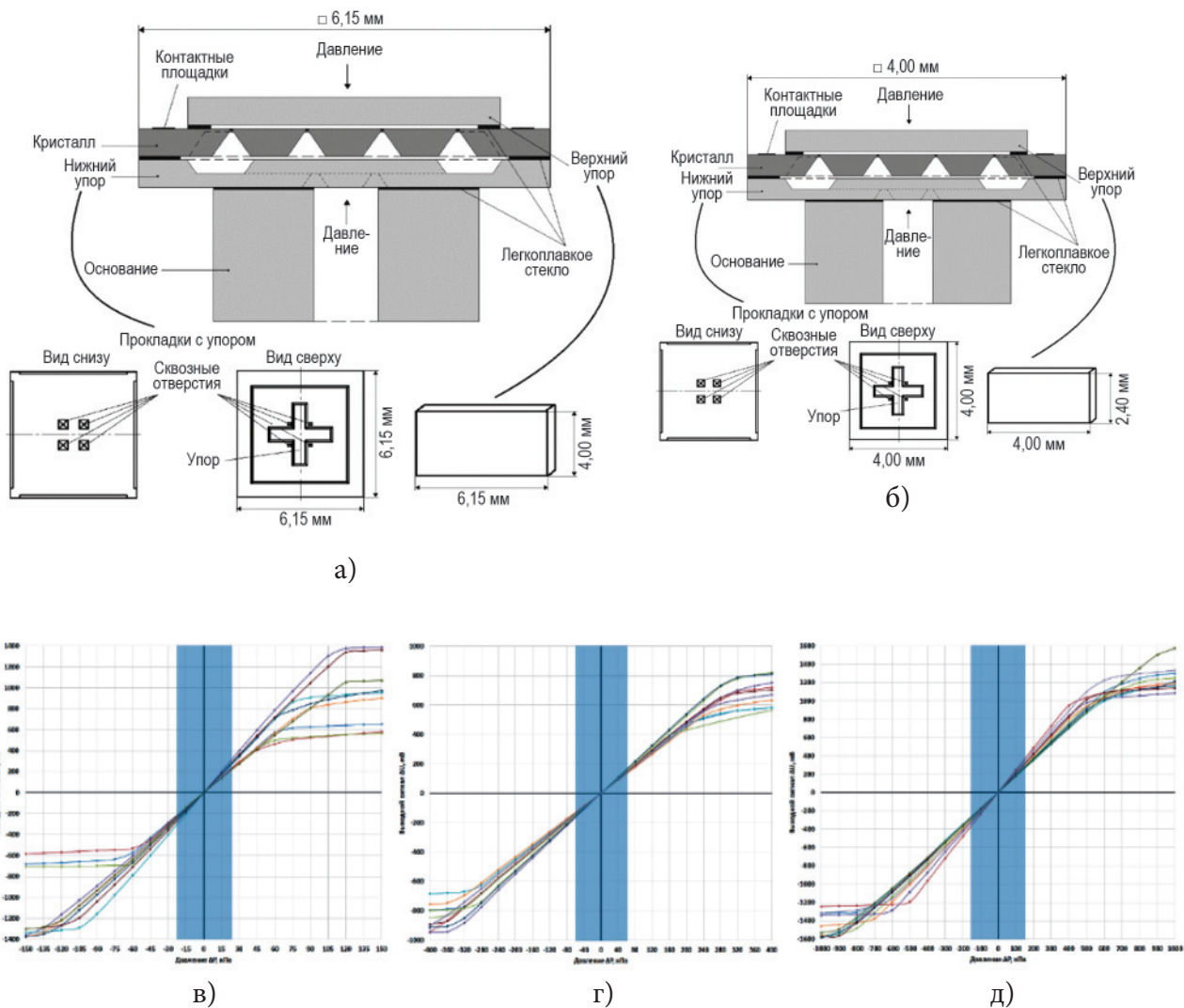


Рис. 5. ТДД ТЖИУ.408854.043. Кремниевая конструкция сборки (а–б) и изменения выходного сигнала от давления (в–г) кристалла ДД для диапазонов до: а) 25 кПа; б) 60 и 160 кПа; в) 25 кПа; г) 60; д) 160 кПа

Таблица 2

Сравнение характеристик ТДД ТЖИУ.408854.026 и -043

Диапазон давления		Предел погрешности	до 25 кПа		до 60 кПа		до 160 кПа	
ТЖИУ.408854...			026	043	026	043	026	043
Кристалл ДД			ИПД52			ИПД60		
Давление-разрушение	с обр. стор. кр., МПа	–	0,3	1,5	0,9	2,9	1,2	3,2
	с лиц. стор. кр., МПа	–	0,3	2,7	1,1	3,9	1,6	4,8
Давление-посадка	с обр. стор. кр., кПа	–	–	80 ± 40	–	240 ± 80	–	650 ± 250
	с лиц. стор. кр., кПа	–	–	100 ± 40	–	360 ± 80	–	750 ± 250
Кол-во образцов исследовано, шт.		–	> 400	178	> 1600	52	> 3400	45
Процент выхода годных, %		–	23–65	40	44–72	56	37–87	42

### Выводы

Разработка модернизированного ТДД ТЖИУ.408854.043 доказала эффективность использования кристалла ПДШ в качестве ДТ в составе ТДД вместо ранее применяемых аналогов, а также преимущества сборочной конструкции для кристаллов ДД с упорами. По «Решению № Р Т144/238» ТДД ТЖИУ.408854.043 (для диапазона давления до 25 кПа) были переданы для проведения типовых испытаний в составе ДД ТЖИУ.406322.016-20 и -21. На разработанный ТДД были получены патенты на № RU2730890С1 (внедрен в производство по акту № Т0036/056-2020), RU187531U1, RU204992U1 и RU220558U1.

### Список литературы

1. A.V. Tran, X. Zhang, B. Zhu. 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.
2. M. Basov, D. Prigodskiy. Investigation of High Sensitivity Piezoresistive Pressure Sensors at Ultra-Low Differential Pressures – IEEE Sens. J., vol. 20, No. 14, pp. 7646–7652, 2020.
3. M. Basov, High sensitive, linear and thermostable pressure sensor utilizing bipolar junction transistor for 5 kPa, Physica Scripta, 96 (2021) 065705.
4. M. Basov, “Pressure Sensor with New Electrical Circuit Utilizing Bipolar Junction Transistor”, IEEE Sensors, Sydney, Australia, 2021.
5. 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.
6. M. Basov, D. Prigodskiy. Development of high-sensitivity piezoresistive pressure sensors for –0.5...+0.5 kPa – J. Micromech. Microeng., 30, 105006, 2020.
7. B.M. Wilamowski, J.D. Irwin. The industrial Electronics Handbook. Fundamentals of industrial electronics – Taylor and Francis Group, 2011.
8. M. Basov, Schottky diode temperature sensor for pressure sensor, Sens. Actuators A Phys., 331, 112930, 2021.
9. S.C. Bera, R.V. Singh, V.K. Garg. Temperature behaviour and compensation of Schottky barrier diode – Internat. J. of Electr., 95:5, pp. 457–465, 2008.