

УДК 621.865.8

П. Г. Михайлов, А. О. Сазонов, К. А. Ожикенов

ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ДАТЧИКОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ СРЕД

P. G. Mikhaylov, A. O. Sazonov, K. A. Ozhikenov

QUESTIONS TO DESIGN SENSORS FOR THE MEASUREMENT OF HIGH-PRESSURE ENVIRONMENTS

А н н о т а ц и я. Задачи исследования физических процессов в условиях повышенных температур становятся все более актуальными по мере развития инновационных технологий, освоения новой продукции и пр. Примерами областей, где востребованы высокотемпературные датчики давления (ВДД) могут служить атомно-энергетический комплекс, ракетно-космическая техника, авиация, металлургия, химическая промышленность и т.д. При этом максимальные температуры измеряемой среды могут быть от 150 до 1500 °C кратковременного или длительного характера. Рассмотрены и проанализированы особенности работы ВДД, использующие различные физические принципы преобразования. Отмечено, что традиционные ВДД, оснащенные системой жидкостного охлаждения, имеют ограниченное применение и, в большинстве своем, не могут использоваться на ответственных объектах. Показано, что важнейшими задачами при разработке ВДД являются выбор и исследование высокотемпературных функциональных материалов, которые используются в чувствительных элементах датчиков (ЧЭД) для преобразования давления высокотемпературных газовых и жидких сред в электрическую величину. Проведен анализ существующих в настоящее время моно- и поликристаллических высокотемпературных материалов и технологий формирования на их основе ЧЭД. Отмечено, что для датчиков пульсаций давления и быстропеременных давлений перспективными материалами являются монокристаллические пьезоэлектрики: лангасит и лангатат.

A b s t r a c t. Objectives of the study of physical processes at elevated temperatures are becoming more relevant with the development of innovative technologies, development of new products and so on. Examples of areas where demand for high-temperature pressure sensors (VDD) can serve as a nuclear power complex, rocket and space technology, aviation, metallurgy, chemical industry, etc. In this case, the maximum temperature of the medium can be from 150 to 1500 °C short-term or long-term nature. Reviewed and analyzed the features of the Airborne Division, using different physical principles of transformation. Noted that traditional Airborne Division, equipped with liquid cooling system, are of limited use, and most of them can not be used to charge objects. It is shown that the primary consideration when designing VDD is high and studies of functional materials that are used in the sensor element (SPE) for converting the high-pressure gas and liquids into an electrical magnitude. The analysis of the currently existing mono- and polycrystalline high-temperature materials and technologies form the basis of their NOI. It is noted that for the sensors of pressure pulsations and rapidly pressures promising materials are single crystal piezoelectrics: langasite and langatate.

К л ю ч е в ы е с л о в а: датчик, чувствительный элемент, измерительный модуль, высокотемпературный пьезоэлектрик, лангасит, лангатат, погрешность, измерение.

K e y w o r d s: sensor, the sensing element, measuring module, high temperature, piezoelectric, langasite, langatate, error, measurement.

При создании ВДД важнейшими задачами разработки являются выбор и исследование функциональных материалов, используемых в конструкции чувствительных элементов (ЧЭ) и измерительных модулей (ИМ), которые определяют основные метрологические характеристики всего датчика [1, 2]. Некоторые конструкции высокотемпературных датчиков давления, содержащие ЧЭ с различными физическими принципами преобразования, представлены на рис. 1 [3].

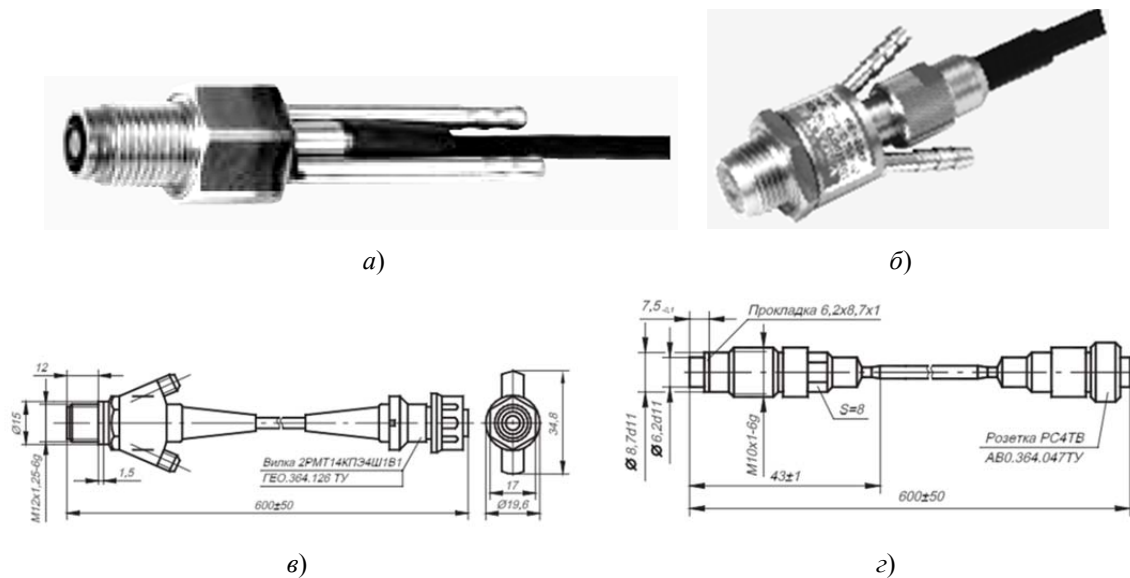


Рис. 1. Высокотемпературные датчики давления: охлаждаемые а, б – пьезорезистивные (KYOWA) с температурой до 300 °С (по воде); в – пьезоэлектрический лх 612м (НИИФИ) с температурой измерения до 1000 °С; г – неохлаждаемый пьезоэлектрический ДПС 019 с температурой измерения до 500 °С

Следует отметить, что метод охлаждения ЧЭ или ИМ водой или другими жидкостями, например, компонентами горючего, как это используется в авиации или ракетно-космической технике (РКТ), хотя и позволяет достичь очень высоких температур, но обладает рядом очевидных существенных недостатков, поэтому является неперспективным методом.

В настоящее время наиболее востребованные типы ВДД – неохлаждаемые датчики, использующие высокостабильные функциональные материалы, работоспособные при повышенных температурах:

- 1) широкозонные полупроводники;
- 2) полупроводниковые соединения;
- 3) полупроводниковые композитные структуры;
- 4) высокотемпературная поликристаллическая пьезокерамика;
- 5) высокотемпературные монокристаллические пьезоэлектрические материалы.

В первой группе единственным представителем высокотемпературных полупроводников является алмаз, у которого ширина запрещенной зоны (e_g) составляет 5,5 эВ при 300 К. В частности, радиационная стойкость алмаза к нейтронам в 100 раз выше, чем у МК, рабочая температура может достигать 1000–1200 °С, рабочее напряжение до 1 кВ, а теплопроводность выше, чем у Si, в 14 раз. К сожалению, в настоящее время пока еще не получены алмазные пластины достаточной площади, а сама технология получения даже небольших кристаллов очень сложная и дорогостоящая [4].

Ко второй группе относятся двойные и тройные полупроводниковые соединения, основные из которых карбид кремния – SiC, $e_g = 2,4$ эВ; фосфид галлия (gаp), $e_g = 2,24$ эВ. Из этой группы наиболее перспективным является карбид кремния (SiC) [5]. Значительная энергия связи между Si и C обеспечивает высокую термическую, радиационную и химическую стойкость как самому материалу, так и приборам на его основе. По карбиду кремния в настоящее время также нет отработанной технологии изготовления приборов на основе SiC, которая в большой степени отличается от кремниевой [6].

Альтернативой указанным материалам могут быть материалы третьей группы: композитные кремниевые структуры типа КнД (кремний на диэлектрике) и КнИ (кремний на изоля-

торе) [7]. Основным материал КнД, который наиболее широко используется в датчиках, в том числе и в ВДД, – кремний на сапфире (КнС). Достоинствами КнС структур являются:

- высокая температура эксплуатации, вплоть до 300–350 °С без охлаждения;
- возможность достижения при определенных уровнях легирования кремниевой пленки эффекта самокомпенсации температурных погрешностей ($TKC = TKЧ$ (температурному коэффициенту чувствительности) при питании стабилизированным током);
- стойкость к агрессивным средам и радиации;
- отсутствие $p-n$ -переходов, что обеспечивает высокое сопротивление изоляции.

ЧЭ на основе КнС по сравнению с монокремнием имеют такие преимущества, как более высокие прочность и жесткость, что позволяет работать с большими нагрузками, чем у кремниевых ЧЭ. Кроме того, сапфир сохраняет свои упругие и изолирующие свойства вплоть до температур порядка 1000 °С, что позволяет использовать ЧЭ на основе КнС вплоть до 700 °С. Технология изготовления ЧЭ и ИМ на основе КнС гораздо проще, чем кремниевая и не требует сложного технологического оборудования, поэтому выпуск ВДД может быть освоен на малых предприятиях. Кроме того, сапфир обладает исключительной химической и радиационной стойкостью, поэтому ЧЭ на основе КнС могут работать в условиях высокой радиации.

Значительный интерес для высокотемпературных ВДД представляет поликристаллический кремний (ПК), осажденный на МК и отделенный от него тонким слоем SiO_2 [8]. ПК в отличие от МК изотропен по своим физическим характеристикам. Основным преимуществом ПК по сравнению с МК является возможность формирования из него ЧЭ, не содержащих $p-n$ -переходы, что позволяет повысить рабочую температуру датчиков до 200–250 °С.

Изменяя концентрацию легирующих примесей в ПК (модификация ПК) [9], можно получить практически нулевое значение ТКС резисторов. Проводимость ПК регулируется технологическими методами путем изменения дозы легирующей примеси, а также энергией легирующих ионов и температурой подложки. Таким образом, модифицируя ПК путем легирования различными примесями и дозами, термообработкой, рекристаллизацией и т.д. можно получить области в ЧЭ, имеющие значительную разницу в электрофизических характеристиках. На одной подложке можно сформировать, например тензо- и терморезисторы, фото- и магниточувствительные сенсорные элементы, проводящие шины, контактные группы, изолирующие области [10].

К четвертой группе высокотемпературных функциональных материалов относятся некоторые типы пьезоэлектрической керамики, которая имеет высокую температуру точки Кюри [11]. Информация по электрофизическим характеристикам материалов, особенностям конструкций и работы датчиков давления с использованием высокотемпературной пьезокерамики достаточно подробно представлена в монографии В. М. Шарапова [12], поэтому в статье не рассматривается.

В настоящее время для высокотемпературных измерений особый интерес представляют материалы 5-й группы, основными представителями которой являются традиционный монокристаллический кварц, а также ряд новых синтетических монокристаллических пьезоэлектриков. Рассмотрим их более подробно [13–15].

Высокие метрологические характеристики пьезоэлектрических датчиков пульсации обеспечиваются уникальными физическими свойствами кристаллического кварца. Однако верхняя граница рабочего диапазона температур этого пьезоматериала, как известно, теоретически ограничена температурой фазового перехода $\alpha \rightarrow \beta$ -кварц, которая равна 573 °С, а кварцевые чувствительные элементы устойчиво работают при еще более низких температурах. Кроме того, чувствительность кварца сравнительно низкая, поэтому при малых измеряемых давлениях необходим высококачественный усилитель заряда с повышенным коэффициентом усиления.

Вместе с тем существует большое количество новых пьезоэлектрических кристаллов, применение которых может расширить функциональные возможности и позволить конструировать высокотемпературные пьезоэлектрические датчики пульсации с оптимальными характеристиками. В настоящее время проведены исследования целого ряда перспективных пьезокристаллов для построения чувствительных элементов высокотемпературных датчиков. К ним относятся такие кристаллы, как галлосиликат лантана (лангасит – ЛГС) $La_3Ga_5SiO_{14}$,

лантагаллиевый танталат (лангатат – ЛГТ) $\text{La}_3\text{Ga}_{5,5}\text{Ta}_{0,5}\text{O}_{14}$, фосфат галлия GaPO_4 , танталат лития LiTaO_3 и некоторые другие.

Эти монокристаллические материалы обладают высокой стабильностью электрофизических характеристик, достаточной механической прочностью, химической стойкостью и технологичностью в обработке и применении, имеют достаточно высокую температуру плавления, не изменяют электрофизические свойства, химический состав и кристаллическую структуру в рабочем диапазоне температур, в них также отсутствуют побочные сегнето-, пиро- или другие эффекты, вносящие помехи в полезный сигнал.

В настоящее время с большим успехом указанные материалы применяет австрийская фирма «ALV» в пьезоэлектрических датчиках давления на прямом пьезоэффекте. Диски из лангатата применяются в датчиках измерения давления в двигателях при температурах порядка 900 °С. Открытие этого пьезоматериала и его применение в датчиках фирма назвала «The Piezo Revolution». В России основным изготовителем новых монокристаллических пьезоматериалов и ЧЭ из них является компания «Фомос» г. Москва [16].

Наибольший интерес для построения высокотемпературных чувствительных элементов датчиков представляют кристаллы лангасита и лангатата. Рассмотрим некоторые основные свойства этих кристаллов для применения в чувствительных элементах датчиков пульсации.

Лангасит $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ (ЛГС) – синтетический монокристаллический материал, выращивается из расплава методом Чохральского при температуре 1470 ± 20 °С. Важной особенностью этого материала является отсутствие в них пиро- и сегнетоэлектрических свойств, приводящих к разбросу временной и температурной нестабильности электромеханических параметров. Первые кристаллы ЛГС выращены в России в начале 80-х гг. XX в. Материалы обладают большей, чем у кварца, акустической добротностью, большим коэффициентом связи и не имеют фазовых переходов ниже температуры плавления, что позволяет применять данный материал для высокотемпературных датчиков.

Лангасит является монокристаллическим пьезоэлектрическим материалом с уникальными характеристиками, позволяющими применять его в пьезотехнике для частотно-селективных устройств (резонаторов, фильтров, линий задержки).

Высокотемпературные исследования АЧХ ЧЭ из лангасита проводились в диапазоне температур минус 80... плюс 1000 °С. Измерения крутизны АЧХ были проведены до температуры 800 °С. При более высоких температурах пьезоактивность элементов уменьшалась практически до нуля, однако даже после нагревания до плюс 1000 °С и последующего охлаждения пьезоэлементы сохраняли работоспособность.

В табл. 1, 2 представлены основные пьезоэлектрические свойства различных кристаллических материалов.

Таблица 1

Сравнительные характеристики лангасита с другими пьезоэлектрическими материалами

Характеристика кристалла	Наименование кристалла					
	α -Кварц SiO_2	Фосфат галлия GaPO_4	Лангасит $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$	Ниобат лития LiNbO_3	Танталат лития LiTaO_3	Тетраборат лития $\text{Li}_2\text{B}_4\text{O}_7$
1	2	3	4	5	6	7
Постоянные элементарной ячейки, Å ⁰ :						
а	4,9138	4,901	8,162	5,154	5,154	9,479
с	5,4052	11,048	5,087	13,865	13,784	10,280
Плотность, г/см ⁻³	2,649	—	5,754	4,700	7,454	2,451
Пьезокоэффициенты, Кл/м ⁻² :				e_{15} 3,76 e_{22} 2,43 e_{31} 0,23 e_{33} 1,33	2,72 1,67 -0,38 1,09	0,472 — 0,290 0,928
КТЛР, 10 ⁻⁶						
α_{11}	13,71		5,11	15,4	16,2	11,1
α_{33}	7,48	—	3,61	7,5	4,1	-3,74

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7
Диэлектрическая проницаемость:						
$\varepsilon_{11}^S / \varepsilon_0$	4,58		18,87	44,29	42,58	8,90
$\varepsilon_{33}^S / \varepsilon_0$	4,70	–	49,32	27,90	42,81	8,07
$\varepsilon_{11}^T / \varepsilon_0$	4,50	5,2	18,99	85,20	53,55	10,97
$\varepsilon_{33}^T / \varepsilon_0$	4,63	5,1	49,32	28,70	43,39	61,58
Твердость (по Моосу)	7	–	6,5	5...5,5	6,7	–
Температура фазового перехода, °C	573,5	933	Нет	1210	660	Нет
Температура плавления, °C	1710	–	1470	1250...1300	1650...1680	917

Таблица 2

Основные физические свойства кристаллов лангатата
в сравнении с традиционными материалами для пьезоэлементов

Свойства	Единица измерения	Обозначение	ЛГТ	Кварц	APC-850 N-2	APC-856
Относительная диэлектрическая постоянная		$K = \varepsilon_{33}^T / \varepsilon^0$	80,3	4,6	1750	4100
Температура Кюри	°C	T _c	–	570	360	150
Пьезомодули	10 ⁻¹² Кл/Н	–d ₁₁	6,5	2,3	d ₃₃ = 400	d ₃₃ = 620
		–d ₁₄	4,7	0,9	d ₁₅ = 590	d ₁₅ = 710
Пьезокоэффициенты по напряжению	10 ⁻³ В м/Н	–g ₁₁	38	58	g ₃₃ = 26	g ₃₃ = 18,5
		g ₁₄	27,7	18	g ₁₅ = 36	g ₁₅ = 25
Модуль Юнга	10 ¹⁰ Н/м ²	Y ₁₁ ^E	11	7,8	6,3	5,8
Плотность	г/см ³	ρ	6,13	2,65	7,7	7,5
Механическая добротность	1	Q _m	50 000	10 ⁶	80	72

Из таблиц видно, что лангасит по многим своим физическим свойствам занимает промежуточное положение между кварцем и танталатом лития. По плотности и твердости этот материал сравним с кварцем, пьезомодули d₁₁ примерно в 3 раза, а пьезомодуль d₁₄ в 6 раз больше, чем у кварца.

Лангатат La₃Ga_{5,5}Ta_{0,5}O₁₄ (ЛГТ) – кристаллы лантагаллиевого танталата имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными материалами (пьезокерамикой и кварцем), применяемыми в датчиках физических величин:

- отсутствие у кристаллов ЛГТ фазовых переходов вплоть до температуры плавления 1450 °C;
- отсутствие у кристаллов ЛГТ пьезоэлектрического эффекта;
- отсутствие у кристаллов ЛГТ гистерезиса физических свойств;
- высокий K_{ЭМС} у кристаллов ЛГТ, более чем в 2 раза превышающий K_{ЭМС} кварца;
- постоянный в диапазоне температур до 700 °C пьезомодуль d₁₁;
- высокое удельное сопротивление (не менее 10⁸ Ом·м при температуре 540 °C).

Кристаллы ЛГТ имеют ряд важных физических свойств, что позволяет использовать их в качестве материала для датчиков физических величин. Эти свойства в сравнении с другими пьезоматериалами приведены в табл. 2 (APC-850 N-2 и APC-856 пьезокерамика). В настоящее время компанией «Фомос» освоено изготовление экспериментальных образцов ЧЭ на их основе. Внешний вид показан на рис. 2. Основные технические характеристики ЧЭ, изготавливаемые компанией из лангатата, приведены в табл. 3. Как отмечается в фирменных материалах, заявленные технические характеристики ЧЭ из ЛГТ требуют экспериментальной проверки, в том числе и в составе датчиков.

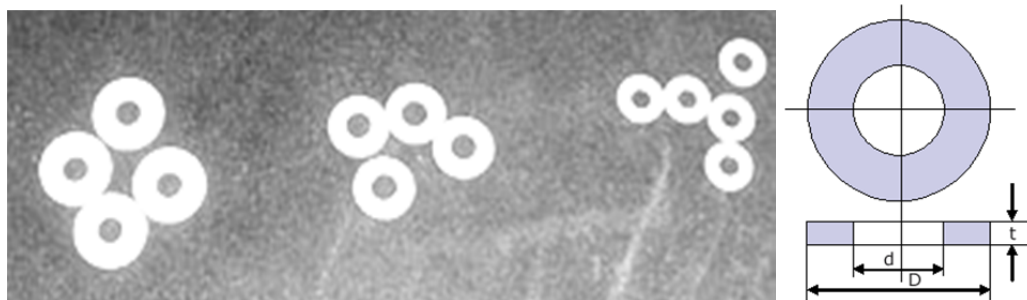


Рис. 2. Внешний вид, чертеж и геометрические размеры ЧЭ из лангатата

Таблица 3

Основные технические характеристики ЧЭ из лангатата

Наименования характеристик	Стандартные	
Материал	Лантангаллиевый танталат (LGT)	
Внешний диаметр, мм	6,35	9,78
Разброс по диаметру, мм	$-0,05/+0,05$	$-0,05/+0,00$
Внутренний диаметр, мм	2,95	3,81
Разброс по диаметру, мм	$-0,05/+0,05$	$-0,00/+0,08$
Толщина, мм	0,635	0,635
Разброс по толщине, мм	$\pm 0,025$	$\pm 0,025$
Поверхность и ее параметры	Обе поверхности шлифованные	
	Отклонения от плоскости в пределах 2,5 мкм	
	Обе поверхности содержат вакуумное напыление: материал подслоя – хром, материал основного слоя – золото	
Сопротивление контактов	Не более 20 Ом/□	
Сопротивление пьезоэлектрического элемента	Более 1 МОм при 538 °С	

Экспериментальные исследования

С использованием ЧЭ из ЛГС и ЛГТ были изготовлены экспериментальные макеты измерительных модулей ВДД пульсаций давления двух типоразмеров (рис. 3) и проведены их испытания, результаты которых приведены в табл. 4 и 5.

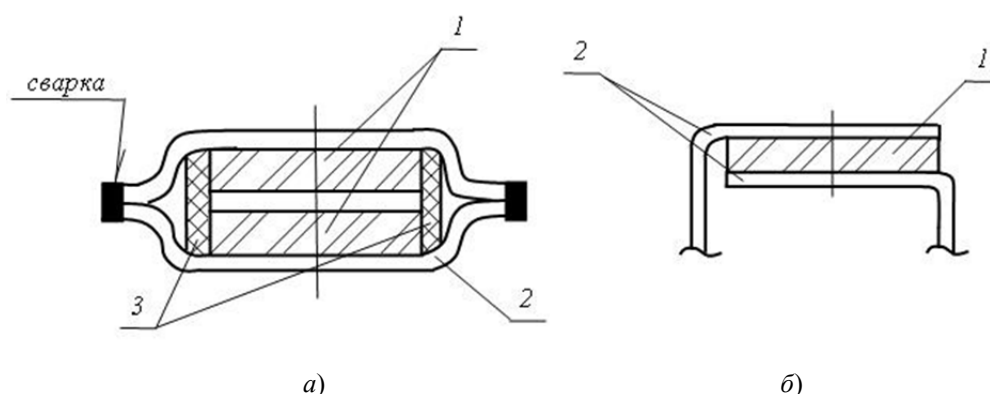


Рис. 3. Измерительные модули экспериментального образца ВДД

На рис. 3,а представлена конструкция измерительного модуля на основе двух пьезопреобразователей, позволяющая увеличить чувствительность ЧЭ и тем самым расширить его диапазон измерения в область малых уровней давлений.

На рис. 3,б представлена конструкция измерительного модуля на основе одного пьезопреобразователя, у которой чувствительность вдвое ниже, чем у вышеописанной конструкции, однако этот вариант ЧЭ наиболее предпочтителен при воздействии высоких давлений и температур, так как обеспечивает более высокое сопротивление изоляции и прочность.

Измерительный модуль содержит пьезопреобразователи из монокристаллических материалов «Лангасит» или «Лангатат» – 1; токосъемники из стальной ленты 0,05 мм – 2; изолятор из высокотемпературной пленки (слюды) – 3. Пьезопреобразователи стягиваются токосъемниками, которые свариваются между собой с токоведущими жилами кабеля.

Учитывая, что в настоящее время отсутствуют токопроводящие клеи, работоспособные при температурах (700...800) °С, рассматривались способы крепления с помощью высокотемпературных сереброзаменяющих припоев и сварки. Однако применение сереброзаменяющих припоев усложняет конструкцию узла за счет обязательного введения дополнительных деталей и усложняет техпроцесс сборки измерительного модуля.

В результате проведенных работ была выбрана сварная конструкция чувствительного элемента, представленная на рис. 3,а.

Таблица 4

Исследование сопротивления изоляции экспериментальных измерительных модулей

	Рисунок	$R_{из}$ при температуре, °С								
		25	100	200	300	400	500	600	700	25
ЛГТ	3,а	$2 \cdot 10^{12}$	$9 \cdot 10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$5 \cdot 10^9$	$4,5 \cdot 10^7$	$1 \cdot 10^8$	$4,5 \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{12}$
	3,б	$1 \cdot 10^{12}$	$7 \cdot 10^{11}$	$7 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^8$	$2 \cdot 10^7$	$4 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^{12}$
ЛГС	3,а	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{12}$	$5 \cdot 10^{11}$	$4,5 \cdot 10^9$	$3 \cdot 10^8$	$1 \cdot 10^7$	$8 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{12}$
	3,б	$1 \cdot 10^{12}$	$1 \cdot 10^{12}$	$9 \cdot 10^{11}$	$7,5 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^9$	$2 \cdot 10^8$	$0,9 \cdot 10^7$	$5 \cdot 10^6$	$1 \cdot 10^{12}$

Были проведены экспериментальные исследования по определению основных технических характеристик предложенных вариантов модуля измерительного. Результаты исследований приведены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты определения характеристик измерительного модуля

Вариант измерительного блока	Обр	Выходное напряжение с измерительного блока, мВ, при ΔP , кгс/см ²						$K_{пр}$, $\frac{мВ}{\frac{кгс}{см^2}}$	$R_{из}$, Ом, при $T = 800$ °С
		1,2	5	14	28	40	56		
На основе двух ПЭ (см. рис. 3,а)	1	2,48	10,4	28,9	58	82,8	115,9	2,92	$1,4 \cdot 10^4$
	2	2,61	10,9	30,4	60,8	86,8	121,5	3,07	$1 \cdot 10^4$
На основе одного ПЭ (см. рис. 3,б)	1	1,3	5,45	15,3	30,5	43,6	61,04	1,53	$2,1 \cdot 10^5$
	2	1,2	4,75	13,3	26,6	38	53,2	1,35	$1 \cdot 10^5$

Выводы

Проведенные исследования двух перспективных материалов лангасита и лангатата показали возможность их использования для изготовления ЧЭ и МИ ВДД. Из двух рассмотренных конструкций МИ для проведения дальнейших работ рекомендуется использовать вариант с двумя пьезопреобразователями.

Использование при разработке датчиков готовых, поставляемых по кооперации ЧЭ из ЛГС и ЛГТ позволит снизить себестоимость и трудоемкость изготовления высокотемпературных датчиков пульсаций и быстропеременных давлений.

Список литературы

1. Чувствительные элементы высокотемпературных датчиков давления. Материалы и технологии изготовления / П. Г. Михайлов, Е. А. Мокров, В. В. Скотников, В. А. Петрин, Д. В. Сергеев, М. А. Чернецов // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2014. – № 4. – С. 204–213.

2. Баринов, И. Н. Состояние разработок и тенденции развития высокотемпературных тензорезистивных датчиков давлений на основе карбида кремния / И. Н. Баринов, Б. В. Цыпин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2010. – № 11. – С. 50–60.
3. Датчики теплофизических и механических параметров : справочник : в 2 т. / под ред. Е. Е. Багдатьяна, А. В. Гориша, Я. В. Малкова. – М. : ИПРЖР, 1998.
4. Алмаз в электронной технике : сб. ст. / под ред. В. Б. Кваскова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 180 с.
5. Водаков, Ю. А. Карбид кремния – материал для твердотельной электроники / Ю. А. Водаков, А. Г. Остроумов // Измерение. Контроль. Автоматизация. – 1987. – № 2. – С. 59–64.
6. Kurtz, A. D. Ultra High Temperature, Miniature, SOI Sensors for Extreme Environments / Anthony D. Kurtz, Alexander A. Ned, Alan H. Epstein // IMAPS International HiTEC 2004 Conference Santa Fe, New Mexico, May 17–20, 2004.
7. Корляков, А. В. Микроэлектромеханические структуры на основе композиции «карбид кремния – нитрид алюминия» / А. В. Корляков, В. В. Лучинин, П. П. Мальцев // Микроэлектроника. – 1999. – Т. 28. – № 3. – С. 125–135.
8. Гридчин, В. А. Физика микросистем : учеб. пособие : в 2 ч. / В. А. Гридчин, В. П. Драгунов. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2004. – Ч. 1. – 416 с.
9. Михайлов, П. Г. Модификация материалов микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 5. – С. 43–46.
10. Михайлов, П. Г. Управление свойствами материалов сенсорных элементов микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов // Микросистемная техника. – 2003. – № 5. – С. 7–11.
11. ОСТ 11 0444–87. Материалы пьезокерамические. Технические условия. – М., 1987. – 141 с.
12. Шарапов, В. М. Пьезоэлектрические датчики / В. М. Шарапов, М. П. Мусиенко, Е. В. Шарапова. – М. : Техносфера, 2008. – 628 с.
13. Богословский, С. В. Чувствительные элементы датчиков на дисперсионных линиях задержки / С. В. Богословский // Приборостроение. – 2009. – Т. 19, № 2. – С. 70–75.
14. Казанцев, С. Г. Механические свойства пьезоэлектрических кристаллов для акустоэлектронных устройств / С. Г. Казанцев, Т. Н. Овчаренко // Вопросы электромеханики. – 2011. – Т. 120. – С. 45–53.
15. Баринов, И. Н. Разработка и изготовление микроэлектронных датчиков давления для особо жестких условий эксплуатации / И. Н. Баринов, В. С. Волков, С. П. Евдокимов, Б. В. Цыпин // Датчики и системы. – 2014. – № 2. – С. 49–61.
16. Каталог ОАО «Фомос-Материалс», группа предприятий «Пьезо». – URL: www.newpiezo.com.

Михайлов Петр Григорьевич

доктор технических наук, профессор,
кафедра прикладной и бизнес информатики,
Пензенский институт технологий и бизнеса
Московского государственного
университета технологий и управления
им. К. Г. Разумовского
(Пензенский филиал)
E-mail: pit_mix@mail.ru

Mikhaylov Petr Grigor'evich

doctor of technical sciences, professor,
sub-department of applied and business of informatics,
Penza Institute of Technologies and Business
of Moscow State University of Technology
and Management named after K. G. Razumovskiy
(Penza branch)

Сазонов Александр Олегович

капитан,
вч. 36360,
Московская обл., Щелковский р-н.

Sazonov Aleksandr Olegovich

captain,
m/u 36360,
Moscow region., Schelkovovsky area

Ожикенов Касымбек Адильбекович

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой робототехники
и технических средств автоматики,
Казахский национальный технический университет
им. К. И. Сатпаева
E-mail: kas_oziken@mail.ru

Ozhikenov Kasymbek Adil'bekovich

candidate of technical sciences, associate professor,
head of sub-department of robotics and automation
hardware,
Kazakh National Technical University
named after K. I. Satpayev

УДК 621.865.8

Михайлов, П. Г.

Вопросы конструирования датчиков для измерения давления высокотемпературных сред / П. Г. Михайлов, А. О. Сазонов, К. А. Ожикенов // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2015. – № 2 (12). – С. 10–18.