

## Результаты исследования высокотемпературных полупроводниковых чувствительных элементов датчиков давления на основе структуры «кремний-на-диэлектрике»

Илья БАРИНОВ  
mzungu@inbox.ru

Рассмотрены конструкция и результаты исследований высокотемпературных полупроводниковых чувствительных элементов датчиков давления.

Создание высоконадежных двигательных установок для ракетных систем и комплексов авиационной и ракетно-космической техники, а также модернизация существующих образцов невозможны без высокоэффективных информационно-измерительных систем управления и контроля, которые позволяют значительно повысить надежность двигательных установок и обеспечить наиболее экономичный режим их работы. Важнейшим параметром, подлежащим измерению на различных этапах отработки

и испытаний авиационной и ракетно-космической техники, а также при ее эксплуатации, является давление, измеряемое с помощью специальных датчиков.

Серийно выпускаемые полупроводниковые тензорезистивные датчики давления обычно соответствуют предъявляемым требованиям по чувствительности, надежности и условиям эксплуатации. Однако перед разработчиками все чаще встает задача развития и совершенствования датчиков давления на основе разработки и внедрения прогрессив-

ных конструкторско-технических решений. Решить такую задачу можно, применив в полупроводниковых чувствительных элементах (ПЧЭ) датчиков давления структуры и конструкции, позволяющие существенно улучшить параметры прибора (например, расширить температурный диапазон датчика до 300 °С, повысить значение пробивного напряжения до 1000 В и при этом сохранить выходной сигнал, равный 100 мВ). Один из возможных вариантов работ в этом направлении — это создание нового тензорезистив-

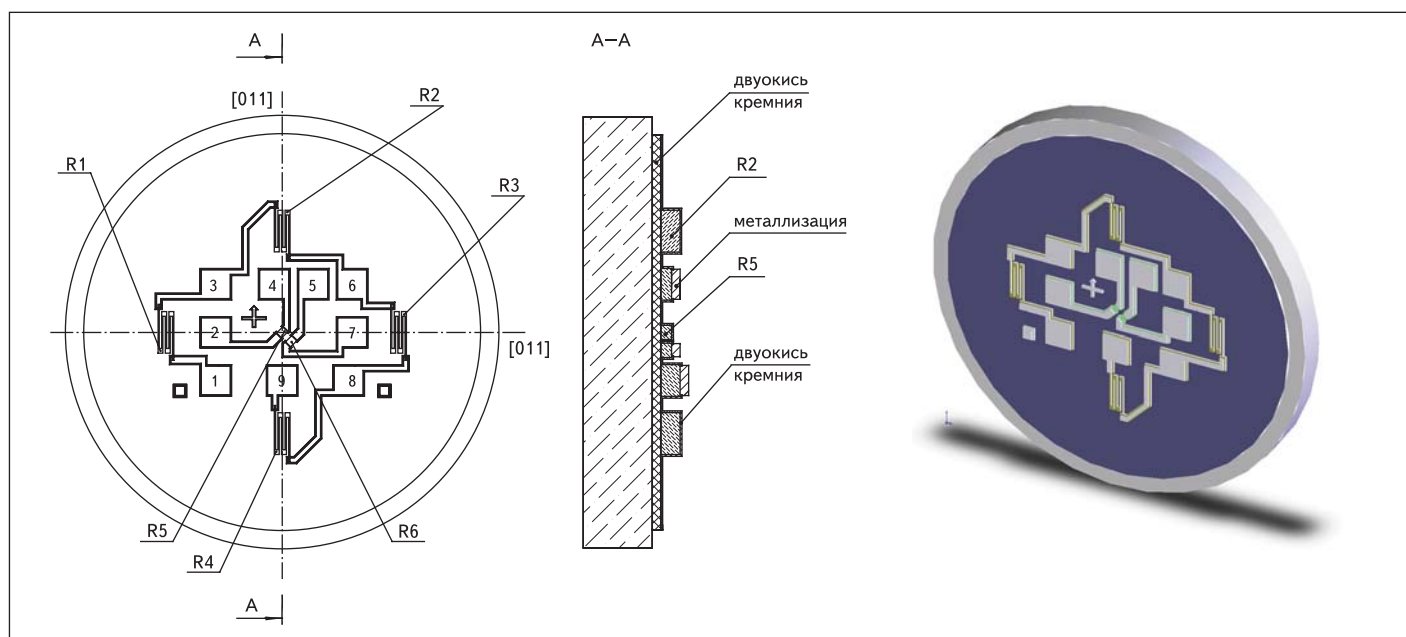


Рис. 1. Схематическое изображение и внешний вид ПЧЭ на КНД-структуре для измерения избыточного давления в диапазоне 0,5–60 МПа с терморезисторами

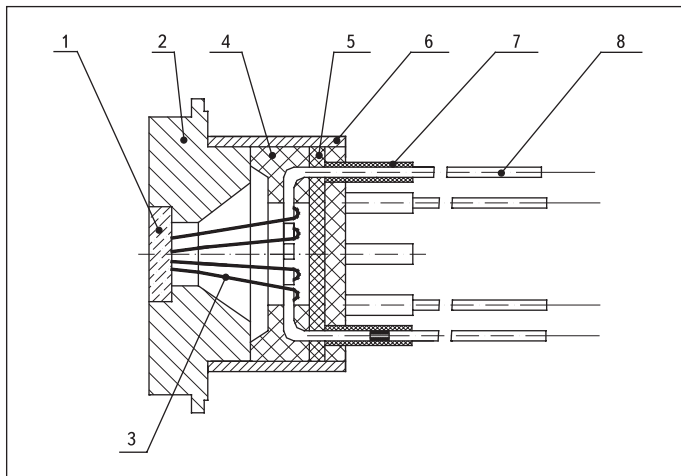


Рис. 2. Модуль измерительный: 1 — ПЧЭ на КНД-структуре; 2 — корпус; 3 — золотые проводники; 4 — колодка; 5 — изолятор; 6 — втулка; 7 — трубка; 8 — провод

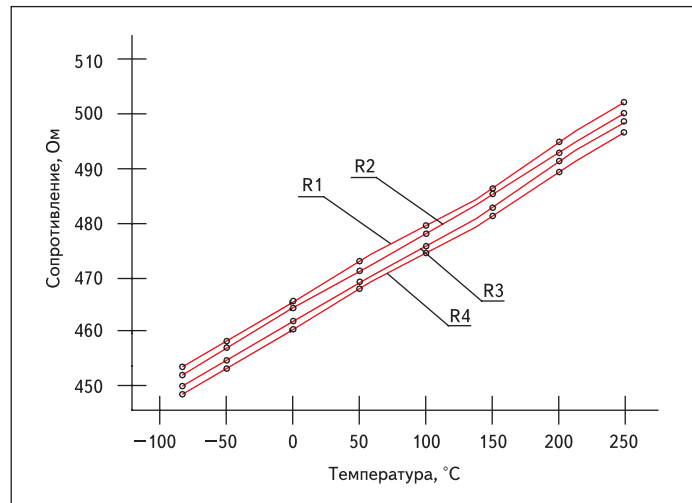


Рис. 3. Результаты измерений сопротивлений тензорезисторов в диапазоне температур  $-70...+250\text{ }^{\circ}\text{C}$

ного ПЧЭ, имеющего оригинальные конструкторские решения и выполненного на основе структуры «кремний-на-диэлектрике» (КНД), когда тензорезисторы из монокристаллического кремния изолированы друг от друга и от подложки пленкой двуокиси кремния. Использование ПЧЭ на КНД-структурах позволит не только производить датчики давления с улучшенными параметрами, но и получать большую экономическую выгоду от их применения по сравнению с ПЧЭ на объемном кремнии и структурах «кремний-на-сапфире».

Цель настоящей работы — экспериментальные исследования некоторых параметров и характеристик ПЧЭ датчиков давления на основе КНД-структуры в условиях изменения температур от  $-70$  до  $+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Исследованию подвергались экспериментальные образцы ПЧЭ на КНД-структуре, которые использовались в модулях давления, предназначенных для измерения избыточного давления различного диапазона [1].

На рис. 1 представлен экспериментальный ПЧЭ на КНД-структуре для измерения избыточного давления диапазона  $0,5\text{--}60$  МПа с двумя терморезисторами.

Конструктивно чувствительный элемент представляет собой плоский кремниевый кристалл диаметром  $6$  мм толщиной от  $100$  до  $800$  мкм в зависимости от диапазона измеряемого давления ( $0,5$  МПа для толщины  $100$  мкм и  $60$  МПа для толщины  $800$  мкм). На кристалле с планарной стороны расположены тензорезисторы ( $R1\text{--}R4$ ), объединенные в мостовую измерительную схему и изолированные от подложки слоем двуокиси кремния толщиной  $1,6$  мкм. Тензорезисторы созданы методом диффузии бора в кремний и имеют сопротивление  $500$  Ом каждый ( $\rho_s = 6$  Ом/мкм). Тензорезисторы имеют высоколегированную коммутацию с контактными площадками, которая также сформирована диффузией бора в кремний. Выводы

Таблица 1. Результаты градуировки модулей с ПЧЭ на КНД-структуре

Входной сигнал $P$ , МПа	Выходной сигнал $U_{\text{вых}}$ , мВ							
	1 цикл		2 цикл		3 цикл		4 цикл	
	прямой ход	обратный ход	прямой ход	обратный ход	прямой ход	обратный ход	прямой ход	обратный ход
0,000	0,68	0,65	0,65	0,65	0,64	0,65	0,64	0,63
0,392	11,30	11,29	11,28	11,30	11,32	11,28	11,30	11,31
0,784	21,65	21,65	21,66	21,62	21,65	21,64	21,61	21,61
1,176	31,68	31,67	31,70	31,66	31,69	31,69	31,66	31,67
1,568	42,06	42,08	42,07	42,06	42,06	42,06	42,06	42,07
1,960	52,04	52,03	52,03	52,06	52,05	52,02	52,07	52,03
2,352	62,33	62,32	62,33	62,31	62,30	62,34	62,35	62,33
2,744	72,54	72,53	72,56	72,54	72,53	72,54	72,53	72,56
3,136	82,77	82,75	82,76	82,78	82,78	82,76	82,76	82,75
3,528	92,90	92,92	92,90	92,92	92,90	92,92	92,92	92,92
3,920	103,25	103,25	103,29	103,26	103,26	103,27	103,25	103,28

формируются методом распайки проводников на контактные площадки кристалла. Терморезисторы  $R5$ ,  $R6$ , не чувствительные к прилагаемому давлению, составляют схему температурной компенсации. Они сформированы методом нанесения поликремния и ионного легирования.

Исследования проводились в следующем объеме:

- измерение сопротивлений тензорезисторов  $R1\text{--}R4$  в диапазоне температур  $-70...+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- измерение начального и максимального выходных сигналов в диапазоне температур  $-70...+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- измерение сопротивления изоляции, тока утечки в диапазоне температур  $-70...+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- определение температурного коэффициента сопротивления (ТКС) тензорезисторов, температурного коэффициента ухода чувствительности и температурного коэффициента ухода начального выходного сигнала в диапазоне температур  $-70...+250\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
- расчет основной погрешности, коэффициентов функции влияния.

Исследовалась партия экспериментальных образцов ПЧЭ в количестве  $10$  штук. С целью исследования данных образцов на стандартном оборудовании были собраны изме-

рительные модули, имеющие в своем составе ПЧЭ на КНД-структуре (рис. 2).

Измерительный модуль состоит из ПЧЭ на КНД-структуре 1, жестко закрепленного в корпусе 2 из ковара (29НК ГОСТ 14082-78) с помощью ситаллоцемента (СЦН 52-1 СУО.027.024 ТУ). Соединение контактных площадок тензомоста ПЧЭ с контактами колодки 4 осуществляется золотыми проводниками 3 (Кр 3л 999,9 диаметром  $0,04$  мм, ГОСТ 7222), которые развариваются ультразвуковой сваркой.

Выводы колодки 4 проходят через выводы изолятора 5 и герметично ввариваются.

В таблицы и графики заносились средние значения всех результатов измерений. Результаты измерений сопротивлений тензорезисторов в диапазоне температур  $-70...+250\text{ }^{\circ}\text{C}$  представлены на рис. 3.

С целью определения основной погрешности снимались градуировочные характеристики модулей, имеющих в своем составе ПЧЭ на КНД-структуре. Результаты приведены в таблице 1.

Основная погрешность ( $\gamma_0$ ), определенная на основании таблицы 1, составила  $0,186\%$ .

Для определения степени влияния рабочего диапазона температур были проведены изме-

рения начального и максимального выходных сигналов в диапазоне температур  $-70...+250$  °С. Результаты приведены на рис. 4.

Расчет ТКС тензорезисторов проведем по формуле [2]:

$$TKC = \frac{R_{250\text{ °C}} - R_{-70\text{ °C}}}{R_{25\text{ °C}} \times \Delta T} 100\%, \quad (1)$$

где  $R_{250\text{ °C}}$ ,  $R_{-70\text{ °C}}$ ,  $R_{25\text{ °C}}$  — значения сопротивлений тензорезисторов при температурах  $+250$  °С,  $-70$  °С и  $+25$  °С соответственно;  $\Delta T = 250 - (-70) = 320$  °С.

Используя значения сопротивлений, приведенных на рис. 2, рассчитаем значения ТКС тензорезисторов R1–R4. Результаты расчетов сведены в таблицу 2.

Таблица 2. Результаты расчетов ТКС тензорезисторов

TKC, %/°C			
R1	R2	R3	R4
0,143	0,143	0,145	0,144

Значение температурного коэффициента ухода чувствительности  $\alpha$  проведем по формуле [3]:

$$\alpha = \frac{U_{\text{макс}(250\text{ °C})} - U_{\text{макс}(-70\text{ °C})}}{U_{\text{макс}(25\text{ °C})} \times \Delta T} 100\%, \quad (2)$$

где  $U_{\text{макс}(250\text{ °C})}$ ,  $U_{\text{макс}(-70\text{ °C})}$ ,  $U_{\text{макс}(25\text{ °C})}$  — значения максимального выходного сигнала при температурах  $+250$  °С,  $-70$  °С,  $+25$  °С соответственно;  $\Delta T = 250 - (-70) = 320$  °С.

Значение температурного коэффициента ухода начального выходного сигнала  $\beta$  проведем по формуле [3]:

$$\beta = \frac{U_{0(250\text{ °C})} - U_{0(-70\text{ °C})}}{U_{\text{макс}(25\text{ °C})} \times \Delta T} 100\%, \quad (3)$$

где  $U_{0(250\text{ °C})}$ ,  $U_{0(-70\text{ °C})}$  — значения начального выходного сигнала при температурах  $+250$  °С и  $-70$  °С соответственно.

Используя значения выходных сигналов, приведенных на рис. 3, рассчитаем значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ .

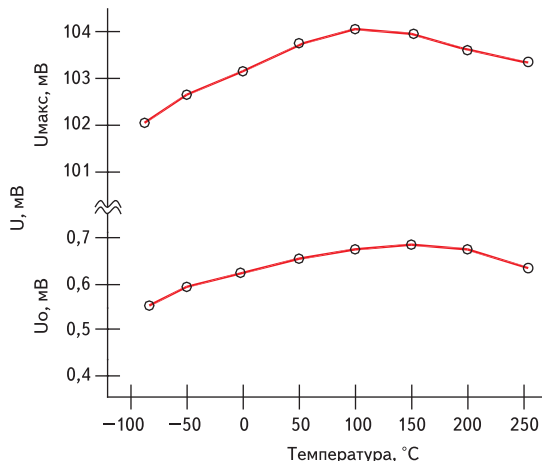


Рис. 4. Результаты исследования модулей с ПЧЭ на КНД-структуре в диапазоне температур  $-70...+250$  °С

Результаты расчета следующие:  $\alpha = -0,018\%/^{\circ}\text{C}$ ;  $\beta = -0,0088\%/^{\circ}\text{C}$ .

Сопротивление изоляции измеряли с помощью тераомметра Е6-13А между контактными площадками 1–2 (рис. 1) при напряжении  $U_1 = 100$  В. Ток утечки между контактными площадками 1–2 (рис. 1) измеряли с помощью прибора Л2-56А ОШМ 2.756.001 ТУ (ПНХТ-2) по ветви вольт-амперной характеристики при напряжении  $U_2 = 120$  В, а также оценивали по данным сопротивления изоляции при напряжении  $U_1 = 100$  В.

Результаты измерений и расчетов представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты измерений электрических параметров ПЧЭ на КНД-структуре

T, °C	Сопротивление изоляции, МОм при напряжении $U_1 = 100$ В	Ток утечки, мкА при напряжении $U_2 = 120$ В
-70	>2000	0,02
0	>2000	0,02
+50	>2000	0,02
+100	>2000	0,02
+150	>2000	0,02
+200	>2000	0,02
+250	>2000	0,02

На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Изготовленные ПЧЭ датчиков давления на КНД-структуре имеют высокое сопротивление изоляции между элементами схемы, что является необходимым условием для создания датчиков давления, обладающих повышенными временной стабильностью и стойкостью к воздействиям электромагнитных полей и токов источника естественного и искусственного происхождения.
- ТКС тензорезисторов не превышает значения  $0,2\%/^{\circ}\text{C}$ , что соответствует типовому ТЗ на датчики давления, использующиеся в авиационной и ракетно-космической технике.
- Значения коэффициентов  $\alpha$  и  $\beta$ , входящие в функцию влияния, не превысили соответствующих значений (для  $\alpha \pm 0,05\%/^{\circ}\text{C}$ , для  $\beta \pm 0,01\%/^{\circ}\text{C}$ ), определенных по данным экспериментальных исследований для датчиков давлений в изделиях авиационной и ракетно-космической техники.
- При внешнем осмотре кристаллов после испытаний не обнаружено никаких дефектов. В местах разварки золотых проводников на алюминиевые контактные площадки дефектов типа образования интерметаллических соединений не наблюдалось.

## Литература

1. Баринов И. Н. Конструктивно-технологические решения полупроводниковых преобразователей давлений на основе структуры «кремний-на-диэлектрике» // Технологии приборостроения. 2006. № 4.
2. Ваганов В. И. Интегральные тензопреобразователи. М.: Энергоатомиздат, 1983.
3. ОСТ 92-4279-80. Преобразователи измерительные. Методы определения метрологических характеристик.