

*П. Г. Михайлов, Т. А. Глебова, А. В. Соколов,  
А. У. Аналиева, А. П. Михайлов, Е. Д. Фадеев*

## УПРАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ПОЛИКРЕМНИЕВЫХ СТРУКТУР МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ ДАТЧИКОВ

*P. G. Mikhailov, T. A. Glebova, A. V. Sokolov,  
A. U. Analieva, A. P. Mikhailov, E. D. Fadeev*

## MANAGEMENT OF ELECTROPHYSICAL CHARACTERISTICS OF THE POLYSILICON SENSORY STRUCTURES OF MICROELECTRONIC SENSORS

**А н н о т а ц и я. Актуальность и цели.** Исследованы технологические и конструктивные методы управления электрофизическими характеристиками (ЭФХ) структур датчиков, сформированных из поликристаллических кремниевых пленок (ПКП). **Материалы и методы.** Выполнено математическое моделирование ПКП и чувствительного элемента (ЧЭ) и на их основе предложены методы модификации ПКП, основанные на ионном легировании. **Результаты.** Приведены расчетные соотношения для определения электрического сопротивления ПКП. Получены величины критических значений доз примеси бора, внедренной ионным легированием. Рассчитаны и проанализированы тепловые и деформационные характеристики ПКП и приведены количественные значения температурных коэффициентов сопротивления и значений тензочувствительности кристаллитов и барьерных слоев ПКП. Применительно для формирования сенсорных элементов проанализированы и выбраны технологические способы модификации структуры ПКП с целью повышения тензочувствительности и уменьшения температурного коэффициента сопротивления (ТКС) (для тензорезисторов) и уменьшения тензочувствительности и повышения ТКС (для терморезисторов). Такие методы позволяют сформировать на одном ЧЭ тензо- и термочувствительные элементы. Изготовлены и испытаны экспериментальные макеты датчиков давлений с ПКП тензорезисторами. **Выводы.** Применение предложенных технологических и конструктивных методов управления ЭФХ сенсорных элементов и структур датчиков позволило за счет выбора режимов ионного легирования (ИЛ) повысить стабильность технических характеристик и дать возможность формировать на одном ЧЭ тензочувствительные и термочувствительные элементы.

**A b s t r a c t. Background.** Researched technology and construction management methods of electrophysical characteristics (EPC) sensory structures of the sensors are formed of polysilicon films (PSF). **Materials and methods.** Mathematical modeling of PSF and the sensing element (SE) on its basis, the methods of modification of PSF based on ion doping are Proposed. **Results.** The calculated relations for determining the electrical resistance of PSF are given. The obtained values of the critical values of the doses of the impurities of boron ion doping is implemented. The thermal and deformation characteristics of PSF are calculated and analyzed, and the quantitative values of the temperature resistance coefficients and the values of the strain sensitivity of crystallites and barrier layers of PSF are given. With regard to the develop-

ment of sensor elements analyzed and selected technologies of modification of the structure of PSF with the purpose of increase of strain and decrease of TKS (for strain gages), and reduce the strain and increase TKS (for RTD). Such methods allow to generate one SE tenzo – and heat-sensitive elements. Experimental models of pressure sensors with PC strain gauges were manufactured and tested. **Conclusions.** Application of the offered technological and constructive methods of control of EPC of sensor elements and structures of sensors allowed to increase stability of technical characteristics and to give the chance to form on one CE tenzo-and thermoelements due to the choice of modes IL.

**К л ю ч е в ы е с л о в а:** датчик, поликристаллический кремний, пленка, характеристики, сенсор, тензорезистор, термоэлемент.

**К e y w o r d s:** sensor, polycrystalline silicon, film, characteristics, sensor, strain gauge, thermoelement.

В настоящее время основными типами датчиков физических величин (ДФВ) становятся микроэлектронные датчики (МЭД), которые превосходят традиционные датчики, основанные на объемных чувствительных элементах (ЧЭ) и конструкциях по таким техническим и экономическим характеристикам, как точность, надежность, массогабаритным и проч. [1]. Кроме того, они базируются на ручных операциях сборки и настройки, что увеличивает их трудоемкость и снижает их конкурентоспособность. Как показали исследования, большинство присутствующих на рынке коммерческих МЭД изготавливают на основе монокристаллического кремния (МК), что лимитирует их температурный диапазон на уровне 85–900 °С.

Следует отметить, что технические возможности ДФВ в части рабочих температур в наибольшей степени определяются свойствами функциональных материалов, на поверхности или в объеме которых формируются сенсорные элементы и структуры [2]. К таким функциональным материалам относятся, в первую очередь, кремний и его политипы (поликремний, аморфный кремний), широкозонные полупроводники (алмаз) и полупроводниковые соединения (карбид кремния, нитрид алюминия), полупроводниковые структуры (кремний на сапфире, кремний на кремнии). Из всех указанных функциональных материалов наиболее приемлемым с точки зрения доступности, технологичности и себестоимости является поликремний [3, 4]. В микроэлектронике ПКП чаще всего используется в виде пленок, формируемых на поверхности диэлектриков и полупроводников газофазным или термическим методами. В исходном состоянии ПКП имеет поликристаллическую структуру и имеет очень высокое электрическое сопротивление и может использоваться только в качестве изолятора. Для использования ПКП в качестве тензочувствительных или термочувствительных структур МЭД пленки подвергаются модификации. Процедура модификации осуществляется путем управляемого воздействия на ПКП тепловых полей или ионных пучков, которые изменяют структуру пленки, преобразуя ее в рекристаллизованную монокристаллическую, легированную определенной примесью, чаще всего бором (акцепторная примесь) или фосфором (донорная примесь) пленку [5]. При этом рекристаллизованная пленка отделена от подложки изолирующей пленкой двуокиси кремния. Для описания свойств модифицированного ПКП, используемого в сенсорных структурах, рассмотрим их электрофизические модели [6].

#### *Модели управления поликремниевыми сенсорными структурами*

Сопротивление ПКП ( $R$ ) можно представить как схему замещения в виде последовательно соединенных резисторов:

$$R = R_k + R_b, \quad (1)$$

где  $R_k$  и  $R_b$  – суммарные сопротивления соответственно кристаллов и областей обеднения (барьеров).

По мере роста уровня легирования пленок сопротивление кристаллитов уменьшается, при этом сопротивление областей обеднения уменьшается еще больше. При концентрации легирующей примеси (бора) больше  $5 \cdot 10^{19} [1/\text{см}^3]$  удельное сопротивление ПКП приближается к сопротивлению МК, оставаясь, однако, всегда больше.

Распределение по ПКП легирующей примеси зависит от ее вида. Такая примесь, как бор, равномерно распределяется по объему кристаллитов и межкристаллическому пространству. Для фосфора наблюдается эффект сегрегации: фосфор имеет тенденцию накапливаться в межкристаллическом пространстве. Сегодня для изготовления сенсоров используются только поликристаллические пленки, легированные бором, причем с высокой степенью легирования (около  $4 \cdot 10^{19}$  [1/см<sup>3</sup>] и более).

Температурная зависимость сопротивления ПКП (1) имеет две составляющие: одна определяется температурной зависимостью сопротивления объема кристаллита, а другая – температурной зависимостью сопротивления запирающего слоя (барьера), образующегося на границах кристаллитов. Продифференцировав составляющие формулы (1), получим температурный коэффициент сопротивления (ТКС)  $\alpha$  ПКП:

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} = \frac{R_k}{R_k + R_b} \left( \frac{1}{R_k} \frac{dR_k}{dT} \right) + \frac{R_b}{R_k + R_b} \left( \frac{1}{R_b} \frac{dR_b}{dT} \right) \quad (2)$$

или

$$\alpha = \frac{R_k}{R_k + R_b} \alpha_k + \frac{R_b}{R_k + R_b} \alpha_b, \quad (3)$$

где  $\alpha_k = \frac{1}{R_k} \frac{dR_k}{dT}$  – ТКС кристаллита;  $\alpha_b = \frac{1}{R_b} \frac{dR_b}{dT}$  – ТКС области обеднения (барьера),

$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT}$  – ТКС ПКП.

Следует отметить, что  $\alpha_k$  определяется рассеянием носителей тока на колебаниях кристаллической решетки и имеет положительный знак ТКС барьера  $\alpha_b$ . В области межзеренных границ (барьера) происходит туннелирование носителей заряда, при этом увеличение температуры приводит к повышению тока, т.е. ТКС барьерного слоя имеет отрицательный знак [3].

Меняя степень легирования пленки, можно изменить соотношение между сопротивлением кристаллитов  $R_k$  и барьеров  $R_b$  и управлять таким образом величиной ТКС. Можно получить пленки с ТКС любого знака, в том числе и с  $\alpha = 0$ , что очень важно в практическом отношении. Такого разнообразия в поведении ТКС в рассматриваемом диапазоне концентраций примеси у МК нет.

Деформация ПКП приводит к изменению сопротивления как кристаллитов, так и областей обеднения вблизи границ кристаллитов. Поэтому суммарная тензочувствительность может быть представлена

$$S = \frac{R_k}{R_k + R_b} S_k + \frac{R_b}{R_k + R_b} S_b, \quad (4)$$

где  $S_k = \frac{1}{R_k} \frac{dR_k}{d\varepsilon}$ ,  $S_b = \frac{1}{R_b} \frac{dR_b}{d\varepsilon}$ ,  $S = \frac{1}{R} \frac{dR}{d\varepsilon}$  – тензочувствительности соответственно кристаллита, барьера и ПКП в целом.

Физические причины изменения сопротивления кристаллита под действием деформации такие же, что и в МК. Важной особенностью ПКП является различная кристаллографическая ориентация кристаллов [7], что приводит к усреднению тензочувствительности ПКП.

Следует отметить характерное свойство ПКП, заключающееся в том, что по мере повышения уровня легирования  $R_b$  уменьшается, причем при значениях концентрации примеси  $N > 5 \cdot 10^{19}$  [1/см<sup>3</sup>] высота потенциального барьера снижается до нуля и резко снижается  $R_b$ . В этом случае вся тензочувствительность обусловлена только кристаллитами:

$$S = S_k \frac{R_k}{R_k + R_b}. \quad (5)$$

Влияние границ зерен учитывается вторым множителем.

В табл. 1 приведены результаты исследований ПКП – тензорезисторов  $p$ -типа проводимости, легированных бором до концентраций  $N \approx 4 \cdot 10^{19}$  [1/см<sup>3</sup>] [8].

Таблица 1

## Тензочувствительность кристаллов и барьеров ПКП

| Элемент структуры | Тензочувствительность ( $S$ ) отн. ед. |            | ТКС ( $\alpha$ ) 1/°C |
|-------------------|--|------------|-----------------------|
|                   | продольная                             | поперечная |                       |
| Кристаллит        | 51,5                                   | -12,5      | $15 \cdot 10^{-4}$    |
| Барьер            | 24,3                                   | -2,3       | $-5,37 \cdot 10^{-4}$ |

*Технологические методы модификации ПКП*

Для изменения концентрации в ПКП существует два метода: 1 – термодиффузия; 2 – ИЛ, из которых наиболее перспективен второй метод. Кратко поясним применительно к ПКП сущность ионного легирования.

Суть процесса ИЛ заключается в формировании пучков ионов бора или фосфора с одинаковой массой и зарядом, обладающих необходимой заданной энергией, и внедрении их в подложку или мишень в определенном количестве, называемом дозой, т.е. основными характеристиками процесса ИЛ являются энергия ( $E_0$ ) и доза ( $D_0$ ) пучка ионов [9]:

$$E_0 = neU, \quad (6)$$

где  $U$  – приложенная разность потенциалов,  $n$  – кратность ионизации,  $n = 1, 2, 3$  (одно, двух или трехзарядный ион, например  $B^{+2}$ ),  $e$  – заряд электрона:

$$D_0 = \frac{Q}{ne} = \frac{j}{tne} \text{ [ион/см}^2\text{]}, \quad (7)$$

где  $D_0$  – доза легирования;  $Q$  – заряд;  $j$  – плотность тока пучка;  $t$  – время легирования.

Для перевода зарядной дозы в ионную используют соотношение: 1 мкКл/см<sup>2</sup> для  $n = 1$  соответствует примерно  $6,25 \cdot 10^{12}$  ион/см<sup>2</sup>.

Отметим основные преимущества ИЛ перед диффузионным [4, 8]:

- точное задание и простое регулирование количества внедренной примеси, определяемое током ионного пучка;
- повышенная воспроизводимость и однородность распределения примеси;
- возможность использования в качестве маски при легировании пленок  $SiO_2$  и  $Si_3N_4$ ;
- возможность регулируемого внедрения примеси через тонкие слои диэлектриков и резистивных материалов;
- пониженная по сравнению с диффузией температура.

Вместе с тем процесс ИЛ сопровождается нарушением кристаллической структуры ПКП и появлением в ней аморфизированных областей. Дефекты, вносимые ИП, способствуют ухудшению ЭФХ сенсорных структур (увеличиваются токи утечки, снижаются пробивные напряжения и проч.) Уменьшение дефектов и активация внедренной примеси обеспечивается высокотемпературной обработкой легированных структур.

При термообработке основными параметрами является температура и длительность, например, при температуре 1000 °C для полной активации примеси необходимо время не менее 30 мин [9].

Эксперименты проводились при ионном легировании пластин из монокристаллического и поликристаллического кремния со сформированной топологией ЧЭ МЭД давления и пластин – свидетелей. Формирование ПКП толщиной 0,6 мкм на предварительно окисленной МК подложке осуществлялось в диффузионной печи СДО 125/3-15 (оснащенной реактором пониженного давления).

Легирование осуществлялось на установке ионного легирования типа «Везувий – 5» односторонними ионами бора ( $B^+$ ) с контролем тока ионного пучка, напряжения 100 КэВ и набираемой дозы. После набора необходимых доз пластины со структурами отжигались при тем-

пературе (900...950) °С в течение 30–40 мин для активации внедренной примеси. После отжига определялись основные ЭФХ структур по методике, изложенной в работе [10].

По полученным экспериментальным результатам были построены графические модели зависимостей:

1) поверхностного сопротивления ПКП от дозы легирования  $\rho_s$  [Ом/□] =  $f_1(D$  [ион/см<sup>2</sup>]) (рис. 1);

2) температурного коэффициента сопротивления ПКП от дозы легирования  $\alpha$  [%/К] =  $f_2(D$  [ион/см<sup>2</sup>]) и для монокристаллического кремния (рис. 2).

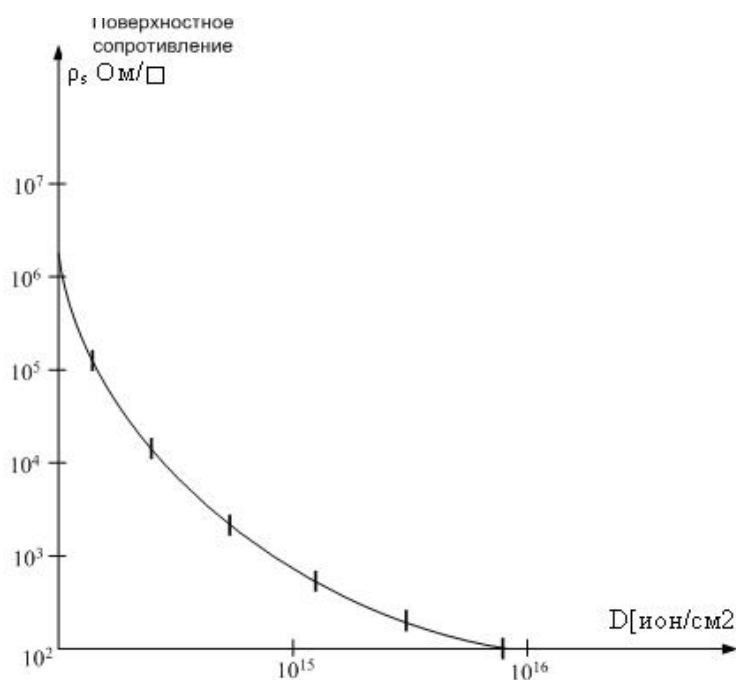


Рис. 1. Поверхностное сопротивление ПКП как функция дозы имплантации ионами бора ( $B^+$ )

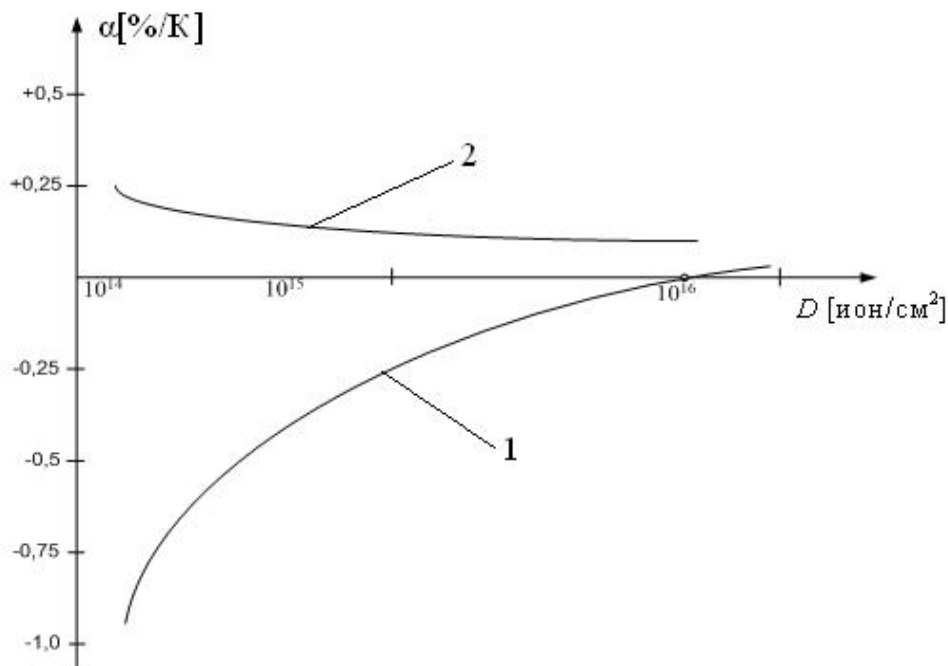


Рис. 2. Графические зависимости температурного коэффициента сопротивления ПКП (1) и монокристаллического кремния «p»-типа (2) от дозы имплантации ионами бора ( $B^+$ )

Из анализа графиков (рис. 1 и 2) можно сделать следующие выводы:

- поверхностное сопротивление ПКП зависит от дозы облучения, при этом зависимость имеет существенную нелинейность;
- ТКС ПКП в отличие от ТКС МК имеет отрицательный знак и может регулироваться дозой, внедренной при ИЛ.

### Изготовление и испытания экспериментальных ПК ЧЭ

В процессе проведения НИР исследовалась возможность управления техническими характеристиками ПКП, входящими в состав ЧЭ МЭД давлений. Были изготовлены два варианта ЧЭ с разной топологией тензорезистивной схемы (рис. 3). По первому варианту топологии все тензорезисторы (ТР) располагались по периферии ЧЭ, а их продольная ориентация совпала с кристаллографическим направлением  $[110]$  монокристаллической кремниевой подложки. По второму варианту два центральных ТР располагались в центре, а два других – по периферии ЧЭ.

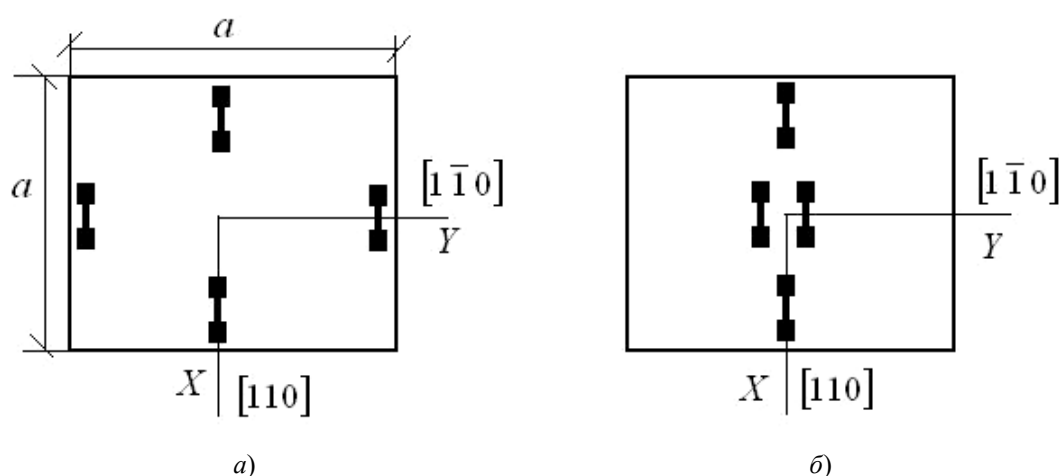


Рис. 3. Варианты топологии поликремниевого ЧЭ микроэлектронного высокотемпературного датчика давления: а – 1-й вариант; б – 2-й вариант

В качестве упругого элемента (УЭ) был использован МК, который легко профилируется с использованием щелочных травителей – водном 33 % растворе КОН [11].

Проводились исследования технических характеристик (ТХ) датчиков с двумя вариантами расположения ПК тензорезисторов на УЭ (мембране), приведенные на рис. 3.

В ЧЭ ТР соединены по схеме полного моста теоретическая чувствительность тензопреобразователя с точечными ТР в варианте 1 (см. рис. 3):  $S_1 = 0,93\pi_{11}\left(\frac{a}{h}\right)^2$ , а в варианте 2:

$S_2 = 0,78\pi_{11}\left(\frac{a}{h}\right)^2$ . При учете фактических размеров ТР (длина 200 мкм, ширина 20 мкм) чувствительности ТР снизятся до значений [12, 13]:

$$S_1 = 0,706\pi_{11}\left(\frac{a}{h}\right)^2, S_2 = 0,536\pi_{11}\left(\frac{a}{h}\right)^2, \quad (8)$$

где  $a$  – размер ЧЭ (см. рис. 3);  $h$  – толщина ЧЭ;  $\pi_{11}$  – главный пьезорезистивный коэффициент.

Чувствительность варианта 1 несколько больше, но вариант 2 обладает лучшей воспроизводимостью технических характеристик.

Изготовленные датчики исследовались в интервале температур от + 20 до + 300 °С, температура поддерживалась термостатом ТК-500 с точностью  $\pm 1$  °С, давление измерялось манометром МПА-15 класса 0,02. Температурные зависимости выходного сигнала при номинальных давлениях ( $P_{ном1} = 1500$  мм рт.ст. и  $P_{ном2} = 1000$  мм рт.ст.) в режиме питания от генератора тока представлены на рис. 4.

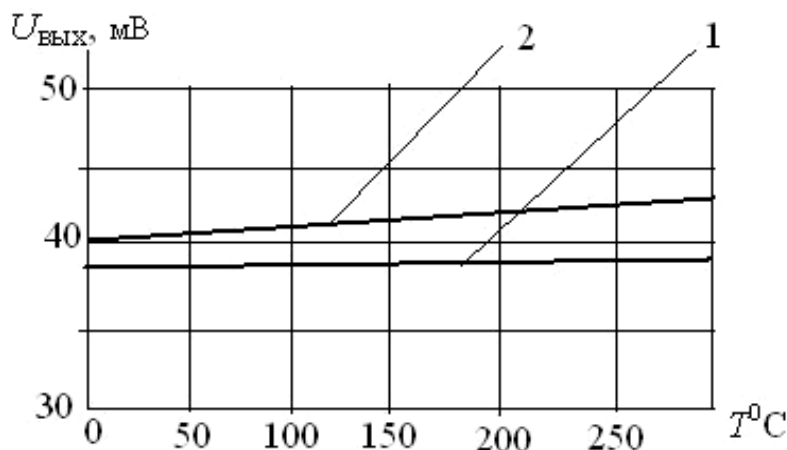


Рис. 4. Температурные зависимости выходных сигналов

Сравнительные характеристики датчиков давления приведены в таблице.

Расчетно-экспериментальные данные, полученные для двух конструкций ЧЭ, сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты экспериментальных исследований ПЧЭ на основе ПКП

| Параметры  | Вариант 1            | Вариант 2            |
|--|----------------------|----------------------|
| Толщина мембраны, мкм  | 30±2                 | 20±2                 |
| Сопротивление резистора, кОм.  | 0,6±0,025            | 0,6±0,25             |
| Номинальное давление, мм рт.ст.  | 1500                 | 1000                 |
| Номинальный выходной сигнал, мВ  | 40,4                 | 37,3                 |
| Температурный коэффициент выходного сигнала, %/°C                                      | 0,02                 | 0,05                 |
| Начальный выходной сигнал, мВ  | 5                    | 10                   |
| Температурный коэффициент начального выходного сигнала, %/°C                           | 0,01                 | 0,02                 |
| Чувствительность к измеряемому давлению (при T = 20°C), [1/Па] (U <sub>пит</sub> = 5В) | 4,1·10 <sup>-8</sup> | 5,7·10 <sup>-8</sup> |

Температурные характеристики датчика в варианте 1 также предпочтительнее, поэтому предлагаемый вариант можно считать более приемлемым при проектировании МЭД на основе ПКП.

### Заключение

В результате проведенных исследований предложены и апробированы технологические методы модификации ПКП МЭД, обеспечивающие эффективное управление ЭФХ сенсорных структур:

1) использованием ионного легирования для внедрения примеси «р» (В<sup>+</sup>) или «п» (P<sup>-</sup>) типов проводимости;

2) локальной перекристаллизации поликремниевых тензорезисторов с лазерным лучем.

Разработаны и проанализированы модели ПКП, на основе которых определены критические дозы легирования и температурные коэффициенты поликремниевых тензо- и терморезисторов.

### Библиографический список

1. Джексон, Р. Г. Новейшие датчики : справочник : пер. с англ. / Р. Г. Джексон. – Москва : Техносфера, 2007. – 380 с.
2. Mikhaylov, P. G. Microelectronic Sensors for the Aircraft and Space-Rated Equipment / P. G. Mikhaylov, A. O. Kassimov, M. A. Khizirova // International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR). – 2017. – Vol. 8, iss. 4. – P 152–157. – URL: <http://www.bipublication.com>
3. Полукристаллические полупроводники. Физические свойства и применения : пер. с англ. / под ред. Г. Харбеке. – Москва : Мир, 1989. – 344 с.

4. Баясилова, З. А. Модификации поликремниевых пленок и повышение чувствительности тензорезистивных структур высокотемпературных датчиков давления / З. А. Баясилова, П. Г. Михайлов, М. К. Бактыбаев // Вестник Государственного университета имени Шакарима города Семей. – 2016. – № 4 (76). – С. 7–11.
5. Чистяков, Ю. Д. Физико-химические основы технологии микроэлектроники / Ю. Д. Чистяков, Ю. П. Райнова. – Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2010. – 392 с.
6. Михайлов, П. Г. Моделирование поликремневых пленочных структур высокотемпературных датчиков физических величин / П. Г. Михайлов, А. В. Соколов // Современные информационные технологии : тр. Междунар. науч.-техн. конф. – 2011. – Вып. 14. – С. 209–214.
7. Най, Дж. Физические свойства кристаллов и их описание при помощи тензоров и матриц : пер. с англ. / Дж. Най. – Москва : Мир, 1967. – 386 с.
8. Михайлов, П. Г. Модификация материалов микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003 – № 5. – С. 43–46.
9. Кузнецова, М. А. Физико-технологические основы применения наноразмерной ионно-лучевой технологии при создании изделий нано- и микросистемной техники / М. А. Кузнецова, В. В. Лучинин, А. Ю. Савенко // Нано- и микросистемная техника. – 2009. – № 8. – С. 24–32.
10. Ozhikenov, K. A. Development of Technologies, Methods and Devices of the Functional Diagnostics of Microelectronic Sensors Parts and Components / K. A. Ozhikenov, P. G. Mikhailov, R. S. Ismagulova // 13<sup>th</sup> International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE). – 2016. – Vol. 1. – P. 84–90.
11. Gosalvez, M. A. Simulating anisotropic etching of silicon in any etchant: evolutionary algorithm for the calibration of the continuous cellular automaton / M. A. Gosalvez, N. Ferrando, Y. Xing // J. Micromech. Microeng. – 2011. – № 6. – P. 72–84.
12. Глушко, А. А. Параметры резистивных структур на поликристаллическом кремнии / А. А. Глушко, В. А. Шахнов // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 67–75.
13. Влияние конструкции мембраны на параметры выходной характеристики кремниевого тензопреобразователя давления / Е. В. Игнатьева, В. В. Панков, Ю. А. Михайлов // Датчики и системы. – 2009. – № 6. – С. 51–54.

### References

1. Dzhekson R. G. *Noveyshie datchiki: spravochnik: per. s angl.* [The latest sensors : reference book : transl. from English.]. Moscow: Tekhnosfera, 2007, 380 p. [In Russian]
2. Mikhaylov P. G., Kassimov A. O., Khizirova M. A. *International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR)*. 2017, vol. 8, iss. 4, pp 152–157. Available at: <http://www.bipublication.com>
3. *Polikristallicheskie poluprovodniki. Fizicheskie svoystva i primeneniya: per. s angl.* [Polycrystalline semiconductors. Physical properties and applications : trans. from English.]. Ed. by G. Kharbeke. Moscow: Mir, 1989, 344 p. [In Russian]
4. Bayasilova Z. A., Mikhaylov P. G., Baktybaev M. K. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta imeni Shakarima goroda Semey* [Bulletin of Shakarim state University Semey]. 2016, no. 4 (76), pp. 7–11. [In Russian]
5. Chistyakov Yu. D., Raynova Yu. P. *Fiziko-khimicheskie osnovy tekhnologii mikroelektroniki* [Physicochemical basis of microelectronics technology]. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2010, 392 p. [In Russian]
6. Mikhaylov P. G., Sokolov A. V. *Sovremennye informatsionnye tekhnologii: tr. Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.* [Modern information technologies: tr. international. scientific.-tekhn. conf.]. 2011, iss. 14, pp. 209–214. [In Russian]
7. Nay Dzh. *Fizicheskie svoystva kristallov i ikh opisanie pri pomoshchi tenzorov i matrity: per. s angl.* [Physical properties of crystals and their description by means of tensors and matrices: trans. from english.]. Moscow: Mir, 1967, 386 p. [In Russian]
8. Mikhaylov P. G. *Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika* [Devices and systems. Management, control, diagnostics]. 2003, no. 5, pp. 43–46. [In Russian]
9. Kuznetsova M. A., Luchinin V. V., Savenko A. Yu. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika* [Nano- and microsystem technology]. 2009, no. 8, pp. 24–32. [In Russian]
10. Ozhikenov K. A., Mikhailov P. G., Ismagulova R. S. *13th International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (A PEIE)*. 2016, vol. 1, pp. 84–90.
11. Gosalvez M. A., Ferrando N., Xing Y. *J. Micromech. Microeng.* 2011, no. 6, pp. 72–84.
12. Glushko A. A., Shakhnov V. A. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Ser.: Priborostroenie* [Bulletin of the Moscow state technical University. N. E. Bauman. Ser.: Instrument making]. 2011, no. 1, pp. 67–75. [In Russian]
13. Ignat'eva E. V., Pankov V. V., Mikhaylov Yu. A. *Datchiki i sistemy* [Sensors and systems]. 2009, no. 6, pp. 51–54. [In Russian]



**Михайлов Петр Григорьевич**

доктор технических наук, профессор,  
кафедра информационно-измерительных систем,  
Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)  
E-mail: pit\_mix@mail.ru

**Глебова Татьяна Александровна**

доцент,  
кафедра информационно-измерительных систем,  
Пензенский государственный университет  
архитектуры и строительства  
(Россия, г. Пенза, ул. Германа Титова, 28)  
E-mail: pit\_mix@mail.ru

**Соколов Александр Владимирович**

главный специалист-эксперт  
инспекции Госстройнадзора  
по Пензенской области  
(Россия, г. Пенза, ул. Попова, 34а)  
E-mail: sokoljv\_av\_avto@mail.ru

**Аналиева Ажар Уразбаевна**

преподаватель,  
колледж при научно-образовательном комплексе,  
Казахстанский университет  
инновационных и телекоммуникационных систем  
(Казахстан, г. Уральск, ул. М. Маметовой, 81)  
E-mail: azhara\_1980@mail.ru

**Михайлов Алексей Петрович**

ведущий специалист,  
ООО ПЛК Система  
(Россия, г. Москва, ул. Циолковского, 4)  
E-mail: krendeleschik@gmail.com

**Фадеев Евгений Дмитриевич**

студент,  
Пензенский государственный университет  
(Россия, г. Пенза, ул. Красная, 40)  
E-mail: mercenary.exe@gmail.com

**Mikhaylov Petr Grigor'evich**

doctor of technical sciences, professor,  
sub-department of information-measuring systems,  
Penza State University  
of Architecture and Construction  
(28 Germana Titova street, Penza, Russia)

**Glebova Tatyana Aleksandrovna**

associate professor,  
sub-department of information-measuring systems,  
Penza State University  
of Architecture and Construction  
(28 Germana Titova street, Penza, Russia)

**Sokolov Aleksandr Vladimirovich**

chief specialist-inspector  
of the State Construction Supervision  
in the Penza region  
(34a Popova street, Penza, Russia)

**Analieva Azhar Urazbaevna**

teacher,  
College at the scientific and educational complex,  
Kazakhstan University of Innovative  
and Telecommunication Systems  
(81 M. Mametovoy street, Uralsk, Kazakhstan)

**Mikhaylov Aleksey Petrovich**

leading specialist,  
LLC PLC System  
(4 Tsiolkovsky street, Moscow, Russia)

**Fadeev Evgeniy Dmitrievich**

student,  
Penza State University  
(40 Krasnaya street, Penza, Russia)

**Образец цитирования:**

Управление электрофизическими характеристиками поликремниевых структур микроэлектронных датчиков / П. Г. Михайлов, Т. А. Глебова, А. В. Соколов, А. У. Аналиева, А. П. Михайлов, Е. Д. Фадеев // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2019. – № 3 (29). – С. 102–110. – DOI 10.21685/2307-5538-2019-3-12.