

Integrated Strain-Sensitive Element Of Mechanical Transducer With Low Temperature Instability

Michael Y. Tikhomirov; Yuri M. Spalek;
Konstantin Y. Kharenko; Nester P. Giletsky;
Pavel N. Bogatov; Vyacheslav I. Yazovtsev;
Vyacheslav N. Borschev

Published in USSR-Ukraine, 1977:

Spalek, Y. M., Tikhomirov, M. Y., Kharenko, K. Y., Giletsky N. P., Yazovtsev V. I., Bogatov P. N., & Borshchev, V. N. (1977). Integral'nyi tenzochuvstvitel'nyi ehlement mekhanicheskikh velichin s maloi temperaturnoi nestabil'nost'yu parametrov [Integral strain-sensitive element of mechanical quantities with low temperature instability of parameters]. *Technology. Technology of Instrument Making: Collection of Scientific-Technical Documents /TsNTI "Poisk" (In Russian)*, 3(14), 19–27.

Abstract

The creation of a silicon integrated sensing element for a transducer of mechanical quantities with high temperature stability of measurements in the range from -60°C to $+80^{\circ}\text{C}$ is considered. The optimum impurity concentrations in p-type diffusion resistors when the bridge circuit is powered by a DC current source (DCV) and a DC current source (DCC) are selected.

To create semiconductor integrated transducers, it is necessary to solve two main problems:

- to reduce the dependence of the output signal of the measuring bridge circuit on the temperature;
- to exclude the influence of the clamp on the parameters of the sensing element when assembling a strain-gauge converter.

A possible solution of the first of them - ensuring high stability of measurements in a wide temperature range - is proposed in this article.

The main factors that determine the instability of the output signal are the strong temperature dependence of the strain-sensitivity of resistors and the scatter of values of the thermal resistance coefficient (TCR) of the resistor.

This paper considers the creation of an integrated sensing element for mechanical transducers with high conversion linearity and temperature stability in the range of $(-60 \div +80)^{\circ}\text{C}$. Fig. 1 shows a topological drawing of such a transducer in the form of a cantilever beam of n-type silicon, in which are formed: Wheatstone measuring bridge with p-type diffusion resistors $R_1 - R_4$; balancing resistors R_b ; compensation resistors R_c .

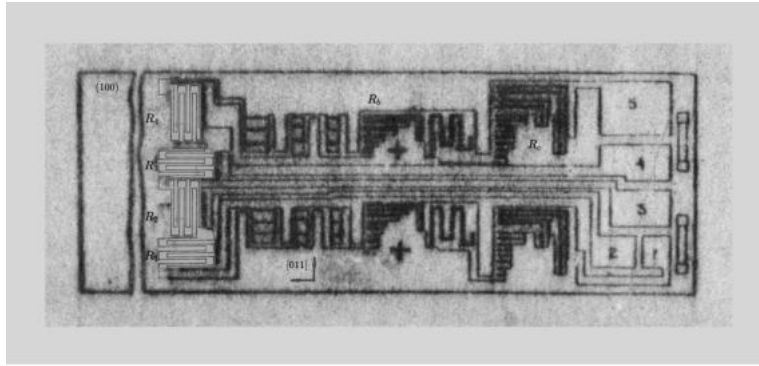


Fig.1 Topological drawing of the sensitive element of the strain-gauge transducer

The dependence of the output signal V_{out} on the load is practically linear, since the changes in resistance values of neighboring resistors in a bridge circuit are equal in magnitude and opposite in sign (case of a full bridge), for which they are placed in mutually perpendicular crystallographic directions [011]. Compensation of the initial output signal in the temperature range is carried out by a well-known method - introduction into the corresponding half-bridge of nichrome thin-film resistor R_c with TCR an order of magnitude smaller than that of diffusion strain gauges.

In this case, the output signal arising from the connection of R_c and technological variation in the values of nominal resistance of strain gauges, is brought to zero by the introduction of diffusion balancing resistors R_b .

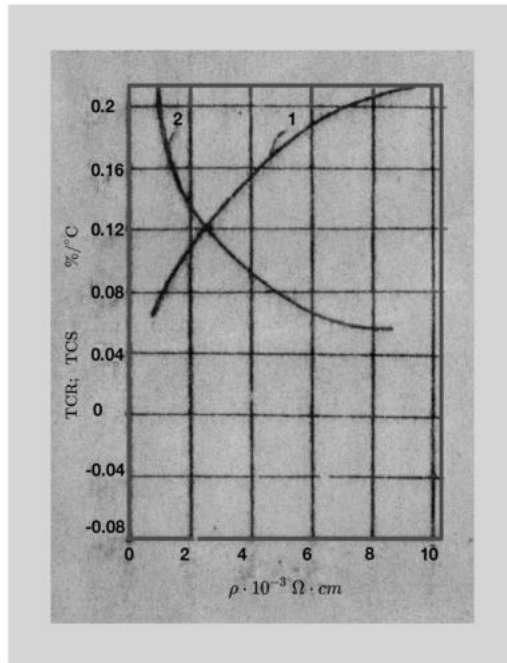


Fig.2 Temperature dependence of strain-sensitivity coefficients (1) and resistance (2) of p-type diffusion silicon layers on resistivity.

The main factor determining the dependence of strain-sensitivity on the temperature is the level of doping of the diffusion layers, i.e. resistivity ρ . It is known that for p-type silicon, if we consider the effect of piezoresistance in the crystallographic direction [011], the main factor is the shear piezoresistance coefficient π_{44} , which is inversely proportional to temperature [1]. If we consider the case of the bridge circuit power supply from a DC voltage generator, the smallest temperature dependence of the output signal should be observed at the lowest possible ρ , but this reduces the value of π_{44} , which determines the strain-sensitivity. The influence of temperature on the output signal can also be reduced at higher ρ values [2][3] by using stabilized current for power supply (DCC). In this case the output signal is independent of temperature if the temperature coefficient of resistance and sensitivity are equal in value and opposite in sign.

But the TCR and TCS values are determined primarily by the alloying level. To fulfill the thermal compensation conditions, a careful selection of diffusion layers in the range ρ ($1 \cdot 10^{-3} \div 1 \cdot 10^{-2}$) $\Omega \cdot cm$ is required. This is evidenced by our experimentally obtained dependences shown in Fig. 2.

In determining the required level of doping for the DCV and DCC cases, the effect of the resistivity of the diffusion resistors on the converter characteristics was investigated. For this purpose, test sensing elements (SE) were fabricated, the main steps of their fabrication are illustrated by the scheme shown in Fig. 3.

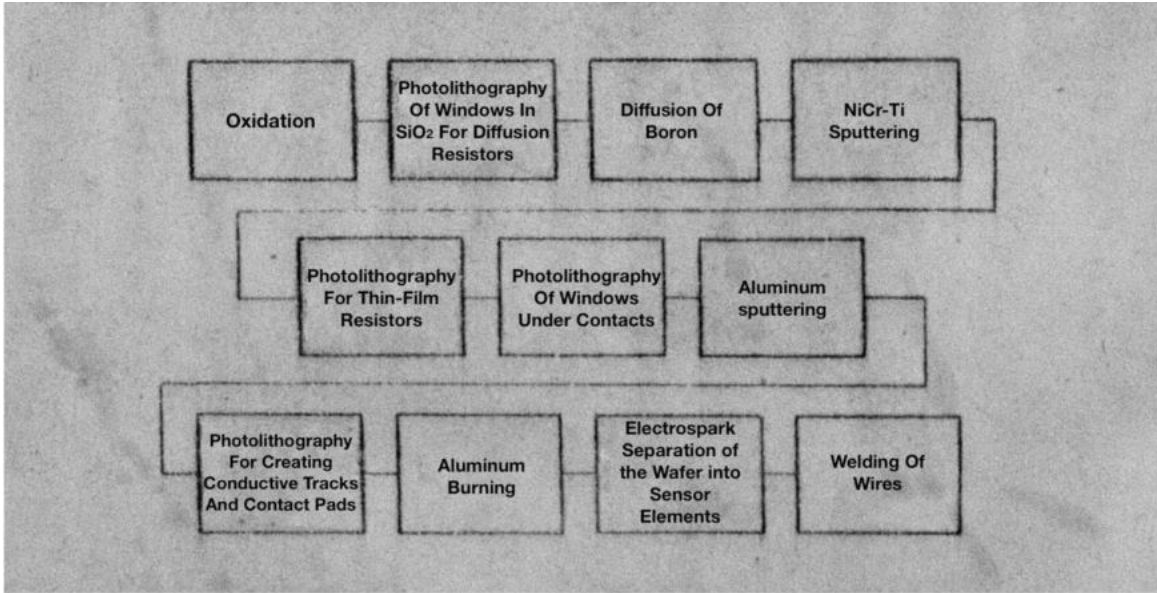


Fig.3. The main stages of creating a sensing element of a strain-gauge transducer.

When making measurements, it was necessary to exclude the influence of clamping on the magnitude and temperature dependence of the output signal of the studied sample. For this purpose, the specimens were fixed in "simulator beaker". The calculated epure of mechanical stresses within the *SE* console coincided with the epure of clamp console. The pinch point was located from the piezoresistors at a distance sufficient to ensure that the pinch effect did not exceed 0.5% of the nominal output signal, equal to 100mV. Measurements were taken over a temperature range of $(-60 \div +80)^{\circ}C$ in increments of $T = 20^{\circ}C$. When taking calibration characteristics, loading was carried out discretely ($\Delta P = 20 g$).

Let's analyze the characteristics obtained as a result of measurements. Fig. 4 shows comparative calibration characteristics of piezoresist samples ($1.4 \cdot 10^{-3} \div 5.6 \cdot 10^{-3}$) $\Omega \cdot cm$. The dependences

are characterized by the absence of nonlinearity, which can be easily explained by the high level of doping of p-type diffusion layers and a fairly accurate alignment of SE.

The relationship between the transfer coefficient K_{tr} , i.e., the ratio of the output signal to the supply voltage, and the shear piezoresistance coefficient is described by the following equation [4]:

$$K_{tr} = \frac{V_{out}}{V_{in0}} = \frac{1}{(2 + 2 \cdot \gamma)} \cdot \pi_{44} \cdot E \cdot \varepsilon_x , \quad (1)$$

where ε_x is the relative strain in the piezoresistor location area; E is the Young's modulus; γ is the Poisson's ratio.

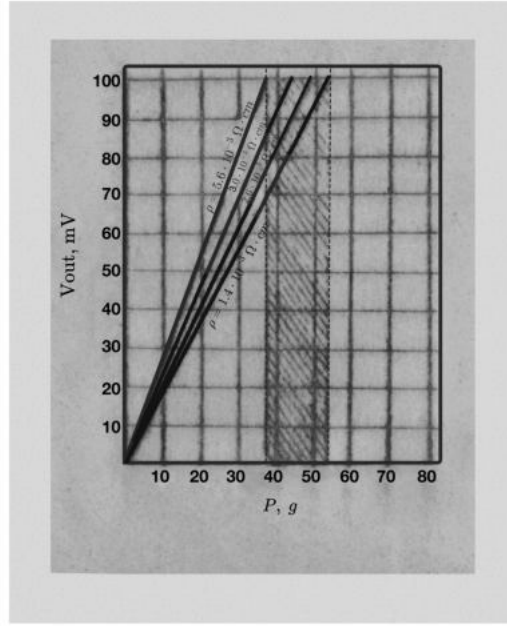


Fig.4. Graduation characteristics of the sensitive element for different values of resistivity.

The increase in sensitivity with increasing ρ is explained by the increase in the piezoresistance coefficient π_{44} with decreasing impurity concentration.

The graphs in Fig. 5 and Fig. 6 show the temperature curves of the relative change in the output signal of the bridge circuits. The load at the end of the console is selected so that the output signal under normal conditions equals 1 of the supply voltage, i.e. 100mV.

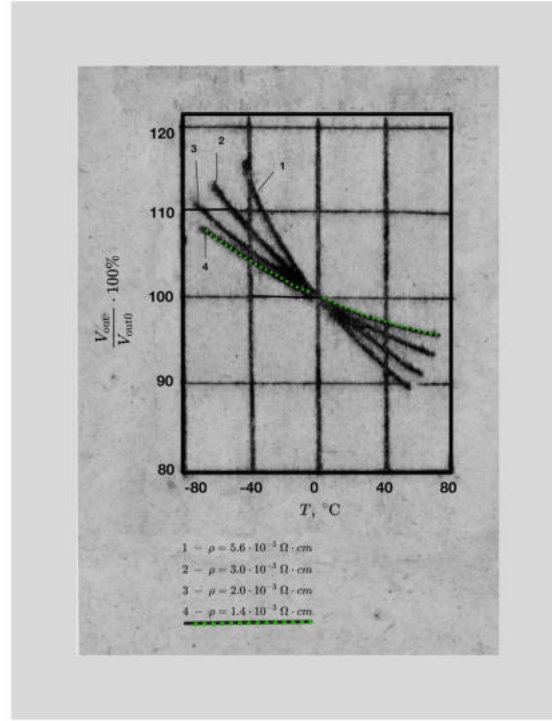


Fig.5. Dependencies of the relative change of output voltage on temperature for the case of DCV power supply.

The temperature effect on the output signal when powered by DCV can be analytically described by the equation obtained by differentiating expression (1):

$$\frac{1}{V_{out0}} \frac{dV_{out}}{dT} = \frac{1}{\pi_{44}} \frac{d\pi_{44}}{dT} \quad (2)$$

where $\frac{1}{\pi_{44}} \frac{d\pi_{44}}{dT}$ is the TCS value.

Thus, the output signal drift in the operating temperature range depends on the temperature coefficient of the piezoresistance π_{44} . In other words, the smaller the TCS, the more stable the characteristics of the SE. In Fig. 5 the highest stability corresponds to $\rho = 1.4 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{cm}$.

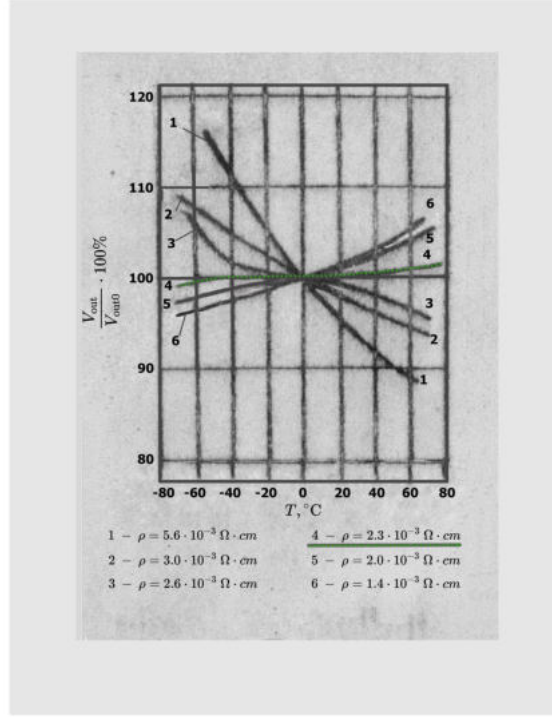


Fig.6. Dependences of the relative change of output voltage on temperature for the case of DCC power supply.

Let's estimate the influence of temperature on the signal of the measuring circuits of the bridge powered from DCC. Let's differentiate expression (1) for the case of constant supply current I_{in0} ($V_{in}(T) = R_{in}(T) \cdot I_{in0}$):

$$\frac{1}{V_{out0}} \frac{dV_{out}}{dT} = \left(\frac{1}{R_{in}} \frac{dR_{in}}{dT} + \frac{1}{\pi_{44}} \frac{d\pi_{44}}{dT} \right) \quad (3)$$





where $\frac{1}{R_{in}} \frac{dR_{in}}{dT}$ is the TCR value.

Here, the course of the temperature dependence of the output signal is determined by the relations TCR and TCS. Consider the dependences shown in Fig. 2. For $\rho > 2.3 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot cm$ the negative TCS is greater than the positive TCR (modulo), which means that the law of variation V_{out} must obey the law of variation π_{44} in the temperature range, which is confirmed by curves for $\rho = 5.6 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot cm$ and $\rho = 3 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot cm$. For $\rho < 2.3 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot cm$ the TCR value is greater than TCS (modulo) and the temperature travel of the resistance is of paramount importance. It is visually (see Fig.5 and Fig.6), that at application of direct current (DCC), for measuring circuits consisting of diffusion silicon p-type piezoresistors with resistivity $(2.1 \cdot 10^{-3} \div 2.4 \cdot 10^{-3}) \Omega \cdot cm$ there is a sharp decrease of temperature dependence of output signal. For example, compare the case of the lowest output instability $\frac{V_{out}}{V_{out0}} \cdot 100\%$:

- for DCC at $\rho = 2.3 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot cm$;
- for DCV at $\rho = 1.4 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot cm$.

Thus, we can consider the problem of creating integrated strain gauge transducers having in the range $(-60 \div +80)^{\circ}\text{C}$ the temperature instability of the output signal $\pm 0.014\text{ \%}/^{\circ}\text{C}$.

References

1. Smith, C. S. (1954). Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon. *Physical Review*, 94(1), 42–49. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.94.42>

2. Erler, W., & Walter, L. (1974). *Ehlektricheskie izmereniya neelektricheskikh velichin poluprovodnikovymi tenzorezistorami. [Electrical measurements of non-electrical quantities by semiconductor strain gauges.]: Vol. (In Russian)* (Y. v. Malkov, Ed.). MIR.

3. M. (Ed.) Dean. (1962). *Semiconductor and conventional strain gages*. Academic Press, New York.
https://openlibrary.org/books/OL19651478M/Semiconductor_and_conventional_strain_gages

4. Bogatov, P. N., Borschev, V. N., Spalek, Y. M., & Tikhomirov, Michael. Y. (1976). Kremnievyi chuvstvitel'nyi ehlement dlya datchikov sil, uskorenii, vibratsii.[The silicon sensing element for sensors of forces, accelerations, vibrations]. *Tekhnologiya. Tekhnologiya Priborostroeniya: Nauch.-Tekhn.Sb. TSNTI "Poisk" (In Russian)*, 14(2), 17–27.


**Integral'nyi tenzochuvstvitel'nyi ehlement mekhanicheskikh
velichin s maloi temperaturnoi nestabil'nost'yu parametrov
[Integral strain-sensitive element of mechanical quantities with
low temperature instability of parameters].**

Spalek, Y. M., Tikhomirov, M. Y., Kharenko, K. Y., Giletsky Nester P., Yazovtsev
Vyacheslav I., Bogatov Pavel N., & Borshchev, V. N.

*Technology. Technology of Instrument Making: Collection of Scientific-Technical
Documents /TsNTI "Poisk" (In Russian), 3(14), 19-27. 1977*

A copy of the article in Russian

1977

УДК 621.382

**"ИНТЕГРАЛЬНЫЙ" ТЕНЗОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЭЛЕМЕНТ
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН С
МАЛОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТЬЮ
ПАРАМЕТРОВ**

Кандидаты техн. наук В.И. Язовцев, П.Н. Богатов,
инженеры В.Н. Борщев, Ю.М. Спалец, М.Д. Тихомиров,
Н.П. Умладский, К.Д. Харенико

Рассмотрены вопросы создания кремниевого интегрального чувствительного элемента для преобразователя механических величин с высокой температурной стабильностью измерения в диапазоне от -60°C до $+60^{\circ}\text{C}$. Выбрана оптимальная концентрация примеси диффузионных тензорезисторов р-типа для случая питания

мостовой схемы как от генератора напряжения, так и от генератора тока.

Для создания полупроводниковых интегральных преобразователей необходимо решить две основные проблемы:

- уменьшить зависимость выходного сигнала измерительной мостовой схемы от температуры;
- исключить влияние закрепления на параметры чувствительного элемента при сборке тензопреобразователей.

Возможное решение первой из них - обеспечение высокой стабильности измерения в широком диапазоне температур - предлагается в данной статье.

Основными факторами, определяющими нестабильность выходного сигнала, являются сильная температурная зависимость тензочувствительности резисторов и разброс температурных коэффициентов сопротивления (ТКС) материала резисторов.

В настоящей работе рассмотрены вопросы создания интегрального чувствительного элемента для преобразователей механических воздействий с высокой линейностью преобразования и температурной стабильностью в диапазоне -60°C до $+80^{\circ}\text{C}$. На рис. 1 показан технологический рисунок такого преобразователя в виде консольной балки из кремния P-типа, в которой сформированы: измерительный мост Уитстона — диффузионные тензорезисторы P-типа $R_1 - R_4$; балансирующие резисторы R_5 и компенсационные резисторы R_K .

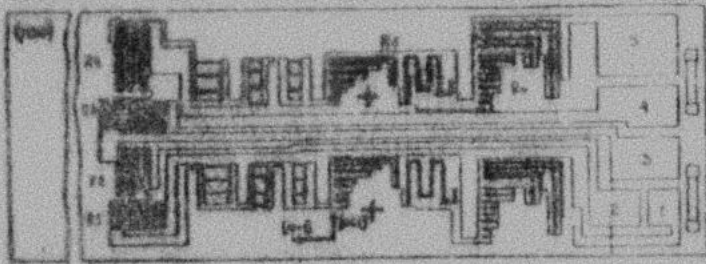


Рис. 1. Технологический рисунок чувствительного элемента тензорезистора.

Зависимость выходного сигнала $U_{\text{вых}}$ от нагрузки практически линейна, так как изменения сопротивления смежных тензорезисторов в мостовой схеме равны по величине и противоположны по знаку (случай полного моста), для чего они и расположены по взаимно перпендикулярным направлениям $[011]$ и $[0\bar{1}\bar{1}]$. Компенсация ухода начального выходного сигнала в температурном диапазоне осуществляется известным методом — включением в соответствующий плечо моста никромового тонкопленочного резистора R_K с ТКЗ на порядок меньшим, чем у диффузионных.

При этом выходной сигнал, возникший из-за подклимчения R_K и технологического разброса величин номинального сопротивления тензорезисторов, приводится к нулю введением диффузионного балансирующего резистора R_5 .

Основным фактором, определяющим зависимость тензочувствительности от температуры, является уровень легирования диффузионных слоев, т.е. удельное сопротивление ρ . Известно, что в кремнии P-типа, если рассматривать эффект пьезосопротивления в кристаллографическом направлении $[011]$ [1], основным является единственный коэффициент пьезосопротивления π_{11} , который обратно пропорционально зависит от температуры. Если рассматривать случай питания мостовой схемы от источника напряжения, то наименьшая температурная зависимость выходного сигнала должна наблюдаться при минимально возможном ρ , но при этом уменьшается величина π_{11} , которая определяет тензочувствительность моста. Влияние температуры на выходной сигнал можно уменьшать и при более высоких значениях ρ [2,3], используя для питания стабилизированный ток. В этом случае выходной сигнал не зависит от температуры, если температурный коэффициент сопротивления и чувствительности равны по величине и противоположны по знаку.

Но величины ТКЗ и ТКЧ определяются в первую очередь уровнем легирования. Для выполнения условий термокомпенсации, необходим тщательный подбор диффузионных слоев в диапазоне ρ от $1 \cdot 10^{-3} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ до $1 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}\cdot\text{см}$, о чем свидетельствуют экспериментально полученные нами зависимости, показанные на рис. 2.

При определении необходимого уровня легирования как для случая генератора напряжения, так и для случая генератора тока, проводилось исследование влияния удельного сопротивления

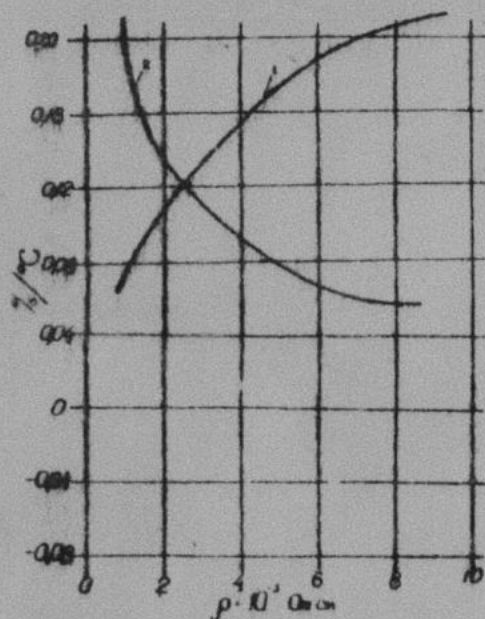


Рис. 2. График зависимости температурных коэффициентов чувствительности (1) и сопротивления (2) диффузионных слоев кремния Р-типа от удельного сопротивления.

диффузионных тензорезисторов на характеристики преобразователя. С этой целью были изготовлены опытные образцы чувствительных элементов (ЧЭ), основные этапы создания которых иллюстрирует схема, представленная на рис. 3.

В измерениях понадобилось исключить влияние закрепления на величину и температурную зависимость выходного сигнала исследуемого образца. Для этого образцы заземлялись в станках-имитаторах. Расчетная эпюра механических напряжений в пределах консоли ЧЭ при этом совпадала с эпюрой консольного заземления, а место заземления находилось от тензорезисторов на

расстоянии, достаточном, чтобы влияние закрепления не превышало 0,5% от номинального выходного сигнала, равного 100 мВ. Измерения проводились в температурном диапазоне $-60 + +80^\circ\text{C}$ с шагом $T=20^\circ\text{C}$. При снятии градуировочных характеристик нагружение осуществлялось дискретно ($\Delta P=20 \text{ г}$).



Рис. 3. Основные этапы создания чувствительного элемента тензопреобразователя.

Проведем анализ характеристик, полученных в результате измерений. На рис. 4 представлены сравнительные градуировочные характеристики образцов с удельным сопротивлением тензорезисторов от $1,4 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{см}$ до $5,6 \cdot 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{см}$. Зависимости характеризуются отсутствием нелинейности, что нетрудно объяснить высоким уровнем легирования диффузионных слоев Р-типа и довольно точной отстройкой чувствительного элемента.

Связь между коэффициентом передачи $K_{\text{пер}}$, т.е. отношением выходного сигнала к питающему напряжению, и сдвиговым коэффи-

элементом пьезосопротивления описывается следующим уравнением

[4]:

$$K_{\text{пир}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{пит}}} = \frac{1}{2+2\nu} \pi_{\text{чч}} E \epsilon_x, \quad (1)$$

где ϵ_x — относительная деформация в области расположения резисторов;

E — модуль Юнга;

ν — коэффициент Пуассона.

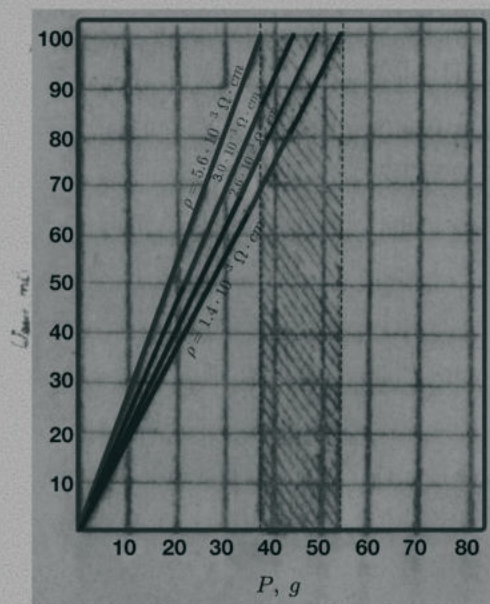


Рис. 4. Градуировочные характеристики чувствительного элемента для различных значений удельного сопротивления.

Увеличение чувствительности с ростом ρ объясняется увеличением коэффициента пьезосопротивления $\pi_{\text{чч}}$ с уменьшением концентрации примесей.

Графики, приведенные на рис. 5 и 6, показывают ход температурных кривых относительно изменения выходного сигнала мостовых

схем. Нагрузка на мостовую подбирается такой, чтобы величина выходного сигнала в нормальных условиях равнялась 1% от питающего напряжения, т.е. 100 мВ.

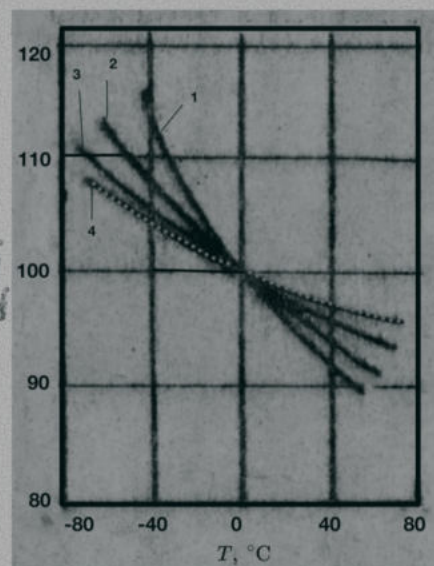


Рис. 5. График зависимости относительного изменения выходного напряжения от температуры для случая питания от генератора напряжения.

- 1 — $\rho = 5.6 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$
- 2 — $\rho = 3.0 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$
- 3 — $\rho = 2.0 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$
- 4 — $\rho = 1.4 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$

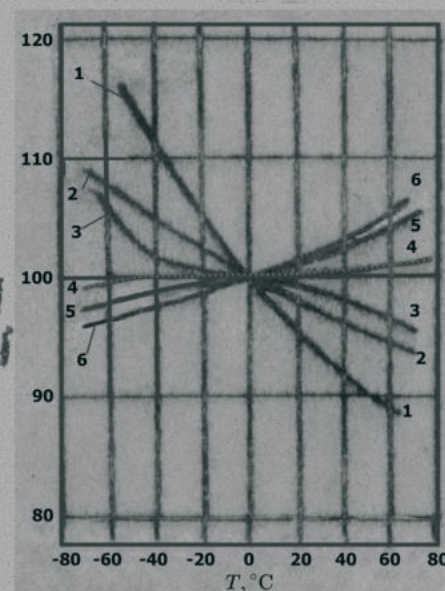


Рис. 6. График зависимости относительного изменения выходного напряжения от температуры для случая питания от генератора тока.

- 1 — $\rho = 5.6 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$
- 2 — $\rho = 3.0 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$
- 3 — $\rho = 2.6 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$
- 4 — $\rho = 2.3 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$
- 5 — $\rho = 2.0 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$
- 6 — $\rho = 1.4 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot \text{см}$

Температурное влияние на выходной сигнал при питании от генератора напряжения можно аналитически описать уравнением, полученным в результате дифференцирования выражения (1):

$$\frac{1}{U_{\text{вых}_0}} \frac{dU_{\text{вых}}}{dT} = \frac{1}{\pi_{\text{чч}}} \frac{d\pi_{\text{чч}}}{dT}, \quad (2)$$

где $\frac{1}{\pi_{\text{чч}}} \frac{d\pi_{\text{чч}}}{dT}$ — величина ТКЧ.

Таким образом, уход выходного сигнала в рабочем диапазоне температур полностью зависит от температурного коэффициента пьезосопротивления. Другими словами, чем меньше ТКЧ, тем более стабильны характеристики ЧЗ (на приведенном рис. 5 наибольшая стабильность соответствует $\rho = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$).

Оценим влияние температуры на сигнал измерительной схемы моста ЧЗ, питаемого от генератора тока. Продифференцируем выражение (1) для случая генератора тока:

$$\frac{1}{U_{\text{вых}}} \frac{dU_{\text{вых}}}{dT} = \left(\frac{1}{R_{\text{ex}}} \frac{dR_{\text{ex}}}{dT} + \frac{1}{R_{\text{чч}}} \frac{dR_{\text{чч}}}{dT} \right) \quad (3)$$

где $\frac{1}{R_{\text{ex}}} \frac{dR_{\text{ex}}}{dT}$ — величина температурного коэффициента сопротивления.

Теперь ход температурной зависимости выходного сигнала определяется соотношением ТКЧ в ТКЧ. Рассмотрим зависимости, приведенные на рис. 6 и рис. 2. Для $\rho > 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ отрицательный ТКЧ имеет величину по модулю большую, чем положительный ТКЧ, а значит, закон изменения $U_{\text{вых}}$ должен подчиняться закону изменения $R_{\text{чч}}$ в температурном диапазоне, что подтверждается кривыми для $\rho = 5,6 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ и $8 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$. Для $\rho > 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$ величина ТКЧ по модулю больше ТКЧ, и основной величиной является температурный ход сопротивления тензорезисторов. Наглядно, что при питании от генератора тока мостовой измерительной схемы, составленной из диффузионных кремниевых тензорезисторов в Р-типа с увеличенным сопротивлением $(2,1 \pm 2,4) \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см}$, наблюдается резкое уменьшение температурной зависимости выходного сигнала. Для примера средним случаем наименьшей нестабильности выходного сигнала $\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}0}} 100\%$:

- для генератора тока при $\rho = 2,3 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см} - 12\%$;
- для генератора напряжения при $\rho = 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} \cdot \text{см} - 17\%$.

Таким образом, можно считать решенной проблему создания интегральных тензопреобразователей, имеющих в диапазоне температур от -60°C до $+80^\circ\text{C}$ температурную нестабильность выходного сигнала $\pm 0,014\%/^\circ\text{C}$.

ЛИТЕРАТУРА

1. C. Smith. Piezoresistive effect in silicon and germanium, Phys. Rev., Vol 94, p. 42, 1954.
2. В. Эрлер, А. Вальтер. Электрические измерения неэлектрических величин полупроводниковыми тензорезисторами, "Мир", М., 1974.
3. М. Мин. Полупроводниковые тензодатчики. "Энергия", М., 1965.
4. В. Н. Богатов, В. Н. Борцов, В. М. Спалек, М. Ю. Тихомирсов. Кремниевый чувствительный элемент для датчиков сил, ускорений, вибраций, - Изв. АН СССР, сер. XIV, "Технология приборостроения", вып. 2, 1976.