

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ТЕМПЕРАТУРЫ ДЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

В. Н. Чернышов¹, А. П. Королев²✉

*Кафедры: «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции» (1),
«Материалы и технология», korolevanpal@yandex.ru (2),
ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия*

Ключевые слова: зависимость выходного тока от температуры; конструкторско-топологические параметры; первичный измерительный преобразователь температуры; полевая структура; режим обогащения основными носителями заряда; чувствительность.

Аннотация: Проведен сравнительный анализ эксплуатационных характеристик (диапазона измерения температуры, потребления энергии) металлических и полупроводниковых первичных измерительных преобразователей (ПИП) температуры, который показал значительное преимущество и целесообразность проектирования и применения полупроводниковых преобразователей. Построена математическая модель, описывающая зависимость выходного тока разрабатываемого ПИП на основе МДП-структуры от температуры с учетом основных конструкторско-топологических и электрофизических параметров структуры. Рассмотрено влияние конструкторско-топологических и электрофизических параметров на потребление энергии преобразователем, что является важным в авиационной технике. Используя разработанную и подтвержденную экспериментально математическую модель, рассчитаны выходные характеристики при разных условиях. Проведен анализ и исследование результатов моделирования в целях выявления оптимальных конструкторско-топологических и электрофизических параметров, при которых спроектированный ПИП потребляет малое количество энергии. В результате получена и описана конструкция ПИП температуры на основе структуры «металл – диэлектрик – полупроводник» с конструкторско-топологическими и электрофизическими параметрами, обеспечивающими малое потребление энергии, что позволит эффективно его использовать в летательных аппаратах.

Введение

Измерение температуры осуществляется в различных областях, таких как промышленность, медицина, авиация, оборона и т.д. В авиационной технике контроль температуры играет важную роль в системах электронного обеспечения. Сегодня ограничение по потребляемой энергии – основное требование к первичным измерительным преобразователям (ПИП) температуры в автономном управлении. Преобразователи температуры по материалу изготовления можно разделить на два класса: металлические и полупроводниковые, принцип работы которых основан на изменении величины удельной электропроводимости в зависимости от температуры.

Материал для металлического термометра сопротивления должен иметь высокий температурный коэффициент сопротивления, низкую электропроводность, однородность состава, устойчивость к окислительным процессам, высокую температуру плавления. Температурный коэффициент сопротивления металлических тонких пленок – напыленных термопар [1] и терморезисторов [2], по модулю гораздо меньше, чем у монокристаллических полупроводников. Причем, меньший температурный коэффициент сопротивления существенно уменьшает чувствительность. Еще одним недостатком металлических терморезисторов является низкое удельное сопротивление, что создает проблемы при их коммутации с измерительной аппаратурой, имеющей невысокое входное сопротивление.

В настоящее время находят широкое применение преобразователи температуры на монокристаллических полупроводниках с высокой надежностью [3], которые имеют следующие преимущества – более высокое удельное сопротивление, высокий температурный коэффициент сопротивления и устойчивость к окислению при росте температуры. Достаточно давно для измерения температуры применяются диоды, включенные в схему с обратной проводимостью. Такие приборы хорошо выполняют функцию преобразователя температуры, но в узком диапазоне. Возможно создание высокочувствительных ПИП температуры на основе транзисторов [4]. Значительные перспективы применения имеют полевые структуры металл – диэлектрик – полупроводник, на основе которых можно спроектировать ПИП температуры с малым потреблением энергии.

Известны ПИП температуры на полупроводниках [5 – 7], применяемые в космической технике, построенные на основе комплементарной структуры металл – диэлектрик – полупроводник (КМДП) – пары n - и p -канального транзисторов. Указанные ПИП температуры, представляющие собой КМДП-транзисторы, имеют относительно низкое потребление энергии. Следует отметить, что данные преобразователи работают в предпороговой области в режиме инверсии основных носителей заряда, напряжение питания которых составляет 0,8 В. Потребление энергии можно понизить уменьшением напряжения питания, применяя более совершенную структуру ПИП в предпочтительном режиме работы – обогащения основными носителями заряда.

Цель работы – создание первичного измерительного преобразователя температуры, имеющего следующие характеристики: низкое напряжение питания (важное для применения в летательных аппаратах); высокую чувствительность; малые массогабаритные размеры.

Модель, описывающая выходную характеристику разрабатываемого ПИП

Отличительной особенностью предлагаемого ПИП, сформированного на кремниевой подложке n -типа [8] (легированной донорной примесью), является работа в режиме обогащения основными носителями заряда – электронами. На затвор подается положительный потенциал, и созданное им поле формирует между истоком и стоком канал из электронов – основных носителей заряда (режим обогащения). Отличие от приведенных в работах [5 – 7] преобразователей – потенциал на затворе при работе в режиме обогащения не имеет порогового значения, следовательно, электропроводность в канале существует при любом значении потенциала на затворе, самом малом, что значительно уменьшает потребление энергии. Принцип работы преобразователя температуры основан на термогенерации носителей заряда. С ростом температуры происходит ионизация примесных и собственных атомов полупроводника, отдающих электроны, что приводит к увеличению удельной электропроводности.

Для ПИП температуры разработана модель, описывающая выходную характеристику – зависимость тока стока I_D от температуры [9]

$$I_D = \frac{Z}{L} V_{SD} \mu_n \left[-V_G + \left(V_D + \frac{2kT}{e} \ln \frac{N_D}{BT^{3/2} \exp\left(-\frac{E_G(0)}{2kT}\right)} \right) \right] \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_i}{d},$$

где I_D – ток стока ПИП, А; Z, L – ширина и длина канала ПИП соответственно, см; V_{SD} – напряжение между истоком и стоком, В; μ_n – подвижность основных носителей заряда электронов; V_G, V_D – напряжения на затворе и стоке соответственно, В; k – постоянная Больцмана, Дж/К; T – температура, К; e – заряд электрона, Кл; N_D – концентрация донорных атомов, см⁻²; ε_0 – абсолютная диэлектрическая проницаемость; ε_i – относительная диэлектрическая проницаемость подзатворного диэлектрика, Ф/см; d – толщина подзатворного диэлектрика, см; $E_G(0) = 1,17$ эВ – ширина запрещенной зоны полупроводника, экстраполированная к $T = 0$ К.

Температурная зависимость концентрации собственных носителей заряда электронов [10]

$$n_i(T) = BT^{3/2} \exp[-E_G(0)/(2kT)],$$

где $B = 3,873 \cdot 10^{16} \text{ К}^{-3/2} \cdot \text{см}^{-3}$.

К решению технической задачи для достижения поставленной цели применен комплексный подход. Проведено исследование влияния каждого электрофизического параметра (потенциалов на затворе V_G и стоке V_D соответственно, концентрации примеси N_D) и конструкторско-топологических параметров (ширины Z и длины L канала, толщины подзатворного диэлектрика d) на требуемые характеристики. В результате получено достаточно низкое напряжение питания при высокой чувствительности.

Для определения электрофизических и конструкторско-топологических параметров ПИП температуры проведены необходимые расчеты, используя представленную модель. Для достижения цели снижения потребляемой энергии сделан расчет зависимостей влияния параметров ПИП температуры на напряжение питания.

Наиболее оптимальные с точки зрения экономии питающего напряжения при сохранении чувствительности характеристики изображены на рис. 1, где показано: *зависимость 1* – для нелегированного кремния; потенциалы на затворе V_G и стоке V_D равны 0,001 и 0,006 В соответственно; толщина подзатворного диэлектрика $d = 5\text{E}-6$ см; ширина канала $Z = 0,05$ см; длина канала $L = 4\text{E}-5$ см; *зависимость 2* – для нелегированного кремния; потенциал на затворе $V_G = 0,001$ В; потенциал на стоке $V_D = 0,002$ В; толщина подзатворного диэлектрика $d = 5\text{E}-6$ см; ширина канала $Z = 0,1$ см; длина канала $L = 4\text{E}-5$ см; *зависимость 3* – для легированного кремния с концентрацией донорной примеси $N_D = 10^2 \text{ см}^{-2}$; потенциал на затворе $V_G = 0,003$ В; потенциал на стоке $V_D = 0,005$ В; толщина подзатворного диэлектрика $d = 5\text{E}-6$ см; ширина и длина канала соответственно $Z = 0,1$ см и $L = 4\text{E}-5$ см.

При изменении потенциала на затворе V_G выходные характеристики незначительно отличаются между собой. При большем значении потенциала на затворе V_G

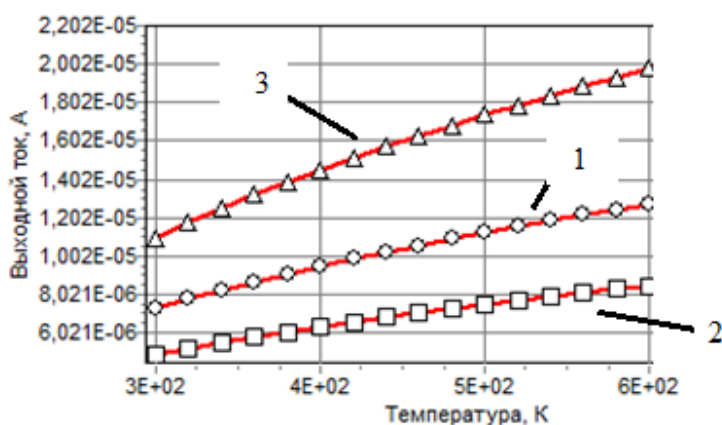


Рис. 1. Зависимость тока стока I_D от температуры

уровень тока несколько выше, чем при меньшем, что объясняется увеличением концентрации носителей заряда под затвором. Согласно зависимости, в полупроводнике с ростом концентрации электронов n удельная электропроводимость σ растёт, соответственно растёт и уровень тока

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p),$$

где n, p – концентрации электронов и дырок соответственно; μ_n, μ_p – подвижности электронов и дырок соответственно.

При уменьшении отношения напряжений на затворе и стоке V_G/V_D незначительно увеличивается крутизна выходной характеристики – чувствительность ПИП. Это объясняется тем, что устраняется шунтирующее действие потенциала на затворе. Электроны меньше рассеиваются на поверхности подложки под изолированным затвором и более направленно движутся в канале от истока к стоку. Для рассмотренных значений потенциала на затворе V_G выходные характеристики (зависимости тока стока от температуры) незначительно отличаются друг от друга. Следовательно, целесообразно на затвор подавать невысокий потенциал $V_G = 0,001$ В, который обеспечивает малое напряжение питания ПИП и не является пробивным напряжением тонкого подзатворного диэлектрика.

Важной характеристикой предлагаемого ПИП являются и конструктивно-топологические параметры – ширина канала $Z = 0,1$ см, длина канала $L = 4E-5$ см. Габариты узкие. Малая площадь и узкий габарит обеспечивают значительный отвод тепла. Следовательно, ширина канала $Z = 0,1$ см является приемлемой и оптимальной, обеспечивает высокую чувствительность и преимущества в габаритах. Проектируемый преобразователь температуры выполнен в виде меандра (рис. 2).

Из результатов вышеприведенного исследования следует вывод, что наиболее оптимальными электрическими и конструктивно-

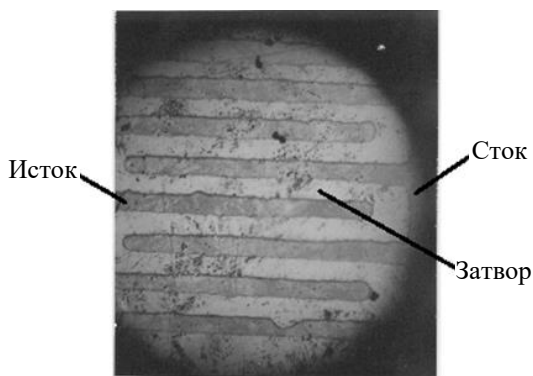


Рис. 2. Микрофотография топологии лабораторного образца

топологическими параметрами ПИП являются потенциалы на затворе $V_G = 0,001$ В и стоке $V_D = 0,005$ В, толщина подзатворного диэлектрика $d = 5\text{E-}6$ см, длина и ширина канала соответственно $L = 4\text{E-}5$ и $Z = 0,1$ см.

Рассмотрим, как влияет примесь на требуемые к ПИП характеристики – низкое напряжение питания, высокую чувствительность, малые массогабаритные размеры, диапазон измерения и линейность.

В данном случае большую чувствительность при малом напряжении питания имеет зависимость с большей концентрацией примеси, но меньшей линейности. Меньшая линейность объясняется тем, что при повышении температуры сначала ионизируются примесные атомы и собственные – характеристика более круто возрастает, затем, когда все примесные атомы отдали лишние электроны, ионизируются только собственные – крутизна характеристики уменьшается. Наблюдается плавный перелом значения функции в зависимости тока от температуры, который делит характеристику на два более линейных диапазона измерения температуры. При значительной концентрации примеси чувствительность будет уменьшаться, так как при большой концентрации свободных носителей заряда их подвижность, от которой зависит удельная электропроводимость полупроводника, уменьшается в результате увеличения рассеивания на примесных атомах. При большой концентрации примеси полупроводник может превратиться в вырожденный, который имеет металлический характер проводимости, то есть уменьшение проводимости с ростом температуры. В результате проведенных исследований оптимальным легированием является концентрация примеси $N_D = 10^2 \text{ см}^{-2}$, которая обеспечивает чувствительность $30 \text{ нА/}^\circ\text{C}$ и малое потребление напряжения питания $V_D = 0,005$ В.

После анализа полученных характеристик разрабатываемого ПИП определялись усредненные параметры. Выходная характеристика показана на рис. 3, где концентрация донорной примеси $N_D = 10^2 \text{ см}^{-2}$; потенциалы на затворе V_G и стоке V_D равны $0,001$ и $0,005$ В соответственно; толщина подзатворного диэлектрика $d = 5\text{E-}6$ см; ширина и длина канала соответственно $Z = 0,1$ см и $L = 4\text{E-}5$ см.

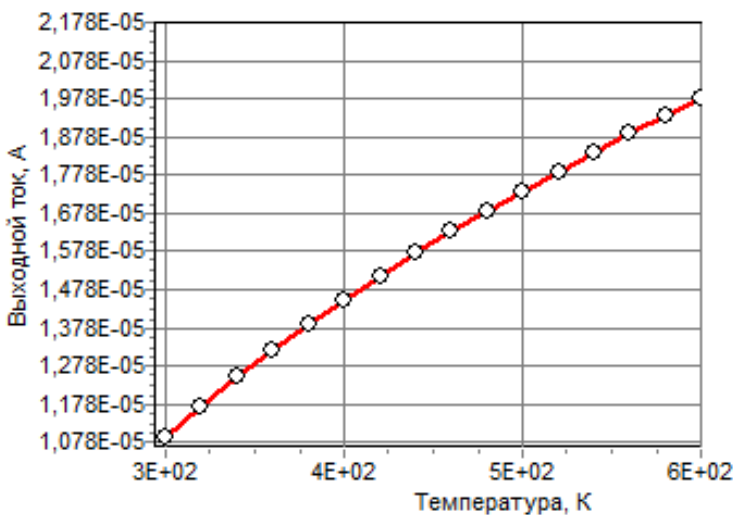


Рис. 3. Зависимость тока стока I_D от температуры для легированного кремния

Чувствительность такой характеристики достаточно высокая – 30 нА/°С при малом потреблении энергии (больше, чем в рассматриваемых ранее приборах для измерения температуры, которая составляет 0,024 нА/°С).

Понижение энергопотребления ПИП достигается учетом большего числа электрофизических и конструкторско-топологических параметров преобразователя в математическом выражении выходной характеристики и применением режима работы не в режиме инверсии, а обогащением основными носителями заряда. Режим обогащения не требует подачи порогового напряжения, что приводит преобразователь в рабочее состояние при любом потенциале на затворе. Потребление энергии разрабатываемого преобразователя температуры регулируется электрофизическими и конструкторско-топологическими параметрами, входящими в зависимость, описывающую выходную характеристику, такими как: потенциалы на затворе и стоке, концентрация примеси, ширина и длина канала, толщина подзатворного диэлектрика.

Для эксперимента изготовлен опытный образец с оптимальными параметрами: длина и ширина канала $L = 4\text{E}-5$ см и $Z = 0,1$ см соответственно, толщина подзатворного диэлектрика $d = 5\text{E}-6$ см, при потенциале на затворе $V_G = 0,001$ В и на стоке $V_D = 0,005$ В, концентрация донорной примеси $N_D = 10^{22}$ см⁻³. При изготовлении опытного образца ПИП подзатворный диэлектрик формировался только в сухом кислороде без использования паров воды в целях получения очень тонкого и качественного оксида кремния. На рисунке 4 представлены экспериментальная выходная характеристика – зависимость выходного тока от температуры, и рассчитанная.

Эксперимент показал, что чувствительность ПИП составляет (28...30) нА/°С, которая является высокой среди преобразователей такого класса, линейность удовлетворяет требованиям при малом потреблении напряжения V_D в интервале 0,005...0,006 В. Максимальное различие выходных характеристик, рассчитанной теоретически и полученной экспериментально, составляет не более 5 – 6 %.

Спроектированный ПИП потребляет мало энергии, что очень важно при использовании в авиационной технике. Потенциал подается на затвор ПИП $V_G = 0,001...0,0015$, напряжение питания на стоке $V_D = 0,005...0,006$ В, что позволяет уменьшить потребление энергии, которое важно для использования ПИП в авиационной технике с ограничением источников питания, и может увеличить срок службы. К преимуществу перед преобразователем на КМДП-транзисторах

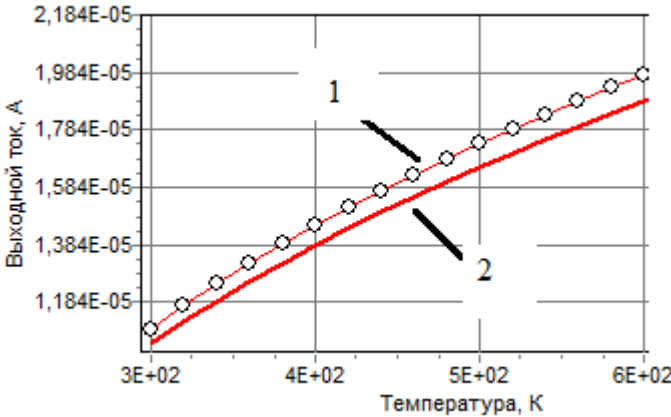


Рис. 4. Рассчитанная 1 и экспериментальная 2 зависимости тока стока I_D от температуры

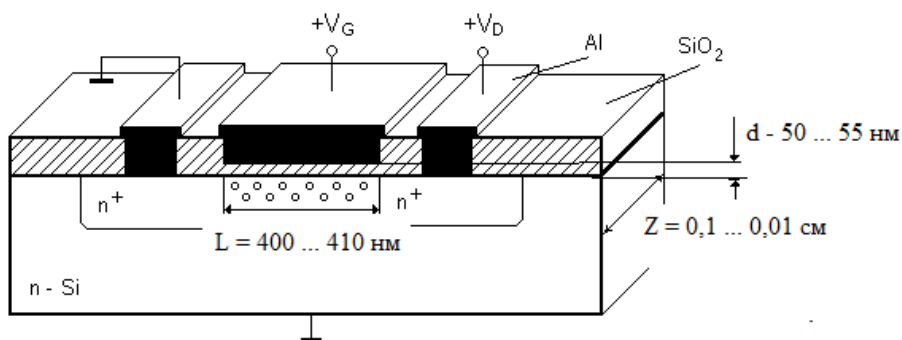


Рис. 5. Структура разработанного ПИП температуры:

Al – алюминиевые контакты; SiO₂ – оксид кремния; n – тип проводимости (электронный)

следует отнести и тот факт, что проектируемый ПИП используется в виде одной ячейки, в то время как на КМДП – четыре ячейки. Это позволяет уменьшить потребление энергии в 4 – 5 раз.

Структура разработанного ПИП с топологическими размерами представлена на рис. 5.

Заключение

Проведенный анализ показал, что металлические преобразователи имеют малый температурный коэффициент сопротивления, следовательно, малую чувствительность и точность измерения; низкое удельное сопротивление, которое создает проблемы при их коммутации с измерительной аппаратурой, имеющей невысокое входное сопротивление.

Разработана математическая модель, описывающая зависимость выходного тока от температуры ПИП на основе МДП-структуры, позволяющая определить оптимальные значения электрофизических и конструкторско-топологических параметров, обеспечивающих высокую чувствительность и, как следствие, точность измерения температуры. Предложен режим работы разработанного ПИП температуры при обогащении основными носителями заряда в подзатворной области МДП-структуры, который существенно уменьшает (в 4–5 раз) потребление энергии по сравнению с потреблением известными ПИП температуры на основе КМДП-структуры, работающими в режиме инверсии в предпороговой области.

Из вышесказанного следует, что разработанный ПИП температуры найдет широкое применение в авиационной технике.

Список литературы

1. Пат. 2 772 665 С1 Российская Федерация, МПК G01K 7/22 (2006.01) ; G01K 15/00 (2006.01). Датчик температуры / Разуваев Ю. Ю., Войнов В. В., Петричкович Я. Я. ; патентообладатель АО НПЦ «Электронные вычислительно-информационные системы». – № 2021128632 ; заявл. 30.09.2021 ; опубл. 23.05.2022, Бюл. № 15 – 1 с.
2. Линьков, Е. Датчик температуры на терморезисторе с протоколом DS1820 / Е. Линьков // Компоненты и технологии. – 2022. – № 11-12(255). – С. 20 – 23.
3. Гушин, В. Серия высоконадежных интегральных датчиков температуры / В. Гушин, И. Корепанов, И. Слепченко // Компоненты и технологии. – 2022. – № 1 (246). – С. 16–17.
4. Иванов, Д. Н. Датчик температуры на основе транзисторов с инжекционно-емкостной связью / Д. Н. Иванов, А. В. Леонов // Наноиндустрия. – 2022. – Т. 15, № S8-2(113). – С. 553 – 555. doi: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.553.555

5. A 0.6 V 117 nW high performance energy efficient system-on-chip (SoC) CMOS temperature sensor in 0.18 μm CMOS for aerospace applications / D. Prasad, V. Nath, V. Vishwanthan, M. Mehta // *Microsystem Technologies*. – 2019. – Vol. 25, No. 7. – P. 2301 – 2311. doi: 10.1007/s00542-018-4115-8
6. Sahafi, A. Nano Watt CMOS temperature sensor / A. Sahafi, J. Sobhi, Z. D. Koozehkanani // *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*. – 2013. – Vol. 75, No. 3. – P. 343 – 348. doi: 10.1007/s10470-013-0046-6
7. Pandey, A. Study and Design of 40 nW CMOS Temperature Sensor for Space Applications / A. Pandey, V. Nath // *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*. – 2015. – Vol. 13, No. 3. – P. 813 – 819. doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v13i3.1426
8. Пат. 2 254 559 Российская Федерация, МПК G 01 K 3/08, 7/24. Устройство для измерения разности температур / Коробов Р. М., Брусенцов Ю. А., Королев А. П., Фесенко А. И. ; заявитель и патентообладатель Тамб. гос. техн. ун-та. – № 2003136657/28 ; заявл. 17.12.2003 ; опубл. 20.06.2005, Бюл. №17. – 5 с.
9. Брусенцов, Ю. А. Исследование электрофизических процессов в полевых полупроводниковых структурах для измерения теплофизических характеристик / Ю. А. Брусенцов, А. П. Королев, А. В. Озаренко // *Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та*. – 2006. – Т. 12, № 1. – С. 122 – 128.
10. Тугов, Ч. М. Полупроводниковые приборы / Ч. М. Тугов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.

Semiconductor Primary Measuring Temperature Transducer for Air Vehicles

V. N. Chernyshov¹, A. P. Korolev²✉

*Departments: Criminal Law and Applied Informatics in Jurisprudence (1);
Materials and Technology, korolevanpal@yandex.ru (2), TSTU, Tambov, Russia*

Keywords: dependence of output current on temperature; design and topological parameters; primary temperature measuring transducer; field structure; enrichment mode of the main charge carriers; sensitivity.

Abstract: A comparative analysis of operational characteristics (temperature measurement range, energy consumption) of metallic and semiconductor primary temperature measuring transducers (TMT) has been carried out, which has shown a significant advantage and feasibility of designing and using semiconductor transducers. A mathematical model describing the dependence of the output current of the developed TMT on the basis of “metal – dielectric – semiconductor” structure on temperature taking into account the main design-topological and electrophysical parameters of the structure is constructed. The influence of design-topological and electro-physical parameters on energy consumption of the converter, which is important in aviation technology, is considered. Using the developed and experimentally confirmed mathematical model, the output characteristics under different conditions are calculated. The simulation results are analyzed and investigated to identify the optimal design-topological and electrophysical parameters at which the designed TMT consumes a low value of energy. As a result, the design of the temperature TMT based on the structure “metal – dielectric – semiconductor” with design-topological and electrophysical parameters providing low power consumption was obtained and described, which will allow its efficient use in air vehicles.

References

1. Razuvayev Yu.Yu., Voynov V.V., Petrichkovich Ya.Ya. *Datchik temperature* [Temperature sensor], Russian Federation, 2022, Pat. 2772665 (In Russ.)
2. Lin'kov Ye. [Temperature sensor on a thermistor with DS1820 protocol], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2022, no. 11-12(255), pp. 20-23. (In Russ., abstract in Eng.)
3. Gushchin V., Korepanov I., Slepchenkov I. [A series of highly reliable integrated temperature sensors], *Komponenty i tekhnologii* [Components and technologies], 2022, no. 1 (246), pp. 16-17. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Ivanov D.N., Leonov A.V. [Temperature sensor based on transistors with injection-capacitive coupling], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2022, vol. 15, no. S8-2(113), pp. 553-555. doi: 10.22184/1993-8578.2022.15.8s.553.555 (In Russ., abstract in Eng.)
5. Prasad D., Nath V., Vishwanthan V., Mehta M. A 0.6 V 117 nW high performance energy efficient system-on-chip (SoC) CMOS temperature sensor in 0.18 μm CMOS for aerospace applications, *Microsystem Technologies*, 2019, vol. 25, no. 7, pp. 2301-2311. doi: 10.1007/s00542-018-4115-8
6. Sahafi A., Sobhi J., Koozehkanani Z.D. Nano Watt CMOS temperature sensor, *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 2013, vol. 75, no. 3, pp. 343-348. doi: 10.1007/s10470-013-0046-6
7. Pandey A., Nath V. Study and Design of 40 nW CMOS Temperature Sensor for Space Applications, *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 813-819. doi: 10.12928/TELKOMNIKA.v13i3.1426
8. Korobov R.M., Brusentsov Yu.A., Korolev A.P., Fesenko A.I. *Ustroystvo dlya izmereniya raznosti temperatur* [Device for measuring temperature differences], Russian Federation, 2005, Pat. 2254559 (In Russ.)
9. Brusentsov Yu.A., Korolev A.P., Ozarenko A.V. [Study of electrophysical processes in field semiconductor structures for measuring thermal-physical characteristics], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 1, pp. 122-128. (In Russ., abstract in Eng.)
10. Tugov Ch.M. *Poluprovodnikovyye pribory* [Semiconductor devices], Moscow: Energoatomizdat, 1990, 576 p. (In Russ.)

Halbleiter-Primärmessgerät, Temperaturwandler für Flugzeuge

Zusammenfassung: Es ist eine vergleichende Analyse der Betriebseigenschaften (Temperaturmessbereich, Energieverbrauch) von metallischen und Halbleiter-Primärtemperaturmesswandlern (PTR) durchgeführt. Der Vergleich zwischen metallischen und Halbleiter-Primärtemperaturmesswandlern (PTC) zeigte den erheblichen Vorteil und Zweckmäßigkeit der Entwicklung und Anwendung von Halbleiter-Messwandlern. Es ist ein mathematisches Modell erstellt, das die Abhängigkeit des Ausgangsstroms des entwickelten PIP auf der Basis der TIR-Struktur von der Temperatur unter Berücksichtigung der wichtigsten design-topologischen und elektrophysikalischen Parameter der Struktur beschreibt. Der Einfluss der konstruktiv-topologischen und elektrophysikalischen Parameter auf die in der Luftfahrttechnik wichtige Leistungsaufnahme des Konverters ist berücksichtigt. Mit Hilfe des entwickelten und experimentell validierten mathematischen Modells sind die Ausgangseigenschaften unter verschiedenen Bedingungen berechnet. Die Simulationsergebnisse sind analysiert und untersucht, um die optimalen design-topologischen und elektrophysikalischen Parameter zu ermitteln, bei denen der entworfene PIP einen niedrigen Energieverbrauch aufweist. Als Ergebnis ist das Design des Temperatur-PIPs auf der Basis der Struktur „Metall - Dielektrikum - Halbleiter“ mit

design-topologischen und elektrophysikalischen Parametern, die einen niedrigen Energieverbrauch ermöglichen, erhalten und beschrieben, was seinen effektiven Einsatz in Flugzeugen ermöglichen wird.

Transmetteur de température primaire à semi-conducteurs pour aéronefs

Résumé: Est donnée une analyse comparative des caractéristiques opérationnelles (plage de mesure de la température, consommation d'énergie) des métaux et des transducteurs de mesure primaires (TMP) à semi-conducteurs de la température, qui ont montré un avantage significatif et la performance de la conception et de l'application des transducteurs à semi-conducteurs. Est construit un modèle mathématique décrivant la dépendance du courant de sortie du TMP en cours de développement à la base de la structure, en tenant compte des principaux paramètres de conception et ceux topologiques et électrophysiques de la structure. Est montré l'impact des paramètres sur la consommation d'énergie du transducteur, qui est important dans l'ingénierie aéronautique. À l'aide d'un modèle mathématique développé et validé expérimentalement, sont calculées les caractéristiques de sortie dans de différentes conditions. Sont effectuées l'analyse et l'étude des résultats. Est décrite la conception de TMP de température à la base de la structure "métal-diélectrique - semi-conducteur" avec des paramètres assurant une faible consommation d'énergie ce qui lui permettra d'être utilisé efficacement dans les aéronefs.

Авторы: *Чернышов Владимир Николаевич* – доктор технических наук, профессор кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», Тамбов, Россия.