

**АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ
ЭЛЕМЕНТОВ В СРЕДСТВАХ КОНТРОЛЯ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ**

А. Д. Лоскутова¹, А. П. Королев²

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

Ключевые слова: выходная характеристика; инфракрасное излучение; КМДП-структура; полупроводниковая полевая структура; термопреобразователи; термочувствительный элемент; электрофизические параметры.

Аннотация: Проведен анализ характеристик термочувствительных элементов, используемых в приборах для контроля температуры и теплофизических свойств среды и материалов. Рассмотрены термопреобразователи из различных материалов: металлов, полупроводников, оксидов. Проанализирована чувствительность к инфракрасному излучению рассматриваемых элементов. Исследованы диапазон измеряемых температур и линейность выходной характеристики преобразователей. Сделан вывод о целенаправленности использования того или иного типа термочувствительных элементов.

Термочувствительный элемент (ТЧЭ) является очень важной конструкционной составляющей приборов, предназначенных для измерения теплофизических свойств материалов. Термочувствительные элементы созданы на материалах, электрофизические свойства которых зависят от температуры. У однородных структур ТЧЭ основной характеристикой, зависящей от температуры, является удельное сопротивление. Гетероструктуры ТЧЭ, которые созданы из полупроводниковых материалов, реагируют на изменение температуры ростом или падением электрического напряжения на структуре или величины электрического тока.

Существует класс термометров сопротивления, представляющих собой проволочную конструкцию из металла, который должен обладать такими характеристиками, как большой температурный коэффициент сопротивления, высокая температура плавления, однородность микроструктуры, высокое удельное сопротивление при нормальных условиях, стойкость к химическому воздействию. По таким параметрам наиболее подходящими являются платина и медь.

Металлические термометры сопротивления имеют недостатки, которыми не обладают, например, ТЧЭ из монокристаллических полупроводников. Медь из-за высокой склонности к окислению при повышенной температуре пригодна для чувствительного элемента, применяемого при измерении температуры до 180 °С. В неокисляющей среде и вакууме медный элемент можно использовать

до 500 °С. Платина имеет более высокие границы измеряемых температур. На воздухе ТЧЭ из платины можно измерять температуры до 450 °С, в вакууме – до 1000 °С. Но измерение высоких температур в вакууме должно быть как можно более кратковременным, чтобы избежать заметного распыления металла. Для измерения высоких температур в вакууме можно использовать тугоплавкие металлы, однако они имеют низкий температурный коэффициент удельного сопротивления, что понижает чувствительность элемента. К недостаткам всех металлических ТЧЭ относится низкое удельное сопротивление материала, что осложняет коммутацию в цепи прибора для измерения теплофизических характеристик материалов и сред. На рисунке 1, а, изображены зависимости удельного сопротивления металлов, применяемых для изготовления ТЧЭ, от температуры [1]. Конкуренцию металлическим ТЧЭ могут составить полупроводниковые терморезисторы из нестехиометрических и оксидных химических соединений, которые имеют значительно выше температурный коэффициент сопротивления. На рисунке 1, б, показаны зависимости удельного сопротивления оксидных материалов, используемых в терморезисторах, от температуры [1].

Терморезисторы склонны к старению – изменению характеристик со временем, что требует проверки и градуировки. Более значительным сроком службы и широким диапазоном измеряемых температур (от –269 до 3000 °С) отличаются термопары, но они обладают рядом недостатков: в точности измерения; из-за слабого сигнала высокий уровень шумов; теплоотвод; неоднородная микроструктура проволок и механические напряжения, вызванные изготовлением проволочных термопар и др.

Значительные преимущества имеют ТЧЭ на монокристаллических полупроводниках: низкий уровень шумов, широкий диапазон измеряемых температур на воздухе, практически отсутствие теплоотдачи и др. Измерение высоких температур на воздухе обеспечивается низкой склонностью к окислению полупроводника. При взаимодействии с воздухом на поверхности кремния образуется оксид толщиной 0,01 мкм, который дальше не растет, являясь маской для диффузии кислорода к границе раздела «кремний – оксид кремния». Оксид полупроводника, если он требуется в полупроводниковой технике и технологии, выращивается в специальных условиях.

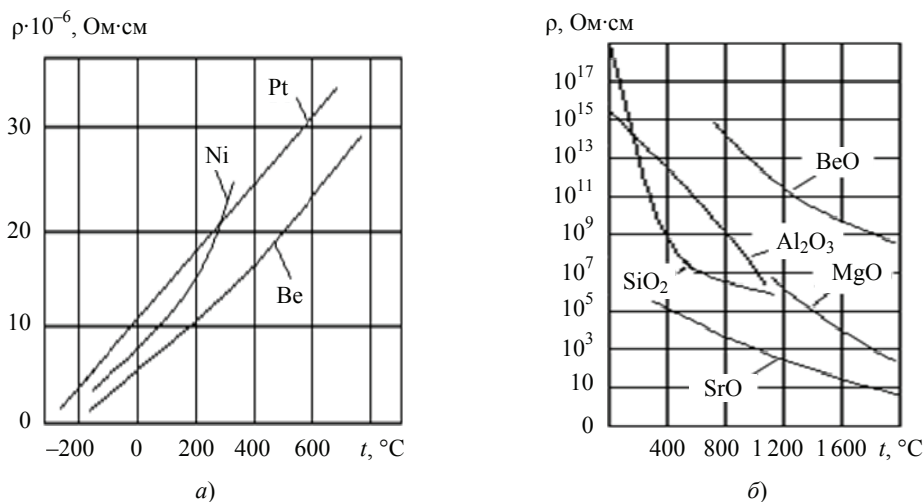


Рис. 1. Зависимости удельного сопротивления металлов для ТЧЭ (а) и оксидных материалов (б) от температуры

Применение для измерения температуры находят структуры с $p-n$ -переходом. С температурой меняется обратный ток через $p-n$ -переход. Зависимости представлены на рис. 2 [1].

На координатных плоскостях заштрихованные области имеют характеристики одной серии диодов. Из графиков видно, что диапазон измеряемых температур узкий и составляет всего около 40 °С. Это объясняется тем, что обратный ток при резком увеличении своего значения может привести к пробоем $p-n$ -перехода. Однако, согласно температурной характеристике обратного тока, чувствительность диодов высока.

Существуют варианты применения и транзисторных полевых структур для измерения теплофизических параметров сред, но использование единичного транзистора не пригодно. Структура транзистора обеспечивает практически постоянный электрический ток при изменении температуры в рабочем диапазоне, то есть прибор не чувствителен к изменению температуры. Принцип измерения температуры основан на термогенерации носителей заряда в полупроводнике, однако полевые транзисторы работают в режиме инверсии, в котором в проводящем канале происходит насыщение носителями при пороговом напряжении. Количество заряженных свободных частиц в этом случае максимально, и термогенерация не приводит к увеличению их концентрации. Следовательно, электрический ток через транзистор с изменением температуры не меняется в рабочем диапазоне. Для проверки данного высказывания следует провести математический анализ выходной характеристики МДП-транзистора. От температуры зависят электрофизические параметры. Пороговое напряжение выражается зависимостью [2]

$$V_T = 2\psi_B + \frac{\sqrt{2\varepsilon_0\varepsilon_{Si}qN_A(2\psi_B)}}{C_i},$$

где ψ_B – разность между собственным уровнем и уровнем Ферми в режиме сильной инверсии [3, 4]; $\varepsilon_0, \varepsilon_{Si}$ – диэлектрические проницаемости абсолютная и кремния соответственно, Ф/см; q – элементарный заряд, Кл; N_A – концентрация акцепторной примеси, см⁻³; C_i – емкость оксидного слоя под затвором, Ф.

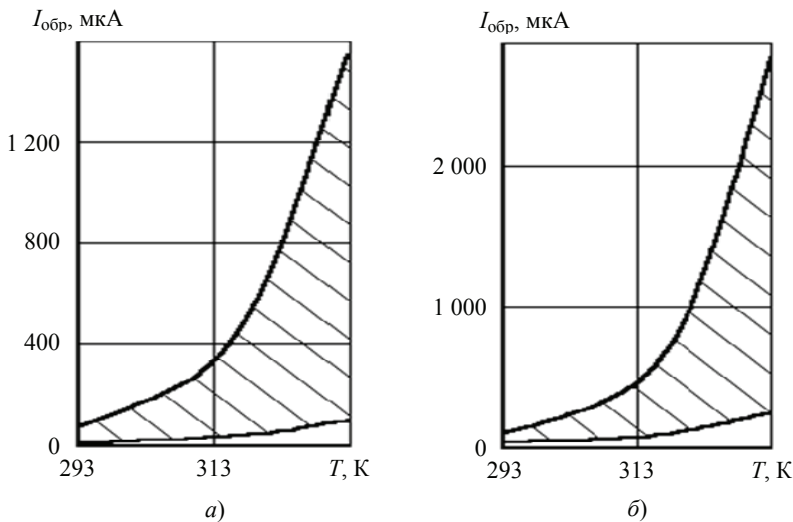


Рис. 2. Температурные характеристики диодов:
а – серии Д7; б – типа Д302

После преобразования [3, 4] данное выражение примет вид

$$V_T = \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} + \frac{\sqrt{4\varepsilon_0\varepsilon_{Si}qN_A \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}}}{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{SiO_2}}{d_i}}, \quad (1)$$

где n_i – собственная концентрация электронов, см^{-3} ; k – постоянная Больцмана, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; T – температура, К; d_i – толщина подзатворного диэлектрика, см.

Выражение для выходного тока транзистора [2]

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n C_i (V_G - V_T) V_D,$$

где Z и L – ширина и длина канала транзистора, см; μ_n – подвижность электронов в структуре, $\text{см}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$; V_G , V_D – напряжения на затворе и стоке, В, соответственно.

Подставив в данную формулу выражение (1) [3, 4], получим

$$I_D = \frac{Z}{L} \mu_n \frac{\varepsilon_0\varepsilon_{SiO_2}}{d_i} \left(V_G - \frac{2kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i} - \frac{\sqrt{4\varepsilon_0\varepsilon_{Si}qN_A \frac{kT}{q} \ln \frac{N_A}{n_i}}}{\frac{\varepsilon_0\varepsilon_{SiO_2}}{d_i}} \right). \quad (2)$$

Подвижность электронов μ_n уменьшается с ростом температуры [3, 4]. Рассчитаем характеристику (2) в зависимости от температуры для электрических и физико-топологических параметров транзистора:

- концентрации акцепторной примеси в подложке $N_A = 1 \times 10^{16} \text{ см}^{-3}$;
- толщины подзатворного диэлектрика $d_i = 3 \times 10^{-6} \text{ см}$;
- ширины канала $Z = 5 \times 10^{-1} \text{ см}$;
- длины канала $L = 5 \times 10^{-5} \text{ см}$;
- напряжения на затворе $V_G = 10 \text{ В}$.

Зависимость выходного тока транзистора от температуры представлена на рис. 3 для разных потенциалов на стоке V_D .

Из рассчитанных и приведенных на графике характеристик видно, что ток через транзистор не меняется с изменением температуры до 400 К или до 127 °С. Затем резко падает из-за уменьшения подвижности электронов с ростом температуры. Таким образом, использовать единичный транзистор для измерения температуры нельзя.

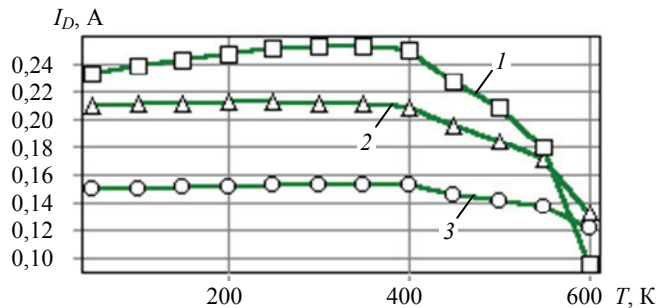


Рис. 3. Зависимость выходного тока транзистора от температуры для разных значений напряжения, В, на стоке:

1 – 5; 2 – 7; 3 – 9

Известно применение КМДП-транзисторов в космической технике для измерения температуры [5]. Предлагаемый КМДП-датчик температуры имеет хорошую линейность в температурном диапазоне от $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ с погрешностью $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$. Эта схема работает при питании 1 В и потребляет энергию 40 нВт при $150\text{ }^{\circ}\text{C}$. Датчики температуры обычно делятся на два типа: обычные и интеллектуальные. Обычные датчики температуры имеют многочисленные недостатки по сравнению с интеллектуальными, специально изготовленными по технологии КМДП, потребляющие больше энергии из-за большей площади, меньшей точности и нелинейности [5]. Интеллектуальный датчик температуры может напрямую взаимодействовать с микроконтроллером или микропроцессором в стандартном цифровом формате, что приводит к снижению сложности и повышению быстродействия системы. Схема интеллектуального датчика температуры КМДП состоит из схемы термозлемента, его схемы формирования сигнала и аналого-цифрового преобразователя [5].

Выходная характеристика КМДП-термопреобразователя описывается зависимостью [5]

$$I_D = \frac{\mu_n C_{\text{SiO}_2} Z}{2L} \left[\frac{V_G - V_T}{1 + \left(\frac{\mu}{2LV_{\text{sat}}} + \theta \right)} \right], \quad (3)$$

где C_{SiO_2} – емкость оксида кремния, Φ ; V_{sat} – постоянная скорость насыщения, м/с, $V_{\text{sat}} = \mu_n E$; E – напряженность электрического поля, В/м; θ – подгоночный параметр, определяемый экспериментально.

Выражение (3) аналогично (2), но, если использовать для измерения температуры МДП-структуру не в режиме инверсии, как транзистор, а в режиме обогащения, как резистор, управляемый потенциалом на затворе [3, 4], зависимость, представленная на рис. 3, будет выглядеть по-другому. Зависимость тока стока I_D от температуры будет возрастать с разной крутизной графиков, которая зависит от уровня легирования кремниевой подложки, как показано на рис. 4, где ширина канала $Z = 1\text{ мкм}$, длина канала $L = 0,5\text{ мкм}$, $V_D = 9\text{ В}$, $V_G = 10\text{ В}$, толщина диэлектрика $d = 0,03\text{ мкм}$ [4].

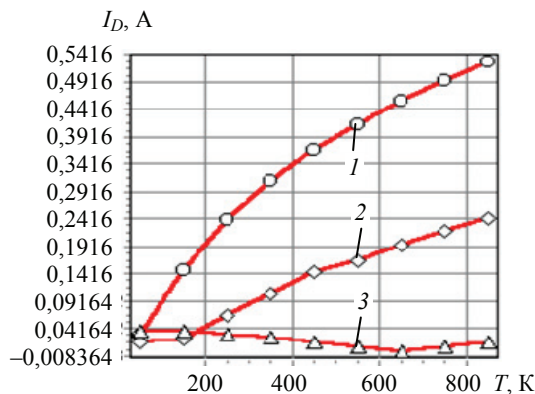


Рис. 4. Зависимость выходного тока I_D от температуры для различных концентраций примеси в подложке N_D :

1 – собственный кремний; 2 – легированный $N_D = 10^{14}\text{ см}^{-3}$; 3 – легированный $N_D = 10^{16}\text{ см}^{-3}$

На вид выходной характеристики влияют не только уровень легирования подложки, но и физико-топологические и электрофизические параметры [4]. Таким образом, анализируя зависимости, приведенные на рис. 4, можно сделать вывод о возможности использования единичной МДП-структуры для измерения температуры как интеллектуального термочувствительного элемента.

Список литературы

1. Коленко, Е. А. Технология лабораторного эксперимента : справ. / Е. А. Коленко. – СПб. : Политехника, 1994. – 751 с.
2. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов : в 2-х кн. / С. Зи ; пер. с англ. В. А. Гергеля [и др.] ; под ред. Р. А. Сурица. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Мир, 1984. – 455 с.
3. Яцинин, Ю. В. Образование заряда в квантовой яме в полевой структуре / Ю. В. Яцинин, А. П. Королев // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2011. – Т. 17, № 2. – С. 525 – 528.
4. 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.
5. Pandey, A. Study and Design of 40 nW CMOS Temperature Sensor for Space Applications / A. Pandey, V. Nath // TELKOMNIKA. – 2015. – Vol. 13, No. 3. – P. 813 – 819.

The Analysis of Properties of Thermal Sensitive Elements in Measuring Devices for Thermal Properties of Materials

A. D. Loskutova¹, A. P. Korolev²

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

Keywords: output characteristic; infrared radiation; semiconductor field structure; thermal converters; thermosensitive element; electrophysical parameters.

Abstract: The analysis of properties of thermosensitive elements used in devices for monitoring the temperature and thermophysical properties of the medium and materials is carried out. Thermal converters made of various materials are considered: metals, semiconductors, oxides. The sensitivity to infrared radiation of the considered elements is analyzed. The range of measured temperatures and the linearity of the output characteristics of the converters are investigated. A conclusion is made about the purposefulness of using one or another type of thermosensitive elements.

References

1. Kolenko Ye.A. *Tekhnologiya laboratornogo eksperimenta: spravochnik* [Laboratory experiment technology: reference book], St. Petersburg: Politekhnika, 1994, 751 p. (In Russ.)
2. Zi S., Suris R.A. [Ed.] *Fizika poluprovodnikovyykh priborov: v 2-kh kn.* [Physics of semiconductor devices: in 2 books], Moscow: Mir, 1984, 455 p. (In Russ.)

3. Yatsinin Yu.V., Korolev A.P. [Charge formation in a quantum well in a field structure], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2011, vol. 17, no. 2, pp. 525-528. (In Russ., abstract in Eng.)

4. Brusentsov Yu.A., Korolev A.P., Ozarenko A.V. [Investigation of electrophysical processes in field semiconductor structures for measuring thermophysical characteristics], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2006, vol. 12, no. 1, pp. 122-128. (In Russ., abstract in Eng.)

5. Pandey A., Nath V. Study and Design of 40 nW CMOS Temperature Sensor for Space Applications, *TELKOMNIKA*, 2015, vol. 13, no. 3, pp. 813-819.

Analyse der Eigenschaften wärmeempfindlicher Elemente bei der Überwachung der thermophysikalischen Eigenschaften von Materialien

Zusammenfassung: Es ist die Analyse der Eigenschaften von thermosensitiven Elementen, die in Geräten zur Überwachung der Temperatur und der thermophysikalischen Eigenschaften von Medium und Materialien verwendet werden, durchgeführt. Betrachtet sind Wärmewandler aus verschiedenen Materialien: Metallen, Halbleitern, Oxiden. Die Empfindlichkeit der betrachteten Elemente gegenüber Infrarotstrahlung ist analysiert. Der Bereich der gemessenen Temperaturen und die Linearität der Ausgangskennlinie der Wandler sind untersucht. Es ist die Schlussfolgerung über die Zweckmäßigkeit der Verwendung dieser oder jener Art von wärmeempfindlichen Elementen gezogen.

Analyse des caractéristiques des éléments thermosensibles dans les moyens de contrôles des propriétés thermiques des matériaux

Résumé: Est effectuée une analyse des caractéristiques des éléments thermosensibles utilisés dans les instruments de contrôle de la température et des propriétés thermiques du milieu et des matériaux. Sont examinés les thermoconducteurs fabriqués à partir de divers matériaux: métaux, semi-conducteurs, oxydes. Sont analysées la sensibilité au rayonnement infrarouge des éléments considérés. Est étudiée la gamme de température mesurée et la linéarité de la sortie des transducteurs. Est donnée la conclusion sur l'utilisation d'un type particulier d'élément sensible à la chaleur.

Авторы: *Лоскутова Анна Давидовна* – аспирант кафедры «Уголовное право и прикладная информатика в юриспруденции»; *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.

Рецензент: *Пудовкин Анатолий Петрович* – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиотехника», ФГБОУ ВО «ТГТУ», г. Тамбов, Россия.