

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПЕРВИЧНЫХ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ И ДАВЛЕНИЯ НА ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУРАХ

Ю.В. Яцинин, А.П. Королев

*Кафедра «Материалы и технология», ГОУ ВПО «ТГТУ»;
korolevanpa1@yandex.ru*

Представлена членом редколлегии профессором В.И. Коноваловым

Ключевые слова и фразы: первичный измерительный преобразователь; полевой эффект; полупроводник; термочувствительный элемент.

Аннотация: Описаны результаты исследования влияния механических нагрузок и температуры на полупроводниковые структуры. Приведен алгоритм расчета оптимальных электрофизических и конструктивных параметров предлагаемого преобразователя. Рассмотрен вопрос термокомпенсации при измерениях величины пластической деформации.

В настоящее время широкое применение для измерения тепловых величин и давления находят преобразователи на микро- и наноразмерных полупроводниковых структурах. В этих целях используются различные элементы электронной техники – биполярные и полевые транзисторы, диоды, МДП-конденсаторы, полупроводниковые резисторы и другие. Достоинства полупроводниковых преобразователей давно оценены и широко описаны в различных изданиях. Так же известно, что параметры самой полупроводниковой структуры определяют ее выходные характеристики. К таким параметрам можно отнести следующие: конструкторско-топологические – длину и ширину канала, толщину подзатворного диэлектрика, длину базы и т.д.; электрофизические – потенциалы на электродах, концентрацию примеси, подвижность носителей заряда и др. Различное сочетание значений этих параметров оказывает разное влияние на эксплуатационные характеристики преобразователей, их технические данные (точность, чувствительность, диапазон измерения и др.), а, следовательно, определяет область применения первичного измерительного преобразователя (ПИП). Значит, параметры можно выбирать те или иные в зависимости от поставленной задачи. Нами предложена методика выбора требуемых параметров структуры при ее проектировании.

Проектируемый ПИП представляет собой резистор (рис. 1), работающий в режиме обогащения основными носителями заряда и управляемый потенциалом на изолированном электроде, используя полевой эффект. Структура преобразова-

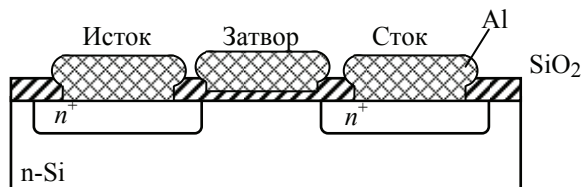


Рис. 1. Структура полупроводникового ПИП

теля формируется планарно в монокристаллическом полупроводнике n-типа. Для расчета параметров измерительной структуры необходимо провести математическое моделирование электрофизических процессов, происходящих в полупроводниковой подложке ПИП под действием механических напряжений и температуры, и связать их с конструкторско-топологическими параметрами. Для получения математической модели используются фундаментальные положения физики полупроводников, посредством которых модель выходной характеристики адаптируется для разрабатываемого преобразователя.

Подробно принцип работы структуры и вывод математической модели представлен в [1, 2]. Модель, описывающая связь тока в канале между истоком и стоком с электрическими и конструкторско-топологическими параметрами выражается следующими зависимостями:

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

$$\mu_n^{-1} = \mu_{CT}^{-1} + \left(\frac{\sqrt{\left(\frac{Q_S}{\varepsilon_0 \varepsilon_S}\right)^2 + \left(\frac{V_{SD}}{L}\right)^2}}{1,1 \cdot 10^7} \right)^{1/2};$$

$$\mu_{CT} = 88 \left(\frac{T}{300}\right)^{-0,57} + \frac{1268 \left(\frac{T}{300}\right)^{-2,33}}{1 + 7,92 \cdot 10^{-18} \left(\frac{T}{300}\right)^{-2,4} N_D^{0,88} \frac{T}{300}^{-0,146}};$$

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

где I_D – ток в канале, А; Z и L – ширина и длина канала, см; V_{SD} – разность потенциалов между истоком и стоком, В; V_G и V_D – потенциалы на затворе и стоке соответственно, В; μ_n – подвижность электронов, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; μ_{CT} – подвижность, связанная с рассеянием на ионах примеси, $\text{см}^2 \cdot \text{В}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$; N_D – концентрация доноров, см^{-3} ; T – температура, К; $E_G(0)$ – значение ширины запрещенной зоны, экстраполированное к 0 К, см; d – толщина подзатворного диэлектрика, см; ε_0 , ε_i и ε_S – диэлектрические проницаемости вакуума, диэлектрика и полупроводника соответственно; Q_S – поверхностный заряд в канале, Кл·см⁻²; B – эмпирический коэффициент, $B = 3,873 \cdot 10^{16} \text{ К}^{-3/2} \cdot \text{см}^{-3}$ [3]; e – заряд электрона, Кл; k – постоянная Больцмана, Дж.

При измерениях деформации в основу принципа работы предлагаемого ПИП положено влияние механических напряжений на проводимость в полупроводнике. Используя известные зависимости, была получена модель выходной характеристики преобразователя [9]:

$$I = \frac{U_{SD} Z x q n \left(\frac{3E_{DS} m^{5/2} (kT)^{3/2}}{\sqrt{8\pi q h^4 C_{\parallel}}} + \frac{N_D q^3 m^{1/2}}{64 \sqrt{\pi \varepsilon_S^2} (2kT)^{3/2}} \ln \left[1 + \left(\frac{12\pi \varepsilon_S kT}{q^2 N_D^{1/3}} \right)^2 \right] \right)}{L},$$

где q – элементарный заряд, Кл; n – концентрация электронов, см^{-3} ; C_{\parallel} – механическая деформация; E_{DS} – смещение края зоны проводимости на единицу деформации кристаллической решетки, Дж; x – глубина канала, см; h – постоянная Планка, Дж·с; m – эффективная масса электрика, г.

Это выражение описывает зависимость выходного тока от степени деформации. Следует отметить, что данная структура чувствительна к изменениям как температуры, так и деформации. Поэтому, при измерениях деформации необходимо также учитывать влияние температуры. Как показывает эксперимент, с увеличением температуры увеличивается значение выходного тока преобразователя при одинаковых механических нагрузках. Увеличение температуры на 1 К приводит к увеличению выходного тока в среднем на 0,2 мкА (в зависимости от параметров самой структуры), что составляет, примерно, 0,7...0,8 % от показания датчика. Такое значение погрешности, обусловленной влиянием только температуры, уже существенно. Следовательно, для увеличения точности необходимо вводить термокомпенсацию в схему измерения давления.

Если изготовить в одном технологическом процессе два таких преобразователя, то они абсолютно одинаково будут реагировать на изменения температуры. Для измерения деформации два одинаковых преобразователя следует включить в мостовую схему. Один из них участвует в измерении деформации, другой остается ненагруженным, но влияние температуры на них одинаково. Полученные математические зависимости для разрабатываемого ПИП позволяют рассчитать его электрофизические и конструктивные параметры (рис. 2).

Методика расчета позволяет проектировать преобразователь на любом монокристаллическом полупроводнике с известными характеристиками. Основной задачей расчета является определение оптимальных параметров структуры, при которых будет наибольшей чувствительность преобразователя в заданном диапазоне температур. Так как измерение температуры осуществляется посредством определения выходного тока, то чувствительность преобразователя определяется как $\partial I_D / \partial T$.

Алгоритм определения оптимальных параметров проектируемой структуры разработан на основе метода «чисел Фибоначчи» и метода «золотого сечения».

Исходными данными для расчета являются: V_G – потенциал на управляющем электроде; V_D – потенциал на стоке; T – температура; d – толщина подзатворного диэлектрика; L – длина канала; Z – ширина канала.

Программа состоит из основной части и подпрограммы. В начале программы вводятся интервалы параметров и минимальная разница параметра $a_{\text{доп}}$, которая может быть обнаружена.

Затем задают начальные значения параметров, которые принимают равными минимальным значениям в установленных интервалах параметров ($V_{G \text{ min}}$, $V_{D \text{ min}}$, d_{min} , L_{min} , Z_{min}). Далее по алгоритму, представленному на рис. 3, вычисляется оптимальное значение каждого параметра.

Определенные значения параметров выводятся на экран, которые дальше используются как входные данные для разработки технологии изготовления термочувствительного элемента.

При моделировании выходных электрофизических характеристик используются физико-топологические и конструктивные параметры, такие как концентрация примеси, длина канала, толщина подзатворного диэлектрика, расстояние между областями и контактами структуры, которые определяются технологическими режимами. Поэтому существует непосредственная связь между электрофизическими величинами и параметрами технологического процесса. Следовательно, при машинном расчете перечисленные параметры рассчитываются одновременно. Алгоритм технологического проектирования приведен на рис. 4.

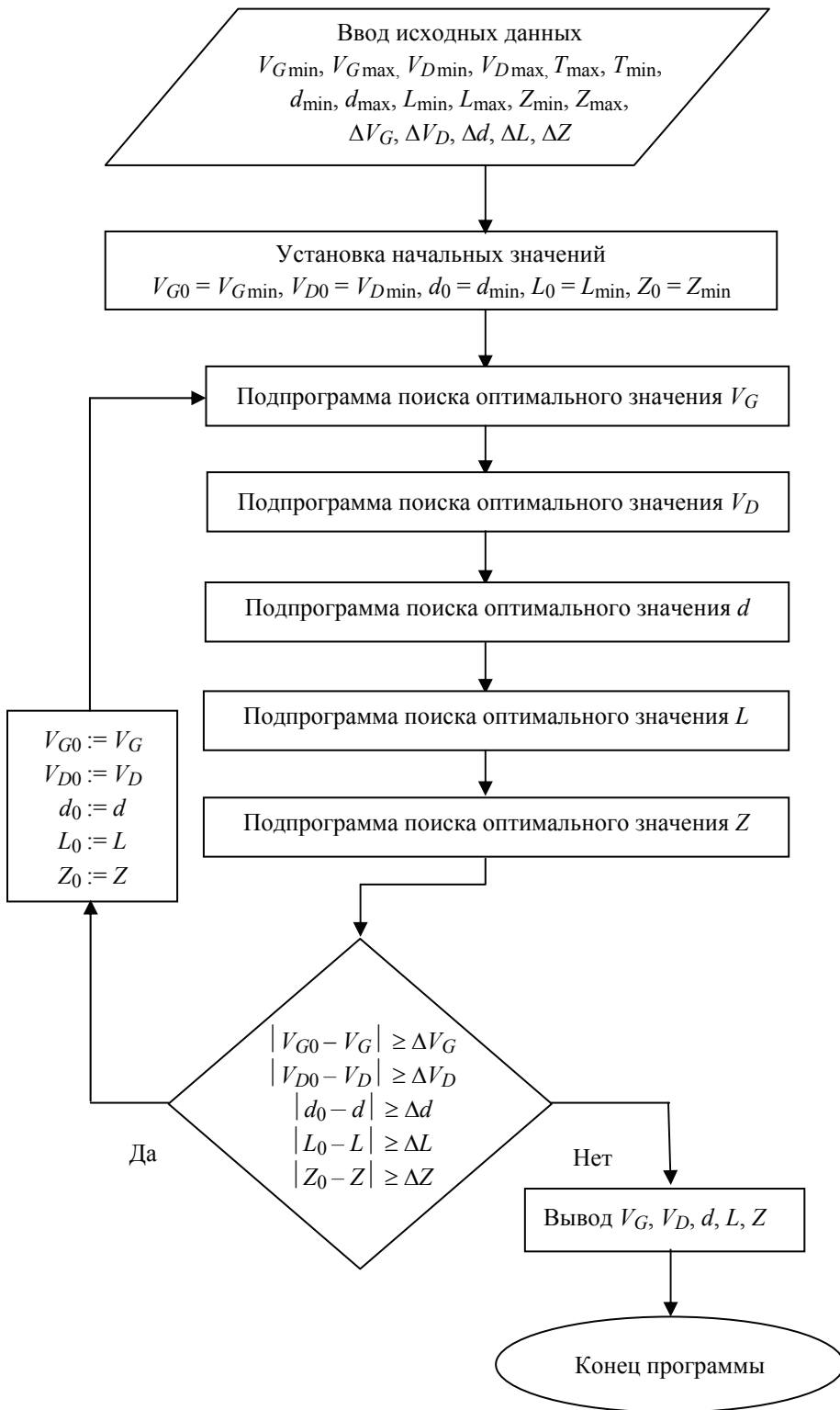


Рис. 2. Алгоритм расчета конструктивных и электрофизических параметров ПИП температуры

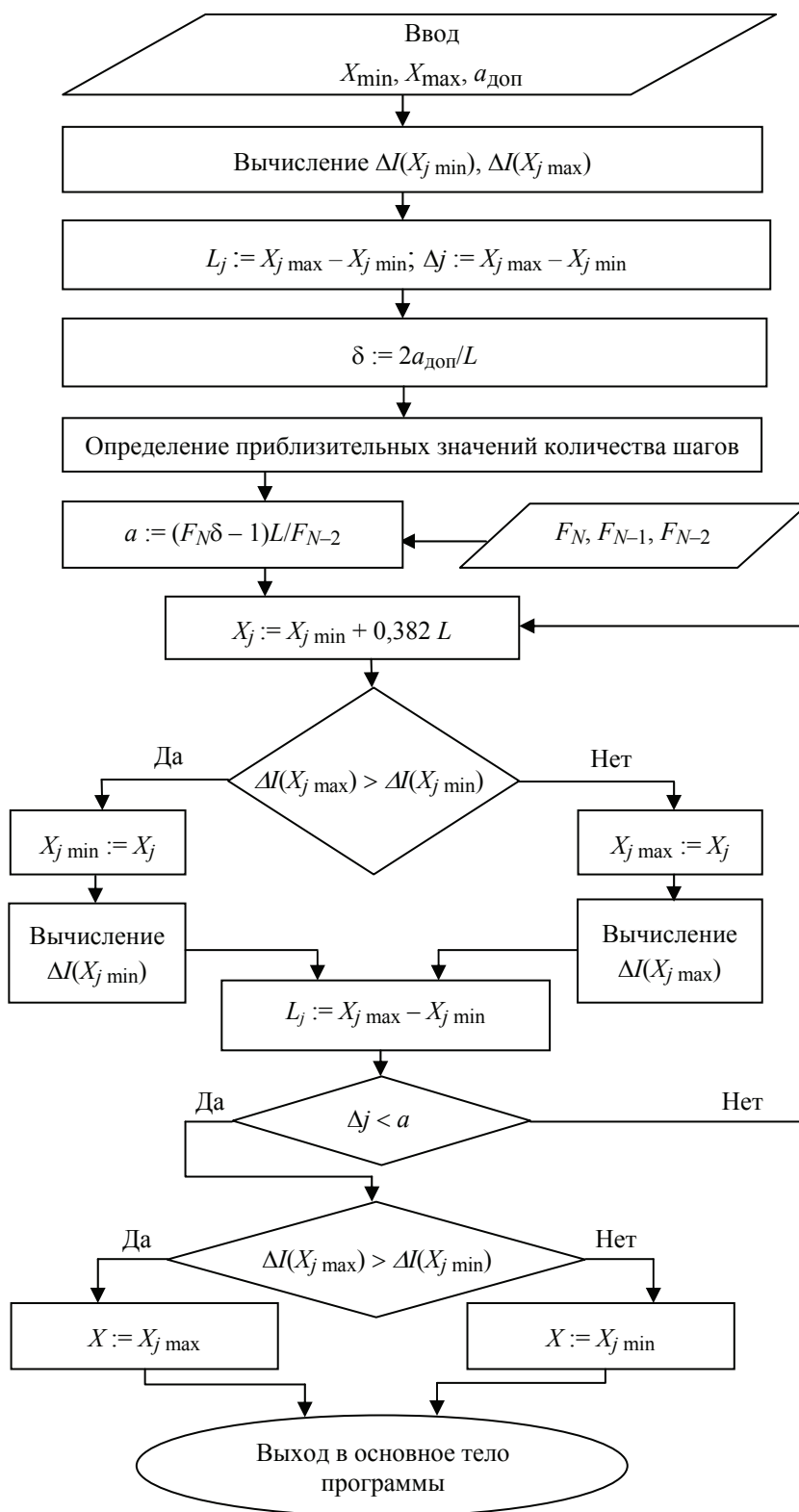


Рис. 3. Алгоритм подпрограммы поиска оптимальных значений параметра

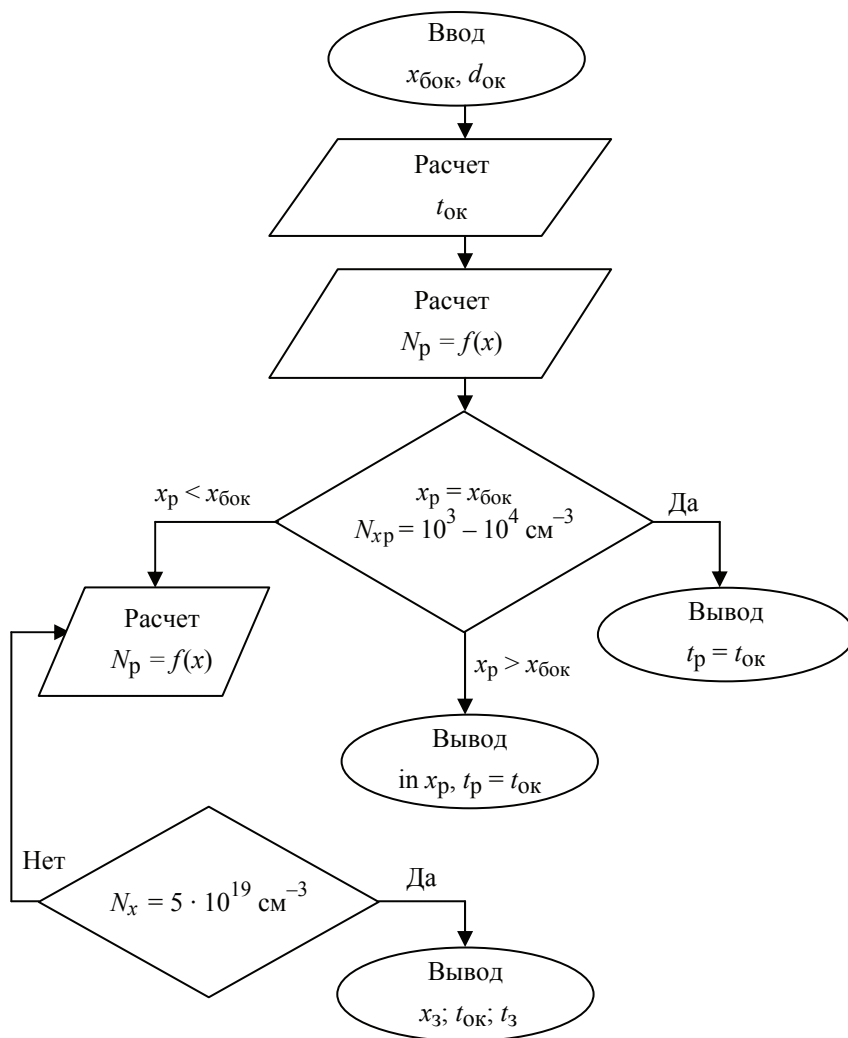


Рис. 4. Алгоритм расчета технологических режимов

Так как термическое выращивание подзатворного диэлектрика после проведенной операции диффузии в области истока и стока вызывает разгонку введенной примеси (рис. 5), то задачу определения времени окисления и времени введения примеси следует решать одновременно. Все время диффузии делится на время введения (загонки) и время перераспределения (разгонки) примеси.

В базу данных вводится топологический размер $x_{бок}$ и толщина подзатворного диэлектрика $d_{ок}$ (см. рис. 4).

Программа рассчитывает время окисления $t_{ок}$, необходимое для выращивания подзатворного диэлектрика требуемой толщины $d_{ок}$; глубину загонки $x_з$ и время загонки $t_з$ такое, чтобы при дальнейшем окислении примесь достигла границы, равной заданному значению топологического размера $x_{бок}$ (см. рис. 5).

Известно, что погрешность термочувствительного элемента (ТЧЭ) уменьшается с уменьшением массогабаритных размеров. Полупроводниковая пластина, выпускаемая промышленностью, в которой изготавливается ТЧЭ, имеет толщину 0,3 мм (300 мкм), а толщина рабочего слоя, сформированного в приповерхностной

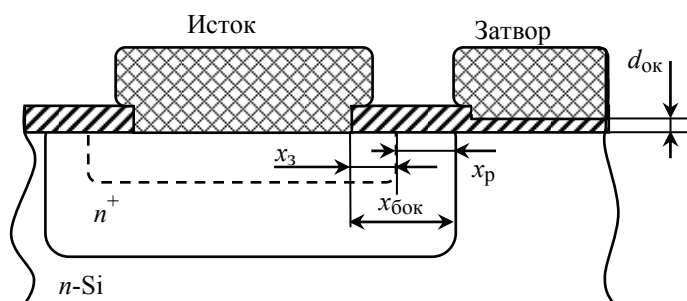


Рис. 5. Фрагмент структуры ячейки ПИП

области пластины, составляет десятые доли микрометров. Поэтому обратную сторону подложки можно сошлифовывать или травить до минимально допустимой толщины.

Проработан и второй вариант получения тонкого ТЧЭ. В этом случае кремний осаждается на легкорастворимую основу в виде тонкой пленки и в ней формируется структура элемента, затем основа растворяется.

Для уменьшения отвода тепла из зоны измерений в качестве материала для токоведущих элементов выбран сильнолегированный поликремний. Токоведущие дорожки из такого материала обладают высокой электропроводностью и низкой теплопроводностью.

Заключение

Предложена методика расчета оптимальных параметров полупроводникового ПИП тепловых величин и давления и технологических режимов его изготовления. Технологический расчет позволяет получить параметры структуры, обеспечивающие требуемые выходные характеристики ПИП.

Список литературы

1. Бриндли, К. Измерительные преобразователи / К. Бриндли. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – 143 с.
2. Ротберг, И.П. Полупроводниковый диод как датчик температуры / И.П. Ротберг, Н.П. Удалов // Автоматика и телемеханика. – 1963. – Т. 24, № 5. – 324 с.
3. Тугов, Ч.М. Полупроводниковые приборы / Ч.М. Тугов. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 576 с.
4. Пасынков, В.В. Полупроводниковые приборы : учеб. для вузов / Пасынков В.В., Чиркин Л.К. – 5-е изд., испр. – СПб. : Лань, 2001. – 480 с.
5. Зи, С. Физика полупроводниковых приборов : в 2 кн. / С. Зи. – М. : Мир, 1984. – 2 кн.
6. Бонч-Бруевич, В.Л. Физика полупроводников / В.Л. Бонч-Бруевич, С.Г. Калашников. – М. : Наука, 1977. – 672 с.
7. Бубенников, А.Н. Моделирование интегральных микротехнологий приборов и схем / А.Н. Бубенников. – М. : Высшая школа, 1990. – 320 с.
8. Korolev, A. P. Solid State Primary Initial Transformer Design for Heat Values Measurement / A.P. Korolev, V.P. Shelochvostov, V.N. Chernyshov // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 1999. – Т. 5, № 4. – С. 536–542.
9. Первичный измерительный преобразователь упругих деформаций / А.В. Кочетков [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2003. – Т. 8, № 4. – С. 702–703.

Designing of Primary Measuring Temperature and Pressure Converters on Semiconducting Structures

Yu.V. Yatsinin, A.P. Korolev

*Department "Materials and Technology", TSTU;
korolevanpal@yandex.ru*

Key words and phrases: field effect; primary measuring converter; semiconductor; thermo sensitive element.

Abstract: The paper describes the results of the research into the influence of mechanical load and temperature on the semiconducting structures. The algorithm of calculation of optimal electro physical and design parameters of the proposed converter is presented. The issue of thermo compensation in the measurements of the plastic flow size is examined.

Projektierung der primären mechanischen Umformer der Temperatur und des Drucks auf den Halbleiterstrukturen

Zusammenfassung: Es sind die Ergebnisse der Untersuchung der Einwirkung der mechanischen Belastungen und der Temperatur auf die Halbleiterstrukturen beschrieben. Es ist den Algorithmus der Berechnung der optimalen elektrophysikalischen und konstruktiven Parameter des vorschlagenden Umformers angeführt. Es ist die Frage der Thermokompensierung bei der Veränderung der Größe der plastischen Deformierung betrachtet.

Conception des convertisseurs primaires de mesure de température et de la tension sur les structures semi-conducteurs

Résumé: Sont décrits les résultats des études des charges mécaniques et de la température sur les structures semi-conducteurs. Est cité l'algorithme du calcul des paramètres électrophysiques et constructifs du convertisseur proposé. Est examiné la question de la thermocompensation lors de la mesure de la grandeur de la déformation plastique.

Авторы: *Яцинин Юрий Владимирович* – магистрант; *Королев Андрей Павлович* – кандидат технических наук, доцент кафедры «Материалы и технология», ГОУ ВПО «ТГТУ».

Рецензент: *Исаева Ольга Вячеславовна* – кандидат химических наук, доцент кафедры «Физика», ГОУ ВПО «ТГТУ».
