

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО- ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ



УДК 681.518; 681.586

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ И ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ АЛГОРИТМ НЕПРЕРЫВНО РАСПРЕДЕЛЕННОГО ПОЛУПРОВОДНИКОВОГО ДАТЧИКА ПРОФИЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В НЕИЗОТЕРМИЧЕСКИХ ПОТОКАХ

Ю.К. Евдокимов¹, Х.С.А. Мохаммед¹, Л.Д. Храмов²

¹КНИТУ-КАИ «Казанский национальный исследовательский технический
университет

им. А.Н. Туполева-КАИ», г. Казань, Россия

²ООО «НПП «Центр реле и автоматики», г. Чебоксары, Россия

evdokimov1@mail.ru, khalil.mohammed@mail.ru, hl@mail.ru

Резюме: В данной работе предлагается математическая модель и измерительный алгоритм полупроводникового одномерного распределенного датчика, предназначенный для измерения температурных полей в неизотермических потоках жидкости и газа. Описывается устройство датчика, его эквивалентная схема и схема включения в измерительную цепь. Предлагается пошаговый измерительный алгоритм, включающий необходимые электроизмерительные операции и алгоритм математической обработки первичной измерительной информации с целью определения измеряемого температурного поля.

Ключевые слова: распределенный датчик, полупроводниковая rpr^+ - структура, измерительный алгоритм, температурное поле, неизотермический поток, уравнение Риккати, интегральное уравнение, входная проводимость

DOI: 10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-146-153.

Для цитирования: Евдокимов Ю.К., Мохаммед Х.С.А., Храмов Л.Д. Математическая модель и измерительный алгоритм непрерывно распределенного полупроводникового датчика профиля температуры в неизотермических потоках // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2019. Т. 21. № 1-2. С. 146-153. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-146-153.

**MATHEMATICAL MODEL AND MEASURING ALGORITHM OF CONTINUALLY
DISTRIBUTED SEMICONDUCTOR SENSOR OF A TEMPERATURE PROFILE IN
NON-ISOTHERMAL FLOWS**

Yu.K. Evdokimov¹, Kh.S.A. Mohammed¹, L.D. Hramov²

¹KNRTU-KAI «Kazan National Research Technical University named after
A.N. Tupolev-KAI », Kazan, Russia

²LLP “NPP“ Center of Relay and Automation ”, Cheboksary, Russia
evdokimov1@mail.ru, khalil.mohammed@mail.ru, hl@mail.ru

Abstract: This paper proposes a mathematical model and a measuring algorithm for a semiconductor one-dimensional distributed sensor designed to measure temperature fields in non-isothermal liquid and gas flows. A sensor device, its equivalent circuit and a circuit for connection to a measuring circuit are described. A step-by-step measurement algorithm is proposed, which includes the necessary electrical measuring operations and an algorithm for mathematical processing of the primary measurement information in order to determine the measured temperature field.

Keywords: distributed sensor, semiconductor pnp + - structure, measuring algorithm, temperature field, non-isothermal flow, Riccati equation, integral equation, input conductivity

For citation: Yu.K. Evdokimov, Kh.S.A. Mohammed, L.D. Hramov. Mathematical model and measuring algorithm of continually distributed semiconductor sensor of a temperature profile in non-isothermal flows. Proceedings of the higher educational institutions. ENERGY SECTOR PROBLEMS. 2019. vol. 21. № 1-2. pp.146-153. DOI:10.30724/1998-9903-2019-21-1-2-146-153.

Введение

Измерение температурных полей в неізотермических потоках жидкости и газа занимает важное место в решении ряда научных, технических и технологических задач.

Традиционные средства измерения температуры предполагают измерение локального или усредненного значения температуры. Для измерения температурного поля традиционными средствами, приходится использовать либо перемещаемый датчик-зонд, либо множество точечных датчиков с соответствующим числом соединительных проводов и измерительных каналов. Такой подход непременно приводит к усложнению конструкции датчика и увеличению объема измерительной аппаратуры, к снижению точности измерения из-за утечки тепла через конструктивные элементы датчика-зонда или соединительные провода множества точечных датчиков.

В статье описывается принципиально новый подход к измерению температурных полей, основанный на концепции распределенной измерительной среды [1]. В качестве измерительного преобразователя предлагается полупроводниковый одномерный распределенный датчик. Несомненными преимуществами данного датчика по сравнению с традиционными средствами измерения температурных полей, являются: простота конструкции; минимальное число проводников; отсутствие механически перемещаемых элементов; простота измерительной аппаратуры.

Устройство и схема включения датчика

Устройство полупроводникового одномерного распределенного датчика (ПП ОРД) для измерения температурных полей показано на рис. 1. ПП ОРД выполняется в виде одномерной полупроводниковой трехслойной структуры длиной L и размещается в измеряемом температурном поле. Отметим, что порядок чередования слоев разного типа проводимости не является существенным.



Рис. 1. Устройство полупроводникового одномерного распределенного датчика

Один из внешних слоев ПП ОРД выполняется резистивным с постоянным продольным погонным сопротивлением r_0 и имеет электрические выводы: «1» при $x = 0$ и «2» на конце датчика при $x = L$. Другой внешний слой обладает высокой продольной проводимостью и имеет один общий вывод «3». Высокая проводимость слоя достигается либо повышенной концентрацией носителей заряда, либо наличием проводящего электрода на поверхности по всей ее длине.

Измеряемое температурное поле $T(x)$, $x \in [0, L]$ воздействует на распределение электрических свойств ПП ОРД по ее длине. Электрическому воздействию и измерению доступны лишь граничные точки ПП ОРД через выводы «1», «2» и «3». Предлагаемая схема включения ПП ОРД во внешнюю измерительную цепь показана на рис. 2.

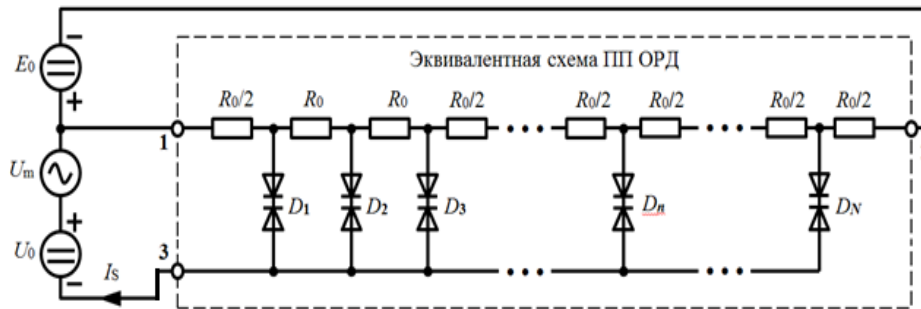


Рис. 2. Схема включения ПП ОРД в измерительную цепь.

ПП ОРД изображен в виде эквивалентной схемы, выделенной пунктирной линией

На рис. 2 датчик заменен его эквивалентной схемой в виде последовательной цепочки N четырехполюсников. Четырехполюсник с номером n соответствует элементарному отрезку ПП ОРД длиной $\Delta x = L/N$ и средней координатой $x_n = (n + 0,5) \cdot L/N$, $n = \overline{1, N}$. Продольные сопротивления всех четырехполюсников эквивалентной схемы одинаковы и равны $R_0 = r_0 \cdot \Delta x$. Полупроводниковая pnp -структура элементарного отрезка заменена встречно-последовательно включенными диодами и обозначена как D .

Стоит отметить, что ПП ОРД может быть выполнен не только в виде непрерывной полупроводниковой структуры с распределенными параметрами. В ряде случаев возможно исполнение ПП ОРД на основе дискретных диодов и резисторов, как показано на рис. 2. К таким случаям можно отнести: необходимость датчиков большой протяженности; требуется измерение не всего температурного поля, а его значений в конечном множестве точек и т.д. Полное сопротивление резистивного слоя выбирается таким, чтобы распределение напряжения вдоль ПП ОРД, создаваемое источником постоянного напряжения E_0 , было практически линейным. Для этого необходимо выполнить условие

$$E_0/r_0 \cdot L \gg I_S, \quad (1)$$

где I_S – ток, протекающий в цепи вывода «3» ПП ОРД (рис. 2). При соблюдении (1), под действием источников U_0 и E_0 вдоль по длине ПП ОРД устанавливается распределение напряжения

$$U(x) = U_0 - E_0 \cdot x/L. \quad (2)$$

Источник переменного напряжения малой амплитуды U_m предназначен для измерения дифференциальной входной проводимости ПП ОРД, которая определяется как

$$G_S = I_{Sm}/U_m, \quad (3)$$

где I_{Sm} – амплитуда переменной составляющей тока I_S ПП ОРД (рис. 2).

Математическая модель и измерительный алгоритм

В основу работы ПП ОРД положена температурная зависимость вольтамперной характеристики (ВАХ) pnp^+ -структуры, т.е. элементов D на рис. 2. Исходя из ВАХ идеального pn -перехода [2, 8], в работах [1, 6] и [3] предложено выражение зависимости локальной плотности тока pnp^+ -структуры $j(x)$ от приложенного напряжения $U(x)$, которое с учетом принятых обозначений представляется в виде

$$j(x) = \frac{j_{01}(x) \cdot [\exp(U(x)/\varphi_T) - 1]}{[j_{01}(x)/j_{02}(x)] \cdot \exp(U(x)/\varphi_T) + 1}, \quad (4)$$

где $j_{01}(x)$ – плотность обратного тока насыщения pn -перехода между резистивным и средним слоями ПП ОРД; $j_{02}(x)$ – плотность обратного тока насыщения другого pn -перехода ПП ОРД; $\varphi_T = k \cdot T/e$ – температурный потенциал. Напряжение $U(x)$ задается источниками U_m и E_0 (2).

Известно [2, 8], что значения $j_{01}(x)$ и $j_{02}(x)$ в выражении (4) обладают значительной температурной чувствительностью. В зависимости от полупроводникового материала и технологии получения pn -перехода данные величины увеличиваются почти в 2 раза при приращении температуры на $8 \dots 10$ °С.

Дифференцируя выражение (4) по напряжению, получим распределение погонной поперечной дифференциальной проводимости ПП ОРД:

$$g_0(x) = \frac{dj(x)}{dU(x)} = \frac{j_{01} \cdot \exp(U(x)/\varphi_T)}{\varphi_T \cdot [(j_{01}/j_{02}) \cdot \exp(U(x)/\varphi_T) + 1]} - \frac{j_{01}^2 \cdot \exp(U(x)/\varphi_T) \cdot [\exp(U(x)/\varphi_T) - 1]}{j_{02} \cdot \varphi_T \cdot [(j_{01}/j_{02}) \cdot \exp(U(x)/\varphi_T) + 1]^2}. \quad (5)$$

На рис. 3 показаны примерные графики зависимостей плотности тока (4) и поперечной погонной дифференциальной проводимости (5) от напряжения при равных значениях $j_{01}(x)$ и $j_{02}(x)$ для разных значений температур в точке с координатой x .

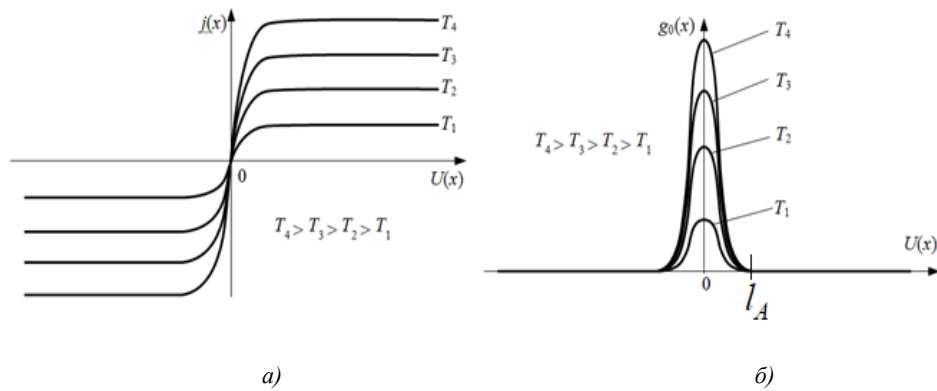


Рис. 3. Зависимости плотности тока (а) и погонной поперечной дифференциальной проводимости (б) ПП ОРД от напряжения при разных температурах

Анализ выражений (4) и (5) показывает, что насыщение $j(x)$ и обнуление $g_0(x)$ практически наступают в окрестности напряжения около 0,1 В. Таким образом, «активным» является очень короткий участок ПП ОРД, находящийся под напряжением $U(x) \approx 0$. Отсюда следует, что согласно выражению (2) средняя координата «активного» участка ПП ОРД зависит от напряжений источников и определяется как

$$x_A = L \cdot U_0 / E_0, \quad U_0 \in [0, E_0], \quad (6)$$

а ее длина примерно равна

$$l_A = L \cdot 0,2\text{В} / E_0. \quad (7)$$

При малой поперечной дифференциальной проводимости ПП ОРД падение переменного напряжения на продольном сопротивлении резистивного слоя ПП ОРД ничтожно мало, и входная дифференциальная проводимость (3) равна

$$G_S = \int_0^L g_0(x) dx. \quad (8)$$

Когда поперечная дифференциальная проводимость ПП ОРД становится сравнительно большой, формула (8) становится неприменимой, т.к. необходимо учесть продольное сопротивление датчика. Выведем уравнение связи между входной проводимостью датчика в точке с координатой x и его погонными параметрами. Для этого рассмотрим элементарный участок длиной dx , эквивалентную схему которого представим в виде Г-образного четырехполюсника.

Входную дифференциальную проводимость ПП ОРД в сечении x выразим как

$$G(x) = \frac{1}{r_0 \cdot dx + \frac{1}{G(x+dx) + g_0(x) \cdot dx}} = \frac{G(x+dx) + g_0(x) \cdot dx}{r_0 \cdot G(x+dx) \cdot dx + r_0 \cdot g_0(x) \cdot dx^2 + 1}. \quad (9)$$

Разделив числитель и знаменатель уравнения (9) на dx , получим

$$r_0 \cdot G(x) \cdot G(x+dx) + r_0 \cdot g_0(x) \cdot G(x) \cdot dx + \frac{G(x)}{dx} = \frac{G(x+dx)}{dx} + g_0(x). \quad (10)$$

При $dx \rightarrow 0$ в уравнении (10) можно считать, что

$$G(x) \cdot G(x+dx) \rightarrow G^2(x), \quad (11)$$

$$r_0 \cdot g_0(x) \cdot G(x) \cdot dx \rightarrow 0. \quad (12)$$

Перенеся все слагаемые уравнения (10) в одну сторону, с учетом (11) и (12) получим

$$dG(x)/dx - r_0 \cdot G^2(x) + g_0(x) = 0. \quad (13).$$

Нелинейное дифференциальное уравнение (13) типа Риккати устанавливает связь между погонными параметрами ПП ОРД и его входной проводимостью. Его решение должно удовлетворять граничному условию $G(x)|_{x=L} = 0$. Метод численного решения уравнения (13) подробно изложен в работах [1, 5].

Из приведенных рассуждений следует, что температурное поле $T(x)$ отображается на зависимости входной дифференциальной проводимости G_S от напряжения U_0 . Следовательно, измерение $T(x)$ с помощью ПП ОРД заключается в электрическом измерении зависимости $G_S(U_0)$ и вычислении $T(x)$. При этом предполагается, что температурные зависимости характеристик $j[U(x)]$ и $g_0[U(x)]$ заранее известны из теории или получены в результате градуировки.

Характеристики pnp^+ -структуры датчика (4) и (5) являются идеализированными. В этом случае измерительный алгоритм сводится к непосредственному вычислению координат x по формуле (6) и значений $T(x)$ по заранее полученной градуировочной характеристике [3, 6].

Реальные pnp^+ -структуры обладают характеристиками, несколько отличающимися от (4) и (5) [2, 7]. Дифференциальная погонная проводимость g_0 pnp^+ -структуры при этом оказывается отличной от нуля во всем диапазоне напряжений. В этом случае необходимо применение обобщенного алгоритма, безотносительного к виду нелинейности поперечной проводимости g_0 .

Алгоритм строится по итеративной схеме:

$$T^{(i+1)}(x) = T^{(i)}(x) + \delta T^{(i)}(x), \quad (14)$$

где i – номер итерации.

Итеративная поправка $\delta T^{(i)}(x)$ в выражении (14) находится путем решения интегрального уравнения Фредгольма первого рода:

$$\int_0^L S^{(i)}(U_0, x) \cdot \delta T^{(i)}(x) \cdot dx = G_S(U_0) - G^{(i)}(U_0, 0), \quad (15)$$

где $G^{(i)}(U_0, 0)$ – входная дифференциальная проводимость модели ПП ОРД, вычисленная для $T^{(i)}(x)$; $S^{(i)}(U_0, x)$ – ядро уравнения, имеющее смысл линейной чувствительности $G_S(U_0)$ к измеряемому полю $T(x)$.

Входная проводимость модели ПП ОРД $G^{(i)}(U_0, 0)$ вычисляется для каждого фиксированного значения напряжения U_0 в следующей последовательности:

- 1) вычисляется распределение напряжения $U(x)$ вдоль ОРД по формуле (2);
- 2) для приближения $T^{(i)}(x)$ и распределения $U(x)$ по градуировочной характеристике определяется распределение погонной поперечной проводимости $g_0(x)$;
- 3) при выполнении условия (1) $G^{(i)}(U_0, 0)$ вычисляется по формуле (8). В противном случае $G^{(i)}(U_0, 0)$ находится путем решением уравнения (9). При практической реализации алгоритма измерение зависимости $G_S(U_0)$ проводится для конечного

набора значений U_{0m} , $m = \overline{1, M}$, а значения температуры определяются на дискретной координатной сетке x_n , $n = \overline{1, N}$. При этом интегральное уравнение (15) преобразовывается в систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\|\mathbf{S}\|^{(i)} \cdot \|\delta T\|^{(i)} = \|\mathbf{G}_S\| - \|\mathbf{G}\|^{(i)}, \quad (16)$$

где $\|\mathbf{S}\|^{(i)}$ – матрица чувствительности с размерностью $M \times N$. Элементы s_{mn} матрицы чувствительности вычисляются методом малых локальных возмущений, подробно описанным в [5, 8].

Заключение

Рассмотрены математическая модель датчика и измерительный алгоритм непрерывно распределенного полупроводникового датчика pnp^+ -структуры для измерения температурных полей в неізотермических потоках. К несомненным достоинствам предложенного датчика перед традиционными средствами измерения температурных полей относятся: простота конструкции; минимальное число проводников; отсутствие механически перемещаемых элементов; малый объем измерительной аппаратуры. Измерительный алгоритм, несмотря на кажущуюся сложность вычислений, практически реализуем с использованием современных вычислительных средств.

Литература

1. Евдокимов Ю.К. Распределенные измерительные среды : дис. ... докт. техн. наук. г. Казань, 1995.
2. Leontyev A.P., Yaroshchuk I.O., Smirnov S.V., A.V. Kosheleva A.A., Pivovarov A.V., Samchenko A.H., and Shvyrev A.N., A Spatially Distributed Measuring Complex for Monitoring Hydrophysical Processes on the Ocean Shelf // Physical instruments for ecology, medicine, and biology. 2017. Vol. 60, No. 1. P. 130–136.
3. Харитонов А.М. Техника и методы аэрофизического эксперимента : книга. Омск, 2017.434с.
4. Темьянов Б.К. Обратная операторная задача для частотно-импедансной модели неоднородной акустической среды: численные и экспериментальная реализации // Нелинейный мир. 2015. №3. С.19–26.
5. Храмов Л.Д. Распределенные электродиффузионные датчики и методы измерения гидродинамических полей : дис. канд. техн. наук. Чебоксары, 2000.
6. Волков В.С. Исследования диагностических моделей интеллектуальных полупроводниковых датчиков давления / Цыпин. // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. 2012. №2. С.39–45.
7. Еналеев Р.Ш., Теляков Э.Ш., Красина И.В., Гасилов В.С., Тучкова О.А. Методы измерения температурных полей // Вестник Восточно-Сибирского института. 2013. №5. С.322–332.
8. Genki Yoshikawa. Two Dimensional array of piezoresistive nanomechanical membranetype surface stress with improved sensitivity/ Genki Yoshikawa, Terunobu Akiyama // sensors. 2015. №2. P.11–19.

Авторы публикации

Евдокимов Юрий Кириллович – д-р. техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Радиоэлектроники и информационно-измерительной техники» Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ (КНИТУ-КАИ). E-mail: evdokimov1@mail.ru.

Мохаммед Халил Султан Абдулла – аспирант Казанского национального исследовательского технического университета им. А.Н. Туполева-КАИ. E-mail: khalil.mohammed@mail.ru.

Храмов Лев Дмитриевич – канд. техн. наук, начальник конструкторского отдела новых разработок ООО «НПП «Центр реле и автоматики». E-mail: hl@mail.ru.

References

1. Evdokimov Yu.K. Distributed measuring media : Thesis for the degree of Doctor of Technical Sciences. Kazan, 1995.
2. Leontyev A.P., Yaroshchuk I.O., Smirnov S.V., A.V. Kosheleva A.A., Pivovarov A.V., Samchenko A.H., and Shvyrev A.N. A Spatially Distributed Measuring Complex for Monitoring Hydrophysical Processes on the Ocean Shelf // Physical instruments for ecology, medicine, and biology. 2017. Vol. 60, No. 1. P. 130–136. © Pleiades Publishing, Ltd., 2017.
3. Kharitonov A.M. Technique and methods of aerophysical experiment : book. Omsk, 2017. 434p.
4. Temyanov B.K. Inverse operator problem for the frequency-impedance model of an inhomogeneous acoustic medium: numerical and experimental implementations // Nonlinear World. 2015. №3. P.19–26.
5. Khramov L.D. Distributed electrodiffusion sensors and methods for measuring hydrodynamic fields. : Thesis for the degree of candidate of technical sciences. Cheboksary, 2000.
6. Volkov V.S. Investigations of diagnostic models of intelligent semiconductor pressure sensors, Tsy-pin, Izmer. Monitoring Control. Control. 2012. № 2. P.39–45.
7. Enaleev R.Sh., Telyakov E.Sh., Krasina I.V., Gasilov V.S., Tuchkova O.A. Methods for measuring temperature fields // Herald of the East-Siberian Institute. 2013. №5. P.322–332.
8. Genki Yoshikawa. Two Dimensional array of piezoresistive nanomechanical membranetype surface stress with improved sensitivity/ Genki Yoshikawa, Terunobu Akiyama // sensors. 2015. №2. P.11–19.

Authors of the publication

Yurij K. Evdokimov – Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia.

Halil Sultan Abdulla Mohammed - Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev-KAI, Kazan, Russia.

Lev D. Hramov - “NPP“Center of Relay and Automation”, Cheboksary, Russia.

Поступила в редакцию

30 ноября 2018 г.