ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные исследования показали, что использование в качестве материала диэлектрических слоев для пассивации активных структур интегральных схем на GaAs собственного оксида, полученного реактивным ионнолучевым распылением мишени из арсенида галлия, является перспективным. Применение ионной бомбардировки конденсирующейся пленки оксида привело к резкому ухудшению параметров ПТБШ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Телеш, Е.В. Пассивация полевых транзисторов с барьером Шоттки на арсениде галлия с применением ионно-лучевого распыления диэлектрических мишеней / Е.В. Телеш // Электроника–инфо. – 2015. – №7 (121). – С. 59–62.
- Телеш, Е.В. Формирование пассивирующих слоев для микроэлектронных устройств на GaAs реактивным ионно-лучевым распылением / Е.В. Телеш // IV Международная научная конференция «Проблемы взаимодействия излучения с веществом», посвященная 90-летию со дня рождения Б.В. Бокутя, 9–11 ноября 2016 г.: [материалы] в 2 частях. Ч. 2 / редкол.: С.А. Хахомов (гл. ред.) [и др.]. – Гомель: ГГУ им. Ф. Скорины, 2016. – С. 155–159.
- Лежава, Н.Г. Применение собственного оксида арсенида галлия для создания изоляции активных компонентов интегральных схем на GaAs /Н.Г. Лежава, А.П. Бибилашвили, А.Б. Герасимов // Письма в ЖТФ. 2005. Т. 31. Вып. 2. С. 63–66.
- 4. Приборы и технология на основе непланарного кремния / Л.В. Кожитов, Т.Т. Кондратенко, В.В. Крапухин, Т.Я. Кондратенко // Новые материалы. М.: МИСиС, 2002. С. 15–184.

ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ТЕРМОЭДС К ДЕФОРМАЦИИ В ТОЛСТОПЛЕНОЧНЫХ РЕЗИСТОРАХ

М. Турсунов¹, А. Дехканов¹, Г. Абдурахманов¹, Г. Вохидова², В. Ксеневич³, Д. Ташмухамедова⁴

¹⁾ Национальный университет Узбекистана им. Мирзо Улугбека, ул. Университетская, 4, 100174 Ташкент, Узбекистан, e-mail: muhriddintursunov.1995@mail.ru
 ²⁾ НОУ Альфаком, пр. А. Темура, 3/1, 100017 Ташкент, Узбекистан
 ³⁾ Белорусский государственный университет, пр. Независимости, 4, 220030 Минск, Беларусь
 ⁴⁾ Ташкентский государственный технический университетул. Университетская, 2, 100094 Ташкент, Узбекистан

Экспериментально показано, что в толстопленочном резисторе чувствительность к механической деформации у термоЭДС в ~ 20–120 раз выше, чем у электропроводности. При этом влияние температуры окружающей среды на термоЭДС незначительно и может быть доведено почти до уровня, характерного для металлических тензодатчиков.

Ключевые слова: коэффициент тензочувствительности; тензодатчик; диоксид рутения; растяжение и сжатие, прогиб.

STRAIN SENSITIVITY OF THERMOEMF IN THICK-FILM RESISTORS

M. Tursunov¹, A. Dekhkonov¹, G. Abdurakhmanov¹, G. Vokhidova², V. Ksenevich³, D. Tashmukhamedova⁴

¹⁾ National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek, Universitetskaya str., 4, 100174 Tashkent, Uzbekistan

²⁾ Alfakom Non-state Training Center, A. Temur av., 3/1, 100017, Tashkent, Uzbekistan
 ³⁾ Belarusian State University, Nezavisimosti av. 4, 220030 Minsk, Belarus

⁴⁾ Tashkent State Technical University named after Islom Karimov, Universitetskaya str., 2, 100094 Tashkent, Uzbekistan

Corresponding author: M. Tursunov (muhriddintursunov.1995@mail.ru)

It has been experimentally shown that the strain sensitivity of thermoEMF of the thickfilm resistor is $\sim 20-120$ times higher than the strain sensitivity of the electrical conductivity. Influence of ambient temperature on thermoEMF can be as small as that of metal strain gauges.

Key words: gauge factor; strain gauge; ruthenium dioxide; tensile and compression; deflection.

введение

Датчики деформации (тензодатчики) играют важную роль в робототехнике, приборостроении, медицине и во многих других отраслях науки и промышленности, например, при автоматизации различных технологических процессов [1–3]. Наибольшее распространение получили пьезорезистивные датчики, работа которых основана на изменении их сопротивления под действием механического воздействия (деформации). Исследованию пьезорезистивных свойств различных материалов посвящено большое число работ. Основные параметры таких датчиков приведены в таблице 1.

Таблица 1

Тип датчика	Диапазон сопротивле- ния, Ом	Коэффициент тензочувстви- тельности КТЧ	Температурный коэффициент сопротивления ТКР, 10 ⁻⁶ К ⁻¹	Стабиль- ность
Металлический	100-1000	2–5	5–10	Очень высокая
Полупровод- никовый	1000-10000	150	90000	Низкая
Толстопленочный	100-10000	10-20	100-1000	Высокая

Основные параметры пьезорезистивных тензодатчиков

Такое сочетание параметров тензодатчиков не всегда удовлетворяет предъявляемым к ним требованиям. Поэтому продолжаются поиски новых физических принципов работы тензодатчиков. Одним из вариантов является использование термоЭДС $U_{\rm T} = S\Delta T$ в качестве информативного параметра. Здесь ΔT – перепад температур вдоль чувствительного элемента (между горячим и холодным концами), S – коэффициент термоЭДС (коэффициент Зеебека). Помимо создания датчиков температуры, измерения термоЭДС используются как чувствительный индикатор структурных превращений в твердых телах, а также для обнаружения в них скрытых фазовых переходов. Однако в литературе не обнаружены сведения о возможности использования термоЭДС толстопленочных резистивных элементов для измерения деформации. В то же время предыдущие наши исследования [4] показали, что влияние структурных изменений на термоЭДС толстопленочных резисторов может быть существенно выше, чем на сопротивление. Поэтому целью настоящей работы было сравнительное исследование чувствительности термоЭДС и сопротивления толстопленочных резисторов к механическим воздействиям (деформации).

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ



Рис. 1. Термоэлектрический толстопленочный тензодатчик:
 1 – нагреватель, 2 – электроды нагревателя,
 3 – слой легированного стекла (ветвь термопары),
 4 – металлический электрод термопары,
 5 – керамическая подложка

Для изучения тензочувствительности термоЭДС толстопленочных резисторов были изготовлены по стантолстопленочной дартной технологии [5] образцы (рис. 1), состоящие из нагревателя 1 с металлическими электродами 2, термопары (чувствительного элемента), состоящей из слоя легированного стекла 3 и металли-

ческого электрода 4, размещенных на керамической подложке 5 размерами 20×4×0,3 мм на основе 96% оксида алюминия. Металлические электроды 2 и 4 изготовлены из серебросодержащей электропроводящей пасты ПП-1 (ЭЛМА-Пасты, Зеленоград, Россия). Нагреватель 1 и ветвь термопары 3 изготовлены из силикатного стекла с различным содержанием оксидов (масс. %), которое затем было легировано RuO₂. При измерениях использовались слои стекла 3 различных составов (таблица 2). Нагреватель также изготавливался из силикатного стекла состава, соответствующего чувствительному элементу № 3, но легированного 40 масс. % RuO₂. Сопротивление нагревателя составляло 340 Ом, величины сопротивлений чувствительного элемента составов 1, 2 и 3 были 2199, 3646 и 166.6 Ом соответственно.

Таблица 2

Образец S	Компоненты стекла						Лигатура		
	SiO ₂	PbO	Al_2O_3	BaO	CuO	MnO ₂	B_2O_3	MgO	RuO ₂
1	33	67							30
2	27	67		4				2	20
3	11	61.9	0.7		1.4	10	15		30

Составы изученных образцов (масс. %)



Рис. 2. Приспособление для измерения тензочувствительности:
1 – держатель образца, 2 – толкатель, 3 – ручка перемещения толкателя, 4 – ручка перемещения микрометра,
5 – часовой индикатор 1 МИГ (Россия) с ценой деления 1 мкм



 Рис. 3. Схематическое изображение способа измерения тензочувствительности сопротивления и термоЭДС толстопленочных образцов: 1 – неподвижная точка опоры; 2 – чувствительный элемент; 3 – керамическая подложка; а и d – толщина и прогиб подложки соответственно; L = 18 мм – расстояние между неподвижными опорами

Температура в помещении при измерениях составляла 25 °C. На вставке к рис. 4 показано тепловое изображение образца при нагреве чувствительного элемента постоянным током. Элементы 1-5 соответствуют обозначениям на рис. 1., 6 – линия, вдоль которой измерялось распределение температуры, показанное на рис. 4. Расстояние x на рис. 4 представлено в условных единицах, отметка 65 соответствует длине ли-

Тензочувствительность образцов изучалась на самодельном приспособлении, показанном на рис. 2. Принцип проведения измерений пояснен на рис. 3.

Перепад температур между горячими и холодными концами чувствительного элемента 2 был равен 33 К и контролировался тепловизором Fluke Ti 450 Pro с точностью 0,1 К. ТермоЭДС и сопротивление измерялись нановольтметром 2182A Keithley и мультиметром DM3058 RIGOL соответственно. Были проведены также рентгеноструктурные исследования стекол различного состава с использованием дифрактометра XRD-6100 Shimadzu. Сравнение функции радиального распределения атомов, вычисленных из рентгенодифракционных данных для исследованных составов стекол, показывает, что максимальным беспорядком в расположении атомов характеризуется образец #3, а наибольшее упорядочение имеет образец # 2.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На результаты измерения термоЭДС и тензочувствительности существенно влияет однородность образца. Для контроля однородности чувствительного элемента 2 использовалось снимаемое тепловизором его тепловое изображение, возникающее при пропускании через контакты а и b постоянного тока. Распределение температуры вдоль чувствительного элемента 2, показанное на рис. 4, позволяет считать образец однородным.

нии 5 на вставке к рис. 4. Провал в области 53–65 соответствует области металлического контакта 4 термопары, температура которого ниже из-за низкого удельного сопротивления и соответственно меньшего выделения теплоты Джоуля.

Растяжение или сжатие образца $\Delta l/l_0$ по измеренному прогибу *d* вычислялось по формуле [6, 7]:

$$\varepsilon = \frac{\Lambda l}{l_0} = \frac{6ad}{L^2} \tag{1}$$

$$GF_R = \frac{\prod R/R_0}{\varepsilon}$$
(2)

$$GF_{U_{\rm T}} = \frac{\Pi U_{\rm T}/U_{\rm T0}}{\epsilon} \tag{3}$$

где R_0 и U_{T0} – начальные значения сопротивления и термоЭДС (между контактами *a* и *b*) недеформированного образца соответственно. Для тензочувствительности *GF* введены индексы *R* и U_T для того, чтобы отличать эти свойства для одного и того же образца. Результаты измерения $\Delta R(\varepsilon)$ и $\Delta U_T(\varepsilon)$ для чувствительного элемента, изготовленного из силикатного стекла состава *l*, показаны на рис. 5 вместе для сравнения. Из рис. 5 видно, что в пределах измеренных деформаций обе величины изменяются линейно, при этом изменения $\Delta U_T/U_{T0}$ существенно превышают изменения $\Delta R/R_0$. Вычисленные по результатам измерений величины тензочувствительности *GF_R* и *GF_{UT}*, а также их отношение для стекол всех 3-х различных составов приведены в табл. 3

Таблица 3

21

123

термоэлектрических тензодатчиков						
Образец	<i>R</i> ₀ , Ом	<i>U</i> _{T0} , μV	GF_R	GF_{UT}	GF_{UT}/GF_R	
1	2199	306.0	29	1673	58	

31

7.9

661

973

217.1

1.184

3646

166.6

2

3

Экспериментальные параметры толстопленочных	K
термоэлектрических тензодатчиков	

Было обнаружено, что у силикатных стекол тензочувствительность термоЭДС GF_{UT} превышает чувствительность сопротивления к деформации GF_R в ~20–120 раз в зависимости от состава стекла и уровня легирования. При этом отношение тензочувствительности термоЭДС и сопротивления GF_{UT}/GF_R имеет наибольшее значение для образца #3, имеющего максимальный беспорядок в расположении атомов, и является минимальным для образца #2 с наибольшим упорядочением.

Влияние изменений температуры окружающей среды может быть достаточно точно компенсировано изменением тока нагревателя так, чтобы перепад температур ΔT вдоль чувствительного элемента оставался постоянным. Тогда измеренные значения $\Delta U_{\rm T}$ будут отражать только влияние деформации.

К сожалению, в рамках современной физики термоэлектрических явлений, основанной на законах термодинамики (в том числе неравновесной), которая содержит ряд внутренних противоречий [8], не всегда можно объяснить экспериментальные закономерности, в частности, влияние изменений состава и структуры материала на его термоэлектрические свойства. Можно предположить, что высокие значения *GF*_{UT} по сравнению с GF_R обусловлены тем, что коэффициент термоЭДС *S* пропорционален производной плотности состояний по энергии, тогда как сопротивление *R* обратно пропорционально самой плотности состояний [9]. Первая может иметь большую абсолютную величину в неупорядоченных материалах вследствие резкого обрыва плотности состояний (рис. 2.18 в [9]), что характерно и для толстопленочных резисторов [4].



Рис. 4. Распределение температуры вдоль чувствительного элемента 3 (слоя легированного стекла), нагретого протекающим током при отключенном нагревателе 1. Вставка: тепловое изображение термоэлектрического тензодатчика при отключенном нагревателе 1 и нагреве термопары постоянным током. График распределения температуры снят вдоль линии 6





ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально установлено, что в легированных оксидом рутения силикатных стеклах тензочувствительность термоЭДС GF_{UT} превышает тензочувствительность сопротивления GF_R в ~20–120 раз и более в зависимости от состава стекла и уровня легирования. Таким образом, термоЭДС легированного силикатного стекла может быть чувствительным параметром для измерения деформации (сжатия или растяжения), а силикатные стекла могут использоваться в качестве эффективного материала для создания тензодатчиков. Дальнейшие исследования будут направлены на изучение влияния деформации на сопротивление и термоЭДС для других составов легированного стекла, а также на компьютерное моделирование результатов измерений с целью установления природы высокой чувствительности термоЭДС к механической деформации силикатных стекол.

Работа выполнена в рамках совместного белорусско-узбекского проекта, финансируемого МИРРУ (№ IL-482109667) и БРФФИ (№ Ф22УЗБ-056) с узбекской и белорусской стороны соответственно, а также в рамках задания ГПНИ 3.02.1 (НИР 4) «Конвергенция-2025».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Fraden, J. Handbook of Modern Sensors. Physics, Design and Applications. 4th Ed. / J. Fraden. New York: Springer, 2010. – 681 p.
- Zhang, J. Molecular Sensors and Nanodevices. 2nd Ed. / J. Zhang, K. Hoshino. Berlin: Elsevier, 2019. – 581 p.
- Development and Application of Resistance Strain Force Sensors / Y. Zhao [et al.] // Sensors. 2020. – Vol. 20. – P. 5826 (1–18).
- Abdurakhmanov, G. Electrical conduction in doped silicate glass (thick film resistors) / G. Abdurakhmanov // New Insights into Physical Sciences / London-Hooghly: Book Publishers International, 2020. – Vol. 4. – P. 47–71.
- 5. Handbook of Sensors and Actuators: Thick-films Sensors / Edited by M. Prudentiziati. Amsterdam: Elsevier, 1994. 477 p.
- Zheng, Y. An explanation of thermal behaviour of thick film strain gauges / Y. Zheng, J. Atkinson and R. Sion // J. Phys. D: Appl. Phys. – 2003. – Vol. 36. - P. 1153–1158.
- An evaluation of some commercial thick film resistor materials for strain gauges / Hrovat M. [et al.] // J. Mater. Sci. Lett. – 1994. – Vol. 13. – P. 992–995.
- Abdurakhmanov, G. Modern Physics of Thermoelectric Phenomena: Achievements and Problems / G. Abdurakhmanov, D. P. Rai and G. Vokhidova // New Materials and Devices for Thermoelectric Power Generation / Ed. by B. I. A Ismail. – London: IntechOpen, 2023. – P. 119–142.
- 9. Мотт, Н. Электронные процессы в некристаллических веществах: в 2-х т. Пер. с англ. / Н. Мотт, Э. Дэвис. М.: Мир, 1982. Т. 1. 368 с.

ГРАДИЕНТНЫЕ ЭЛЕКТРОПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ИЗОБРАЖЕНИЯ В НЕРАЗРУШАЮЩЕМ КОНТРОЛЕ ПОВЕРХНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ СТРУКТУР

А. К. Тявловский, А. Л. Жарин, К. В. Пантелеев, В. А. Микитевич, О. К. Гусев, Р. И. Воробей

Белорусский национальный технический университет, пр. Независимости, 65, 220013 Минск, Беларусь, e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Для повышения быстродействия при картировании дефектов поверхности полупроводниковой пластины методом сканирующего зонда Кельвина предложено использование невибрирующего электрометрического зонда. По результатам полунатурного моделирования показано, что получаемое с помощью такого зонда градиентное электропотенциальное изображение обеспечивает эффективное выявление таких дефектов, как кристаллические дислокации и локальные загрязнения поверхности полупроводниковой пластины. Путем интегрирования измерительного сигнала невибрирующего зонда может быть получена также карта распределения контактной разности потенциалов, аналогичная получаемой традиционным методом вибрирующего зонда Кельвина-Зисмана, что позволяет выявлять также такие дефекты, как неравномерность эквивалентной электрической толщины окисла или неравномерность распределения примеси.

Ключевые слова: полупроводниковая пластина; поверхность; дефект; контактная разность потенциалов; зонд Кельвина.