



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

H01C 17/06 (2021.02)

(21)(22) Заявка: 2020140228, 07.12.2020

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
07.12.2020

Дата регистрации:
29.06.2021

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 07.12.2020

(45) Опубликовано: 29.06.2021 Бюл. № 19

Адрес для переписки:

440026, г. Пенза, ул. Володарского, 8/10, АО
"НИИФИ", генеральный директор Новоселов
Алексей Сергеевич

(72) Автор(ы):

Волохов Игорь Валерианович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Акционерное общество
"Научно-исследовательский институт
физических измерений" (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2280905 C2, 27.07.2006. RU
2396634 C2, 18.08.2010. RU 2398195 C1,
27.08.2010. RU 2326460 C1, 10.06.2008. RU
2411474 C1, 10.02.2011. RU 2498249 C1,
10.11.2013. RU 2089656 C1, 10.09.1997. US
2005068989 A1, 31.03.2005. EP 0348658 A2,
03.01.1990.

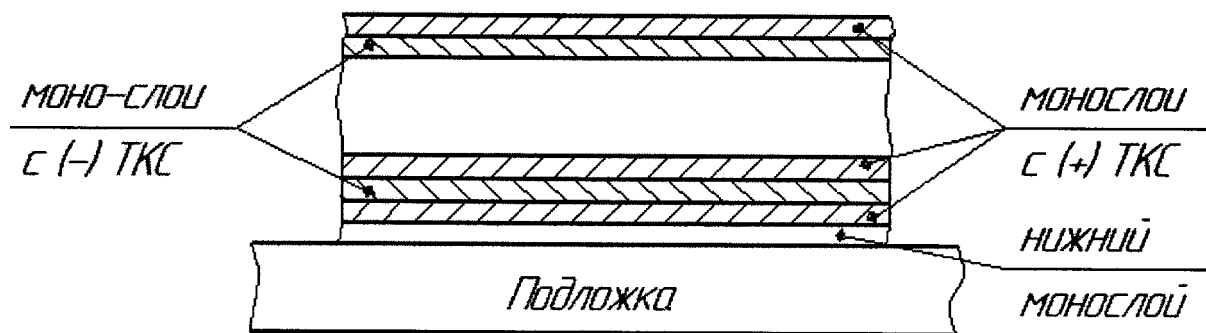
(54) Способ изготовления многослойной тонкопленочной гетероструктуры с заданной величиной удельного поверхностного сопротивления

(57) Реферат:

Изобретение относится к области электронной техники, а именно к средствам измерения, в которых применяют тонкопленочные тензорезисторы на металлической подложке. Способ изготовления тонкопленочной нано- и микроразмерной системы датчика физических величин с заданным положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) резистивных элементов заключается в том, что на планарной стороне твердотельной подложки методами вакуумного распыления образуют гетерогенную структуру из нано- и микроразмерных пленок материалов, содержащую тонкопленочные диэлектрические, резистивные и контактные слои, после чего с использованием фотолитографии и травления формируют резистивные элементы (тензорезисторы, терморезисторы), контактные проводники и контактные площадки к ним. Резистивный слой формируют методом магнетронного распыления в вакуумной камере одновременно из двух отдельных источников.

Формирование резистивных слоев методом магнетронного распыления в вакуумной камере проводят с использованием одного из элементов группы металлов: железо (Fe), никель (Ni), кобальт (Co) с одной мишени и одного из металлических лигандов: ванадий (V), хром (Cr), титан (Ti) с другой мишени, путем изменения соотношения компонентов в гетероструктуре по процентному содержанию от 10% до 90% формируют требуемую величину удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки и момент окончания процесса напыления многослойной гетероструктуры контролируют по сопротивлению свидетеля, расположенного на карусели подложек, а количество циклов совместного напыления слоев гетероструктуры определяют математическим выражением. Технический результат заключается в повышении температурной стабильности начального выходного сигнала тензосхемы датчика в широком температурном диапазоне от криогенных температур до температуры +250°C.

3 ил.



Фиг. 1

RU 2750503 C1

RU 2750503 C1



FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC
H01C 17/06 (2021.02)

(21)(22) Application: **2020140228, 07.12.2020**

(24) Effective date for property rights:
07.12.2020

Registration date:
29.06.2021

Priority:

(22) Date of filing: **07.12.2020**

(45) Date of publication: **29.06.2021** Bull. № 19

Mail address:

**440026, g. Penza, ul. Volodarskogo, 8/10, AO
"NIIFI", generalnyj direktor Novoselov Aleksej
Sergeevich**

(72) Inventor(s):

Volokhov Igor Valerianovich (RU)

(73) Proprietor(s):

**Aktsionernoe obshchestvo
"Nauchno-issledovatel'skij institut fizicheskikh
izmerenij" (RU)**

(54) **METHOD FOR PRODUCING A MULTILAYER THIN-FILM HETEROSTRUCTURE WITH A GIVEN VALUE OF SPECIFIC SURFACE RESISTANCE**

(57) Abstract:

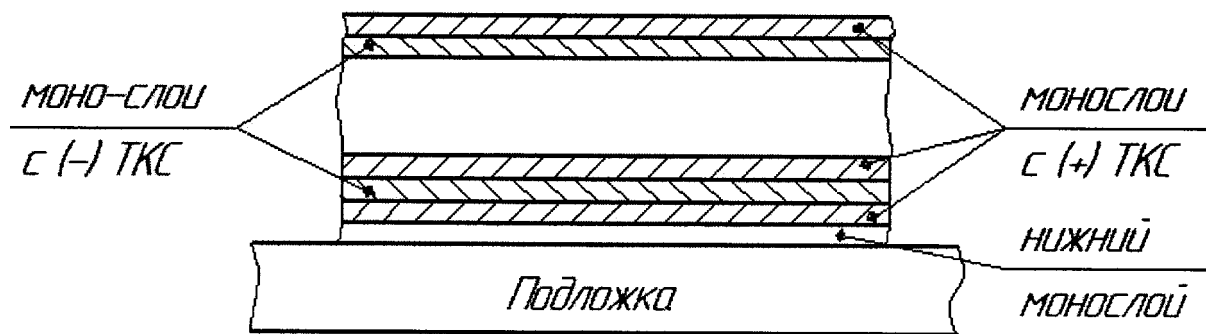
FIELD: electronic technology.

SUBSTANCE: invention relates to the field of electronic technology, namely, to measuring instruments in which thin-film strain gages on a metal substrate are used. A method for manufacturing a thin-film nano- and micro-dimensional system of a physical quantity sensor with a given positive temperature coefficient of resistance (TCR) of resistive elements is proposed. A heterogeneous structure of nano- and micro-dimensional films of materials is formed on the planar side of a solid-state substrate by vacuum spraying methods containing thin-film dielectric, resistive and contact layers. After that, using photolithography and etching, resistive elements (strain gages, thermistors), contact conductors and contact pads to them are formed. The resistive layer is formed by magnetron spraying in a vacuum chamber simultaneously from two separate sources. The formation of resistive layers by magnetron spraying in

a vacuum chamber is carried out using one of the elements of the metal group: iron (Fe), nickel (Ni), cobalt (Co) from one target and one of the metal ligands: vanadium (V), chromium (Cr), titanium (Ti) from the other target. By changing the ratio of components in the heterostructure by a percentage from 10% to 90%, the required value of the specific surface resistance of the resistive film is formed. The end of the process of the multilayer heterostructure deposition is controlled by the resistance of the witness located at the substrate carousel. The number of cycles of joint deposition of heterostructure layers is determined by a mathematical expression.

EFFECT: technical result is an increase in the temperature stability of the initial output signal of the sensor strain circuit in a wide temperature range from cryogenic temperatures to a temperature of +250°C.

1 cl, 3 dwg



Фиг. 1

Изобретение относится к области электронной техники, а именно к средствам измерения, в которых применяют тонкопленочные тензорезисторы на металлической подложке, изготавливаемые с применением технологии тонких пленок.

При работе тонкопленочных тензорезисторных датчиков давления в системах управления и контроля изделий для особо жестких условий эксплуатации (ракетные и авиационные двигатели, турбонасосные агрегаты, топливные баки ракет-носителей и космических аппаратов) возникает ряд дестабилизирующих факторов, которые приводят к искажению информации о фактическом давлении рабочей среды в критических для надежности и безопасности зонах двигателей и других агрегатов на борту изделия.

Известна конструкция тензометрического датчика давления, где в качестве тензорезисторов применяют многослойную тонкопленочную гетероструктуру, в которой первый пакет слоев с многослойной (5 слоев) кристаллической гетероструктурой состоит из чередующихся слоев хрома и вольфрама с отрицательным ТКС и второй слой - из аморфной тонкой пленки тантала с положительным ТКС. В патенте предлагается формула, позволяющая вычислять величину ТКС тензорезистора исходя из сопротивления чередующихся слоев [USA патент 6,614,342 G01L 1/22, G01B 7/16, G01L 9/00, G01L 1/20, G01L 001/22, опубликован 02.09.2003].

Недостатком данной конструкции тензометрического датчика давления является низкая температурная стабильность тензорезистора обусловленная высоким начальным разбалансом тензомоста за счет окисления материалов тензорезистора от воздействия температуры и времени.

Известен материал металлопленочного аморфного резистивного слоя (на основе сплавов магнитных 3d-металлов, имеющих химический состав, включающий от 10 до 90 ат.% одного или двух элементов из группы металлов: железо (Fe), никель (Ni), кобальт (Co) и от 90 до 10 ат.% одного из металлов лигандов: ванадий (V), хром (Cr), титан (Ti) [RU патент 2280905, G11B 5/84, H01C 17/00, опубликован 27.07.2006] и способ получения резистивного слоя на его основе с применением технологии послойного ионно-плазменного (магнетронного) распыления мишеней из комбинации вышеуказанных чистых металлов в среде рабочего газа аргона при давлении 2×10^{-1} Па [RU патент 2122243, G11B 5/84, опубликован 20.11.1998].

Недостатком данного материала из композиции металлов Fe, Ni, Co и V, Cr, Ti и способа получения из них тонкопленочных резисторов является нестабильность начального выходного сигнала датчика связанного с высоким уровнем удельного поверхностного сопротивления (200-900 мкОм см) при больших значениях ТКС (1×10^{-4} 1/°C).

Наиболее близким к заявляемому решению является способ изготовления нано- и микроразмерной системы датчика физических величин с заданным положительным температурным коэффициентом сопротивления резистивных элементов, заключающийся в получении многослойной тонкопленочной гетероструктуры с тензорезисторами из чередующихся слоев никеля и титана методом магнетронного распыления. При этом плотности токов магнетронного разряда J_{Ti} и J_{Ni} на мишенях из Ti и Ni определяются из соотношения:

$$\frac{j_{Ni}}{j_{Ti}} = -0,0012 \cdot \left(\frac{\alpha}{10^{-5} [^{\circ}C^{-1}]} \right)^2 + 0,2544 \cdot \left(\frac{\alpha}{10^{-5} [^{\circ}C^{-1}]} \right) + 0,6717 \quad ,$$

где j_{Ti} и j_{Ni} - плотности токов магнетронного разряда на мишенях из титана (Ti) и никеля (Ni) соответственно;

α - значение ТКС тензорезисторов в интервале от $5 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ до $1 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$, при этом значение плотности тока J_{Ti} на мишени Ti выбирают в интервале от 10^{-3} до $5 \times 10^{-3} \text{ А/см}^2$ [RU патент 2554083, H01C 17/06, опубликован 27.06.2015].

Недостатком данного способа получения многослойной тонкопленочной гетероструктуры является низкая величина удельного поверхностного сопротивления получаемой тонкой резистивной пленки в диапазоне от 16 до 18 Ом/кв, что не позволяет формировать из нее тензосхемы с высокой температурной стабильностью начального выходного сигнала и применять эти тензосхемы в чувствительных элементах датчиков давления для систем управления и контроля изделий в особо жестких условиях эксплуатации.

Целью изобретения является повышение температурной стабильности тонкопленочных тензорезисторов для микроэлектромеханических датчиков абсолютного и избыточного давления в расширенном диапазоне рабочих температур, обусловленной получением тонкопленочной нано- и микроразмерной системы с заданным положительным минимальным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС).

Поставленная цель достигается тем, что в способе изготовления тонкопленочной нано- и микроразмерной системы датчика физических величин с заданным положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) резистивных элементов, заключающемся в том, что на планарной стороне твердотельной подложки методами вакуумного распыления образуют гетерогенную структуру из нано- и микроразмерных пленок материалов, содержащую тонкопленочные диэлектрические, резистивные и контактные слои, после чего с использованием фотолитографии и травления формируют резистивные элементы (тензорезисторы, терморезисторы), контактные проводники и контактные площадки к ним, при этом, резистивный слой формируют методом магнетронного распыления в вакуумной камере, одновременно из двух отдельных источников, согласно изобретения, формирование резистивных слоев методом магнетронного распыления в вакуумной камере проводят с использованием одного из элементов группы металлов: железо (Fe), никель (Ni), кобальт (Co) с одной мишени и одного из металлических лигандов: ванадий (V), хром (Cr), титан (Ti) с другой мишени, при этом путем изменения соотношения компонентов в гетероструктуре по процентному содержанию от 10% до 90% формируют требуемую величину удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки и момент окончания процесса напыления многослойной гетероструктуры контролируют по сопротивлению свидетеля, расположенного на карусели подложек, а количество циклов совместного напыления слоев гетероструктуры m_2 определяют по формуле:

$$m_2 = \left| \frac{m_{об} (a\alpha_2 + n_1\alpha_1)}{\alpha_2 + an_1\alpha_1} \right|,$$

где $m_{об}$ - общее количество циклов напыления, необходимое для обеспечения требуемой величины удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя R_S ;

a - коэффициент характеризующий соотношение циклов напыления m_3 и m_1 отдельных нанослоев только из материала с положительным ТКС;

m_3 - количество циклов напыления только нанослоя из резистивного материала с положительным ТКС;

n_1 - коэффициент соотношения приращения удельного поверхностного сопротивления

пленки второго металла $\Delta\rho_{s2}$ за один цикл напыления и приращения удельного поверхностного сопротивления пленки первого металла $\Delta\rho_{s1}$ за один цикл напыления определяют по формуле $n_1 = \Delta\rho_{s2}/\Delta\rho_{s1}$;

α_1 - ТКС нанопленки из первого металла;

α_2 - ТКС нанопленки из второго металла,

расчетная величина удельного поверхностного сопротивления R_{S1-2} отдельного резистивного слоя с положительным ТКС определяют из величин удельного поверхностного сопротивления взаимочередующихся нанослоев по формуле:

$$R_{S1-2} = \frac{R_s \cdot R_{s1}}{R_{s1} - R_s(1 + a)},$$

где a - коэффициент характеризующий соотношение циклов напыления m_3 и m_1 отдельных нанослоев только из материала с положительным ТКС;

R_{S1} - удельное поверхностное сопротивление нанослоя из первого металла;

R_s - общее удельное поверхностное сопротивление многослойной гетероструктуры, условием возможности управления величиной ТКС многослойной резистивной гетероструктуры является следующее неравенство $|\alpha_2| < |\ln_1 \alpha_1|$, ТКС (α_R) для

многослойного тонкопленочного тензорезистора со структурой резистивного слоя из взаимочередующихся нанослоев и отдельным слоем из материала с положительным ТКС определяют по формуле:

$$\alpha_R \approx \frac{m_{06} \cdot (a\alpha_2 + n_1\alpha_1) + m_2 \cdot (\alpha_2 + an_1\alpha_1)}{m_{06} \cdot [a \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + n_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)] + m_2 [(1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + an_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)]},$$

где m_{06} - общее количество циклов напыления, необходимое для обеспечения требуемой величины удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя R_s ;

m_2 - количество циклов совместного напыления взаимочередующихся нанослоев материалов с противоположными по знаку ТКС;

α_1 - ТКС нанопленки из первого металла;

α_2 - ТКС нанопленки из второго металла;

a - коэффициент характеризующий соотношение циклов напыления m_3 и m_1 отдельных нанослоев только из материала с положительным ТКС;

n_1 - коэффициент соотношения приращения удельного поверхностного сопротивления пленки второго металла $\Delta\rho_{s2}$ за один цикл напыления и приращения удельного поверхностного сопротивления пленки первого металла $\Delta\rho_{s1}$ за один цикл напыления определяют по формуле $n_1 = \Delta\rho_{s2}/\Delta\rho_{s1}$;

ΔT - диапазон температур замера ТКС,

ТКС (α'_R) для многослойного тонкопленочного тензорезистора со структурой резистивного слоя из взаимочередующихся нанослоев и отдельным слоем из материала с отрицательным ТКС определяют по формуле:

$$\alpha'_R \approx \frac{m'_{06} \cdot \alpha_2 + m'_2 \cdot n_1 \alpha_1}{m'_{06} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + m'_2 \cdot n_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)},$$

где m'_{06} - общее количество циклов напыления, необходимое для обеспечения

требуемой величины удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя R_S ;

m'_2 - количество циклов совместного напыления взаимочередующихся нанослоев материалов с противоположными по знаку ТКС;

α_1 - ТКС нанопленки из первого металла;

α_2 - ТКС нанопленки из второго металла;

n_1 - коэффициент соотношения приращения удельного поверхностного сопротивления пленки второго металла $\Delta\rho_{s2}$ за один цикл напыления и приращения удельного поверхностного сопротивления пленки первого металла $\Delta\rho_{s1}$ за один цикл напыления определяют по формуле $n_1 = \Delta\rho_{s2}/\Delta\rho_{s1}$;

ΔT - диапазон температур замера ТКС.

Многослойная тонкопленочная гетероструктура, полученная предлагаемым способом, позволяет сформировать удельное поверхностное сопротивление тонкопленочной гетероструктуры в диапазоне от 60 до 70 Ом/кв, что в свою очередь позволяет создать тензомост датчика давления с сопротивлением диагонали не менее 1,5 кОм. Эта конструктивная особенность тензомоста повышает помехоустойчивость и гарантированную чувствительность всей пространственно разделенной системы измерений давления, включающей в себя измерительную цепь датчика и электронный преобразователь сигнала в общей телеметрической системе управления и контроля сложными техническими объектами.

Управление формированием многослойной гетероструктуры осуществляют путем использования технологии магнетронного распыления одного из элементов из группы металлов: железо (Fe), никель (Ni), кобальт (Co) с одной мишени и одного из металлов лигандов: ванадий (V), хром (Cr), титан (Ti) с другой мишени. Управление величиной удельного поверхностного сопротивления тонкой пленки осуществляют путем изменения соотношения компонентов многослойной гетероструктуры по процентному содержанию от 10% до 90% и с контролем окончания процесса напыления тонкой пленки по сопротивлению свидетеля на карусели подложек. Величину сопротивления свидетеля задают заранее, исходя из количества квадратов напыляемой пленки на свидетель и требуемой величины удельного поверхностного сопротивления создаваемой многослойной гетероструктуры. Процесс контроля осаждения многослойной гетероструктуры с помощью свидетеля на карусели подложек позволяет управлять величиной удельного поверхностного сопротивления создаваемой многослойной гетероструктуры и величиной ее ТКС.

Необходимо отметить, что при общей толщине многослойной резистивной пленки порядка 80-130 нм каждый отдельный монослой будет иметь толщину менее 10 нм, то есть эти монослои правильнее будет называть нанослоями.

На фиг. 1 изображена структурная схема многослойной гетероструктуры тонкопленочного тензорезистора с взаимочередующимися нанослоями двух материалов и отдельным слоем из материала с отрицательным ТКС (первый вариант) или положительным ТКС (второй вариант).

На фиг. 2 представлены экспериментальные зависимости ТКС (α_R) многослойного тонкопленочного тензорезистора из взаимочередующихся нанослоев металла с положительным ТКС и металлом с отрицательным ТКС и отдельного нанослоя из металла с положительным ТКС в нижнем нанослое гетероструктуры от количества циклов (m_2) совместного напыления этих металлов. На фиг. 2 представлены следующие зависимости:

1 график - при $a=3,0$ и $n_1=0,5$;

2 график - при $a=4,0$ и $n_1=0,5$;

3 график - при $a=4,0$ и $n_1=0,6$;

5 4 график - при $a=1,0$ и $n_1=4,0$;

5 график - при $a=0,7$ и $n_1=5,0$;

6 график - при $a=0,2$ и $n_1=2,0$.

На фиг 3 представлены экспериментальные зависимости ТКС многослойного тонкопленочного тензорезистора из взаимочередующихся нанослоев металла с
10 положительным ТКС и металла с отрицательным ТКС и отдельного верхнего нанослоя из металла с положительным ТКС и с нижним нанослоем также из металла с положительным ТКС. На фиг. 3 представлены следующие зависимости:

1 график - при $n_1=1,0$;

15 2 график - при $n_1=1,5$;

3 график - при $n_1=4,0$.

Рассматриваемую гетероструктуру резистивного слоя тонкопленочного тензорезистора формируют по двум вариантам:

- с нижним слоем из материала с отрицательным ТКС (первый вариант);

20 - с нижним слоем из материала с положительным ТКС (второй вариант).

Сопротивление сформированной нижней пленки r_1 определяют исходя из выражений:

- для первого варианта, формула 1:

$$25 \quad r_1 = \frac{1}{m_1} \cdot \Delta\rho_{s1} \cdot N = R_{s1} \cdot N \quad (1)$$

- для второго варианта, формула 2:

$$r_1 = \frac{1}{m'_1} \cdot \Delta\rho_{s2} \cdot N = R_{s2} \cdot N, \quad (2)$$

где m_1, m'_1 - количество циклов напыления при формировании нижней пленки для
30 первого и второго варианта соответственно, определяют по формулам:

$$m_1 = M \cdot t, \quad m'_1 = M \cdot t'_1,$$

где M - скорость вращения карусели подложек;

t_1, t'_1 - время напыления нижнего нанослоя по первому и второму вариантам

35 соответственно;

$\Delta\rho_{s1}, \Delta\rho_{s1}$ - приращения поверхностных сопротивлений монослоев, которые формируются за каждый цикл напыления из металлов с отрицательным и положительным ТКС соответственно;

R_{s1}, R_{s2} - удельное поверхностное сопротивление нанослоя из первого и второго
40 металла соответственно;

N - число квадратов тензорезистора.

Сопротивление последующего нанослоя r_2 из взаимочередующихся нанослоев двух материалов задают исходя из соотношения:

$$45 \quad r_2 = \frac{1}{m_2} \cdot \frac{\Delta\rho_{s1} \cdot \Delta\rho_{s2}}{\Delta\rho_{s1} + \Delta\rho_{s2}} \cdot N = R_{s1-2} \cdot N, \quad (3)$$

где m_2 - количество циклов совместного напыления взаимочередующихся нанослоев материалов с противоположными по знаку ТКС определяют по формуле 4:

$$m_2 = M \cdot t_2, \quad (4)$$

где t_2 - время совместного напыления нанослоев;

M - скорость вращения карусели подложек.

Сопротивление последнего верхнего нанослоя r_3 из материала с положительным ТКС определяют по формуле:

$$r_3 = \frac{1}{m_3} \cdot \Delta\rho_{s3} \cdot N = R_{s3} \cdot N, \quad (5)$$

где m_3 - количество циклов напыления только нанослоя из резистивного материала с положительным ТКС определяют по формуле:

$$m_3 = M \cdot t_3, \quad (6)$$

где t_3 - время напыления при формировании последнего (верхнего) нанослоя;

M - скорость вращения карусели подложек.

Тогда общее сопротивление резистивного слоя $R_{об}$ рассчитывают с помощью эквивалентной схемы из трех параллельно соединенных резисторов по формуле:

$$R_{об} = \frac{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}{r_1 \cdot r_2 + r_3(r_1 + r_2)} \quad (7)$$

Общее сопротивление тонкопленочного тензорезистора с исследуемой структурой резистивного слоя определяют выражениями:

для первого варианта по формуле:

$$R_{об} = \frac{\Delta\rho_{s1} \cdot \Delta\rho_{s2}}{m_3 \cdot \Delta\rho_{s1} + m_2(\Delta\rho_{s1} + \Delta\rho_{s2}) + m_1 \cdot \Delta\rho_{s2}} \cdot N, \quad (8)$$

где эквивалентное удельное поверхностное сопротивление слоя определяют выражением

$$R_{сл} = \frac{R_{s1} \cdot R_{s1-2} \cdot R_{s3}}{R_{s1} \cdot R_{s1-2} \cdot R_{s3}(R_{s1} + R_{s1-2})}$$

m_1 - количество циклов напыления при формировании нижней пленки для первого и второго варианта соответственно;

m_2 - количество циклов совместного напыления взаимочередующихся нанослоев материалов с противоположными по знаку ТКС, определяют по формуле 4;

m_3 - количество циклов напыления только нанослоя из резистивного материала с положительным ТКС, определяется по формуле 6;

- для второго варианта - по формуле:

$$R'_{об} = \frac{\Delta\rho_{s1} \cdot \Delta\rho_{s2}}{m'_3 \cdot \Delta\rho_{s1} + m'_2(\Delta\rho_{s1} + \Delta\rho_{s2}) + m'_1 \cdot \Delta\rho_{s1}} \cdot N \quad (9)$$

где эквивалентное удельное поверхностное сопротивление слоя определяют выражением:

$$R'_{сл} = \frac{R'_{s1} \cdot R'_{s1-2} \cdot R'_{s3}}{R'_{s1} \cdot R'_{s1-2} \cdot R'_{s3}(R'_{s1} + R'_{s1-2})}$$

m'_1 - количество циклов напыления при формировании нижней пленки;

m'_2, m'_3 - количество циклов совместного напыления взаимочередующихся нанослоев

и напыления только слоя из материала с положительным ТКС соответственно для второго варианта.

Зависимость сопротивления многослойного тонкопленочного тензорезистора с рассматриваемой структурой резистивного слоя от температуры T определяют следующими выражениями:

- для первого варианта (принимается, что $m_3 = am_1$; $n_1 = \Delta\rho_{s2}/\Delta\rho_{s1}$) формула 10:

$$R(T) \approx \frac{n_1 \Delta\rho_{s1} \cdot (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T)}{(1 + \alpha_1 \Delta T) \cdot (am_1 + m_2) + n_1 (1 + \alpha_2 \Delta T)(m_1 + m_2)} \cdot N \quad (10)$$

- для второго варианта (принимается, что $m'_3 = a_1 m'_1$) формула 11:

$$R(T) \approx \frac{n_1 \Delta\rho_{s1} \cdot (1 + \alpha_1 \Delta T + \alpha_2 \Delta T)}{(1 + \alpha_1 \Delta T) \cdot [m'(1 + a_1) + m'_2] + m'_2 n_1 (1 + \alpha_2 \Delta T)} \cdot N \quad (11)$$

Учитывая, что формулы (10) и (11), в свою очередь, тождественны известному выражению $R(T) \approx R_0 (1 + \alpha_R \Delta T)$, ТКС (α_R) для многослойного тонкопленочного тензорезистора со структурой резистивного слоя из взаимочередующихся нанослоев и отдельным слоем из материала с положительным ТКС его определяют выражениями:

- для первого варианта формула 12:

$$\alpha_R \approx \frac{m_{06} \cdot (a\alpha_2 + n_1 \alpha_1) + m_2 \cdot (\alpha_2 + a n_1 \alpha_1)}{m_{06} \cdot [a \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + n_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)] + m_2 [(1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + a n_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)]} \quad (12)$$

или через параметр - время напыления t_1 и t_2 :

$$\alpha_R \approx \frac{t_1 \cdot (a\alpha_2 + n_1 \alpha_1) + t_2 \cdot (\alpha_2 + a n_1 \alpha_1)}{t_1 \cdot [a \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + n_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)] + t_2 [(1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + a n_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)]} \quad (13)$$

где m_{06} - общее количество циклов напыления, необходимое для обеспечения требуемой величины удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя R_S ,

$$m_{06} = m_1 \cdot (1 + a) + m_2 = M \cdot [t_1 (1 + a) + t_2] \quad (14)$$

- коэффициент a характеризует соотношение циклов напыления m_3 и m_1 отдельных нанослоев только из материала с отрицательным ТКС.

Из анализа формул (12) и (13) следует, что условие возможности управления величиной ТКС многослойной резистивной гетероструктуры определяют следующим неравенством $|\alpha_2| < |n_1 \alpha_1|$.

- для второго варианта формула 15:

$$\alpha'_R \approx \frac{m'_{06} \cdot \alpha_2 + m'_2 \cdot n_1 \alpha_1}{m'_{06} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + m'_2 n_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)} \quad (15)$$

или та же самая формула, но выраженная через параметр время напыления t_1 и t_2 формула 16:

$$\alpha'_R \approx \frac{t'_1 \cdot (1 + a_1) \alpha_2 + t'_2 \cdot (\alpha_2 + n_1 \alpha_1)}{t'_1 \cdot (1 + a_1) (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + t'_2 [(1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + n_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)]} \quad (16)$$

где m'_{06} - общее количество циклов напыления, необходимое для обеспечения требуемой величины удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя R_S ,

$$m'_{06} = m'_1 \cdot (1 + a) + m'_2 = M \cdot [t'_1 (1 + a) + t'_2] \quad (17)$$

- коэффициент a_1 характеризует соотношение циклов напыления m_3 и m_1 отдельных нанослоев только из материала с положительным ТКС.

Из анализа полученных формул (12) и (15) следует, что условием обеспечения ТКС многослойного тонкопленочного тензорезистора, близкого к нулевому значению, с

- для первого варианта формула 18:

$$m_2 = \left| \frac{m_{об} (a\alpha_2 + n_1\alpha_1)}{\alpha_2 + a n_1\alpha_1} \right| \quad (18)$$

или выраженное через время напыления t_2 по формуле 19:

$$t_2 = \left| \frac{t_1 + (a\alpha_2 + n_1\alpha_1)}{\alpha_2 + n_1\alpha_1} \right| \quad (19)$$

- для второго варианта формула 20:

$$m'_2 = \left| \frac{m'_{об} \cdot \alpha_2}{n_1\alpha_1} \right| \quad (20)$$

или выраженное через время напыления t'_2 по формуле 21:

$$t'_2 = \left| \frac{t'_1 + (1+a)\alpha_2}{\alpha_2 + n_1\alpha_1} \right| \quad (21)$$

На фиг. 2 представлены экспериментальные зависимости ТКС (α_R) многослойного тонкопленочного тензорезистора из взаимочередующихся нанослоев металла с положительным ТКС и металлом с отрицательным ТКС и отдельного нанослоя из

металла с положительным ТКС в нижнем нанослое гетероструктуры от количества циклов (m_2) совместного напыления этих металлов.

Как видно из представленных зависимостей, для варианта с нижним нанослоем из металла с отрицательным ТКС обеспечить общую величину ТКС многослойного тонкопленочного тензорезистора, близкую к нулевому значению, возможно или при

величине следующих коэффициентов $a=1,0$ и $n_1=4,0$ (см. фиг 2, зависимость 4), или при значении коэффициентов $a \approx 0,2$ и $n_1=2,0$ (см. фиг 2, зависимость 6).

То есть, количество циклов напыления при формировании верхнего нанослоя резистивной гетероструктуры из металла с положительным ТКС - должно быть не

больше 0,2 количества циклов напыления нижнего нанослоя при скорости напыления нанослоев из металла с положительным ТКС, превышающей скорость напыления нанослоев из металла с отрицательным ТКС примерно в 2,0 раза). При одинаковой же скорости напыления двух металлов, когда $n_1=1,0$, величина коэффициента a не должна превышать 0,1 т.е. количество циклов напыления при формировании верхнего нанослоя из металла с положительным ТКС должно быть не больше 0,1 числа циклов напыления нижнего нанослоя структуры из металла с отрицательным ТКС).

На фиг. 3 представлены экспериментальные зависимости ТКС многослойного тонкопленочного тензорезистора из взаимочередующихся нанослоев металла с

положительным ТКС и металла с отрицательным ТКС и отдельного верхнего нанослоя из металла с положительным ТКС и с нижним нанослоем также из металла с

положительным ТКС.

Для варианта с нижним нанослоем гетероструктуры из металла с положительным ТКС обеспечить величину ТКС многослойного тонкопленочного тензорезистора,

близкую к нулевому значению, возможно при значениях коэффициента $n_1 > 1,5$ (см. фиг 3). Причем с увеличением коэффициента n_1 (например при $n_1 = 4,0$, график 3 на фиг. 3) ТКС многослойного тонкопленочного тензорезистора приближается к нулевому значению при меньшем значении числа циклов совместного напыления монослоев двух резистивных материалов.

Таким образом, для рассмотренных вариантов формирования резистивного слоя со структурой из взаимочередующихся нанослоев двух металлов с противоположными по знаку ТКС и отдельным нанослоем (верхним) из материала с положительным ТКС для обеспечения ТКС многослойного тонкопленочного тензорезистора, близкого к нулевому значению, требуется обеспечить превышение скорости напыления монослоев из металла с положительным ТКС над скоростью напыления монослоев из металла с отрицательным ТКС примерно в 2,0 раза при нижнем нанослое структуры из металла с отрицательным ТКС и более, чем в 4,5 раза, при нижнем нанослое структуры из металла с положительным ТКС. Такое условие, в свою очередь, усложняет технологию формирования резистивного слоя с нижним нанослоем из металла с положительным ТКС.

Из результатов экспериментальных исследований характеристик многослойной резистивной гетероструктуры из взаимочередующихся нанослоев двух металлов и отдельного верхнего нанослоя из металла с положительным ТКС определен следующий технологический маршрут формирования:

- методом магнетронного напыления при вращающейся карусели при количестве циклов напыления m_1 формируют нижний нанослой резистивной структуры из металла с отрицательным ТКС до достижения величины удельного поверхностного сопротивления определяемой формулой:

$$R_{s1} = \frac{1}{m_1} \cdot \Delta \rho_{s1} \quad (22)$$

Расчетную величину удельного поверхностного сопротивления этого нанослоя определяют по формуле:

$$R_{s1} = \frac{R_s \cdot R_{s1-2} (1 + a)}{R_{s1-2} - R_s}, \quad (23)$$

где R_s - требуемая величина поверхностного сопротивления многослойной резистивной гетероструктуры (определяется конструктивными особенностями формируемой тензосхемы).

Многослойную гетероструктуру, получают методом магнетронного напыления при вращающейся карусели одновременно с двух мишеней последовательно, при этом формируют слой резистивной гетероструктуры из взаимочередующихся нанослоев двух металлов при количестве циклов совместного напыления m_2 , которые рассчитывают по формуле (18).

При этом расчетную величину поверхностного сопротивления R_{s1-2} резистивного слоя из взаимочередующихся нанослоев определяют формулой:

$$R_{s1-2} = \frac{R_s \cdot R_{s1}}{R_{s1} - R_s (1 + a)} \quad (24)$$

Скорость напыления нанослоев из металла с положительным ТКС выбирается примерно в 2,0 раза больше скорости напыления нанослоев из металла с отрицательным ТКС (т.е. $n_1 \sim 2,0$).

Многослойную гетероструктуру получают методом магнетронного напыления при вращающейся карусели в течение m_3 - циклов напыления ($m_3 = am_1$), при этом формируют слой резистивной гетероструктуры из металла с положительным ТКС до достижения величины удельного поверхностного сопротивления этого нанослоя $R_{S3}=R_{S1} \times 1/a$, а значение коэффициента a выбирают из условия $a \sim 0,2$. При этом скорость напыления нанослоев из металла с положительным ТКС обеспечивают не менее, чем в 2,0 раза выше скорости напыления нанослоев из металла с отрицательным ТКС. Требуемую величину удельного поверхностного сопротивления R_{S3} последнего (верхнего) нанослоя структуры рассчитывают по формуле:

$$R_{S3} = \frac{R_S \cdot R_{S1} \cdot R_{S1-2}}{R_{S1} \cdot R_{S1-2} - R_S \cdot (R_{S1} + R_{S1-2})} \quad (25)$$

Контроль окончания процесса напыления тонкой пленки осуществляют по сопротивлению свидетеля на карусели подложек. Величину сопротивления свидетеля задают заранее, исходя из количества квадратов напыляемой пленки на свидетель и требуемой величины удельного поверхностного сопротивления создаваемой многослойной гетероструктуры. Процесс контроля осаждения многослойной гетероструктуры с помощью свидетеля на карусели подложек позволяет управлять величиной удельного поверхностного сопротивления создаваемой многослойной гетероструктуры и величиной ее ТКС.

Технический результат заключается в повышении температурной стабильности начального выходного сигнала тензосхемы датчика в широком температурном диапазоне от криогенных температур до температуры $+250^\circ\text{C}$, обеспеченной технологией формообразования многослойной тонкопленочной гетероструктуры для получения тензосхемы на чувствительных элементах датчиков избыточного и абсолютного давления с заданной величиной удельного поверхностного сопротивления и минимальным положительным ТКС тензорезисторов.

(57) Формула изобретения

Способ изготовления тонкопленочной нано- и микроразмерной системы датчика физических величин с заданным положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС) резистивных элементов, заключающийся в том, что на планарной стороне твердотельной подложки методами вакуумного распыления образуют гетерогенную структуру из нано- и микроразмерных пленок материалов, содержащую тонкопленочные диэлектрические, резистивные и контактные слои, после чего с использованием фотолитографии и травления формируют резистивные элементы (тензорезисторы, терморезисторы), контактные проводники и контактные площадки к ним, при этом резистивный слой формируют методом магнетронного распыления в вакуумной камере, одновременно из двух отдельных источников, отличающийся тем, что формирование резистивных слоев методом магнетронного распыления в вакуумной камере проводят с использованием одного из элементов группы металлов: железо (Fe), никель (Ni), кобальт (Co) с одной мишени и одного из металлических лигандов: ванадий (V), хром (Cr), титан (Ti) с другой мишени, при этом путем изменения соотношения компонентов в гетероструктуре по процентному содержанию от 10% до 90% формируют требуемую величину удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки и момент окончания процесса напыления многослойной гетероструктуры контролируют по сопротивлению свидетеля, расположенного на карусели подложек, а количество циклов совместного напыления слоев гетероструктуры m_2 определяют по формуле:

$$m_2 = \left| \frac{m_{об} (a\alpha_2 + n_1\alpha_1)}{\alpha_2 + an_1\alpha_1} \right| ,$$

где $m_{об}$ - общее количество циклов напыления, необходимое для обеспечения требуемой величины удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя R_S ;

a - коэффициент, характеризующий соотношение циклов напыления m_3 и m_1 отдельных нанослоев только из материала с положительным ТКС;

m_3 - количество циклов напыления только нанослоя из резистивного материала с положительным ТКС;

n_1 - коэффициент соотношения приращения удельного поверхностного сопротивления пленки второго металла $\Delta\rho_{s2}$ за один цикл напыления и приращения удельного поверхностного сопротивления пленки первого металла $\Delta\rho_{s1}$ за один цикл напыления

определяют по формуле $n_1 = \Delta\rho_{s2}/\Delta\rho_{s1}$;

α_1 - ТКС нанопленки из первого металла;

α_2 - ТКС нанопленки из второго металла,

расчетную величину удельного поверхностного сопротивления R_{S1-2} отдельного

резистивного слоя с положительным ТКС определяют из величин удельного поверхностного сопротивления взаимочередующихся нанослоев по формуле:

$$R_{S1-2} = \frac{R_S \cdot R_{S1}}{R_{S1} - R_S(1+a)} ,$$

где a - коэффициент, характеризующий соотношение циклов напыления m_3 и m_1 отдельных нанослоев только из материала с положительным ТКС;

R_{S1} - удельное поверхностное сопротивление нанослоя из первого металла;

R_S - общее удельное поверхностное сопротивление многослойной гетероструктуры,

условием возможности управления величиной ТКС многослойной резистивной гетероструктуры является следующее неравенство $|a \cdot \alpha_2| < |n_1 \cdot \alpha_1|$,

ТКС (α_R) для многослойного тонкопленочного тензорезистора со структурой резистивного слоя из взаимочередующихся нанослоев и отдельным слоем из материала с положительным ТКС определяют по формуле:

$$\alpha_R \approx \frac{m_{об} \cdot (a\alpha_2 + n_1\alpha_1) + m_2 \cdot (\alpha_2 + an_1\alpha_1)}{m_{об} \cdot [a \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + n_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)] + m_2 [(1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + an_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)]} ,$$

где $m_{об}$ - общее количество циклов напыления, необходимое для обеспечения требуемой величины удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя R_S ;

m_2 - количество циклов совместного напыления взаимочередующихся нанослоев материалов с противоположными по знаку ТКС;

α_1 - ТКС нанопленки из первого металла;

α_2 - ТКС нанопленки из второго металла;

a - коэффициент, характеризующий соотношение циклов напыления m_3 и m_1 отдельных нанослоев только из материала с положительным ТКС;

n_1 - коэффициент соотношения приращения удельного поверхностного сопротивления

пленки второго металла $\Delta\rho_{s2}$ за один цикл напыления и приращения удельного поверхностного сопротивления пленки первого металла $\Delta\rho_{s1}$ за один цикл напыления определяют по формуле $n_1 = \Delta\rho_{s2}/\Delta\rho_{s1}$;

ΔT - диапазон температур замера ТКС,

ТКС (α'_R) для многослойного тонкопленочного тензорезистора со структурой резистивного слоя из взаимочередующихся нанослоев и отдельным слоем из материала с отрицательным ТКС определяют по формуле:

$$\alpha'_R \approx \frac{m'_{об} \cdot \alpha_2 + m'_2 \cdot n_1 \alpha_1}{m'_{об} \cdot (1 + \alpha_1 \cdot \Delta T) + m'_2 n_1 \cdot (1 + \alpha_2 \cdot \Delta T)},$$

где $m'_{об}$ - общее количество циклов напыления, необходимое для обеспечения требуемой величины удельного поверхностного сопротивления резистивного слоя R_S ;

m'_2 - количество циклов совместного напыления взаимочередующихся нанослоев

материалов с противоположными по знаку ТКС;

α_1 - ТКС нанопленки из первого металла;

α_2 - ТКС нанопленки из второго металла;

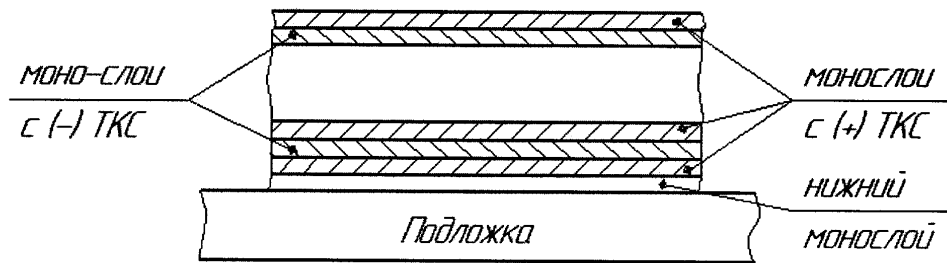
n_1 - коэффициент соотношения приращения удельного поверхностного сопротивления

пленки второго металла $\Delta\rho_{s2}$ за один цикл напыления и приращения удельного поверхностного сопротивления пленки первого металла;

$\Delta\rho_{s1}$ за один цикл напыления определяют по формуле $n_1 = \Delta\rho_{s2}/\Delta\rho_{s1}$;

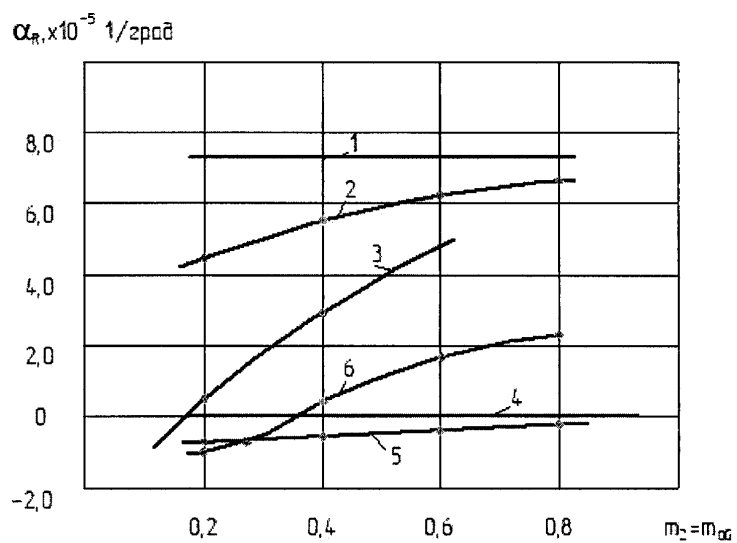
ΔT - диапазон температур замера ТКС.

1



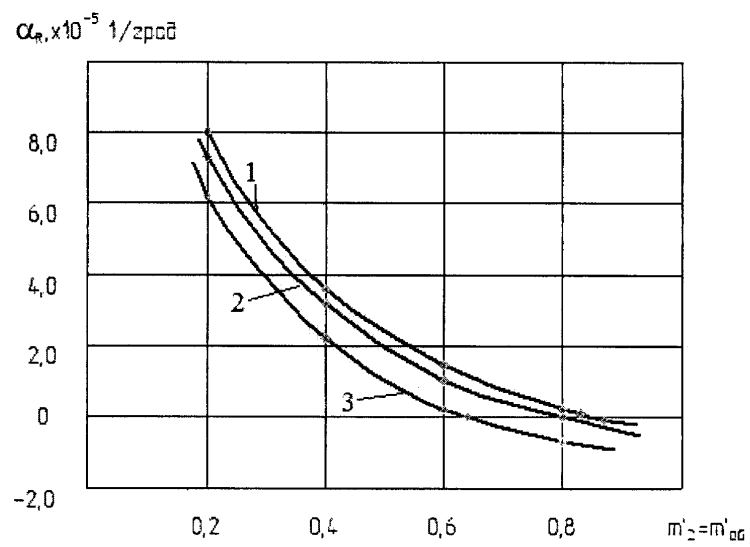
Фиг. 1

2



1 график - при $a = 3,0$ и $n_1 = 0,5$; 2 график - при $a = 4,0$ и $n_1 = 0,5$; 3 график - при $a = 4,0$ и $n_1 = 0,6$; 4 график - при $a = 1,0$ и $n_1 = 4,0$; 5 график - при $a = 0,7$ и $n_1 = 5,0$; 6 график - при $a = 0,2$ и $n_1 = 2,0$.

Фиг. 2



1 график – при $n_1 = 1,0$; 2 график – при $n_1 = 1,5$; 3 график — при $n_1 = 4,0$

Фиг. 3