



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА  
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ,  
ПАТЕНТАМ И ТОВАРНЫМ ЗНАКАМ

## (12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(21)(22) Заявка: 2010112932/28, 05.04.2010

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:  
05.04.2010

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 05.04.2010

(45) Опубликовано: 10.11.2011 Бюл. № 31

(56) Список документов, цитированных в отчете о  
поиске: RU 2326375 C1, 10.06.2008. SU 868528 A,  
30.09.1981. SU 717640 A, 28.02.1980. JP  
2004119224 A, 15.04.2004. CN 1821767 A,  
23.08.2006. GB 1418280 A, 17.12.1975.

Адрес для переписки:

249034, Калужская обл., Обнинск-4, а/я 452,  
Н.Н. Величко

(72) Автор(ы):

Липилин Александр Сергеевич (RU),  
Никонов Алексей Викторович (RU),  
Спирин Алексей Викторович (RU),  
Чернов Ефим Ильич (RU),  
Чернов Михаил Ефимович (RU),  
Шитов Владислав Александрович (RU)

(73) Патентообладатель(и):

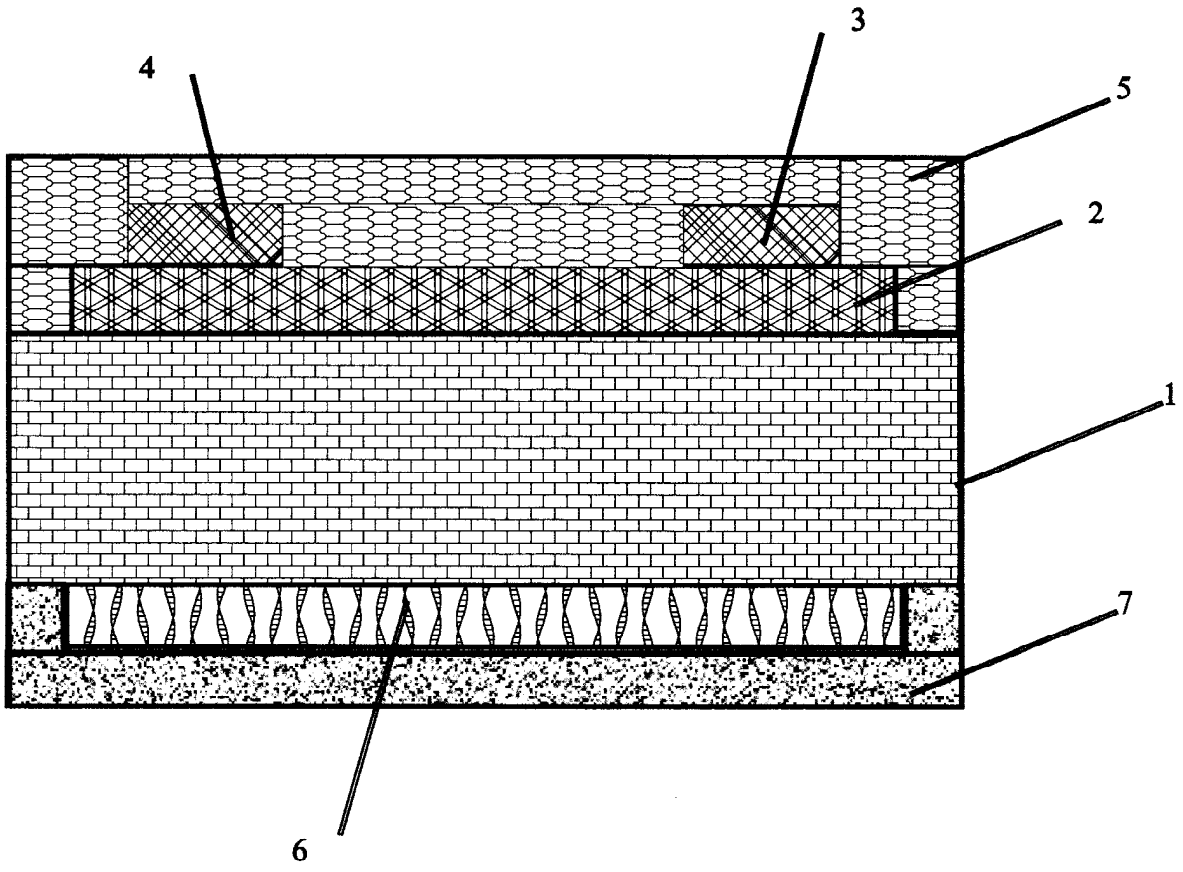
Закрытое акционерное общество "ЭКОН"  
(ЗАО "ЭКОН") (RU),  
Институт электрофизики Уральского  
отделения РАН (RU)(54) **ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНАЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ЯЧЕЙКА-СЕНСОР И СПОСОБ  
ЕЕ ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

(57) Реферат:

Изобретение относится к средствам для исследования или анализа газов, а именно к системам, определяющим содержание кислорода, использующим твердоэлектродитные ячейки, и может быть использовано в прикладной электрохимии, металлургии, энергетике, автомобилестроении и других отраслях для определения содержания кислорода в жидких и газовых средах. Ячейка-сенсор содержит пластину-подложку 1, выполненную из термостойкого изоляционного материала. На одной стороне пластины сформирован тонкий 2-20 мкм слой твердого электролита 2, на которую нанесены каталитический 3 и инертный 4 электроды с выводами в холодную зону, покрытые для исключения абразивного износа исследуемым

газом, пористым слоем керамики 5. На другой стороне пластины нанесен плоский нагреватель 6, покрытый непористым слоем керамики 7. Также предложен способ изготовления описанной выше высокотемпературной электрохимической ячейки. Изобретение обеспечивает расширение возможности использования ячейки для определения концентрации кислорода и упрощение технологии измерений концентрации кислорода в различных агрессивных средах, путем обеспечения возможности проведения измерений при более высоких температурах, и повышения точности измерения концентрации кислорода путем снижения утечки ионов с твердоэлектродитной ячейки, а также упрощение и удешевление конструкции. 2 н. и 17 з.п. ф-лы, 1 ил.

RU 2 4 3 3 3 9 4 C 1



RU 2 4 3 3 3 9 4 C 1



FEDERAL SERVICE  
FOR INTELLECTUAL PROPERTY,  
PATENTS AND TRADEMARKS

**(12) ABSTRACT OF INVENTION**

(21)(22) Application: 2010112932/28, 05.04.2010

(24) Effective date for property rights:  
05.04.2010

Priority:

(22) Date of filing: 05.04.2010

(45) Date of publication: 10.11.2011 Bull. 31

Mail address:

249034, Kaluzhskaja obl., Obninsk-4, a/ja 452,  
N.N. Velichko

(72) Inventor(s):

Lipilin Aleksandr Sergeevich (RU),  
Nikonov Aleksej Viktorovich (RU),  
Spirin Aleksej Viktorovich (RU),  
Chernov Efim Il'ich (RU),  
Chernov Mikhail Efimovich (RU),  
Shitov Vladislav Aleksandrovich (RU)

(73) Proprietor(s):

Zakrytoe aktsionernoe obshchestvo "EhKON"  
(ZAO "EhKON") (RU),  
Institut ehlektrofiziki Ural'skogo otdelenija  
RAN (RU)

**(54) HUGH-TEMPERATURE ELECTROCHEMICAL SENSOR CELL AND METHOD OF ITS PRODUCTION**

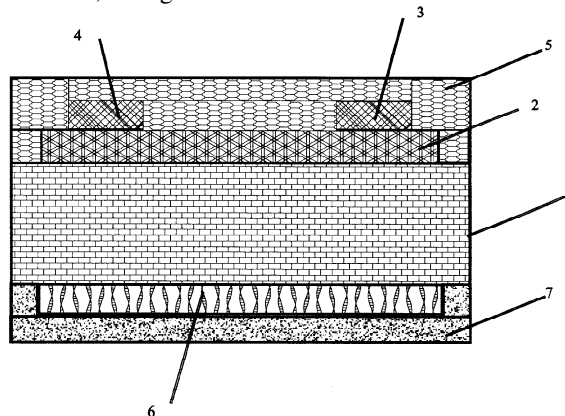
(57) Abstract:

FIELD: machine building.

SUBSTANCE: one side of plate accommodates 2-20 mcm-thick layer of solid electrolyte 2 whereon applied are catalytic 3 and inert 4 electrodes with output terminals into cold zone coated, to rule out abrasive wear be analysed gas, by porous layer 5 of ceramics. Opposite side of the plate accommodates flat heater 6 coated by nonpored layer 7 of ceramics. Invention covers the method of producing high-temperature electrochemical cell.

EFFECT: expanded applications, simplified oxygen concentration measurement in aggressive media.

19 cl, 1 dwg



RU 2 4 3 3 3 9 4 C 1

RU 2 4 3 3 3 9 4 C 1

Изобретения относятся к исследованиям или анализу материалов с помощью электрохимических средств, а точнее к ячейкам и зондам с твердым электролитом для исследования или анализа газов, а именно к кислородным концентрационным ячейкам, используемым в высокотемпературной электрохимии, и может быть  
5 использовано в газоанализаторах, предназначенных для контроля отходящих газов котлоагрегатов и других топливосжигающих установок, а также для лямбда зондов, используемых в автомобилях с двигателями внутреннего сгорания в системе подготовки топливной смеси, для более полного ее сгорания и снижения вредных  
10 выбросов в атмосферу.

Известны высокотемпературные электрохимические ячейки [SU 646243, 1977, МПК G01N 27/46, A1; SU 1404919, 1987, МПК G01N 27/46, A1; US 4510741, 1986 г., МПК C03B 29/00; US 7163609, 2007 г., МПК G01N 27/407; RU 2379670, 2008, МПК G01N 27/407, C1], выполненные в виде пробирки с разделенным газовым пространством для  
15 эталонного газа и тестируемого газа, например топливной смеси, в которых измерительная ячейка выполнена из совместно спеченных слоев твердого электролита из диоксида циркония и пористыми платиновыми электродами.

Основными недостатками таких электрохимических ячеек, выполненных на  
20 пробирках, является сложность конструкций, связанная с тем, что приходится организовывать два (анодное и катодное) проточные пространства. При этом электроды должны омываться: один - анализируемым газом, другой - эталонным. Герметичное разделение анодного и катодного газовых пространств, а также организация потоков анализируемого и эталонного газов, в случае газового  
25 электрода сравнения, не только усложняют конструкцию, делая ее менее надежной, но и не позволяют по-настоящему миниатюризировать сенсоры, используя тонкопленочные технологии.

Известны конструкции электрохимических ячеек для определения концентрации  
30 углекислого газа с неразделенным газовым пространством [RU 2326375, 2006, МПК G01N 27/406, C1], в которой чувствительный элемент электрохимического датчика оксида углерода в газовых смесях выполнен из твердого оксидного электролита с нанесенными на его поверхности поляризуемым и неполяризуемым  
35 электродами. Электролит выполнен в виде пластинки. Неполяризуемый электрод сравнения нанесен на поверхность электролита в виде пасты из окиси серебра, а поляризуемый рабочий электрод нанесен на поверхность электролита в виде мелкодисперсного порошка платины или палладия с добавкой до 10% порошка электролита. Оба электрода припечены, а рабочий электрод активирован.

Электрохимические ячейки такого вида имеют проблему в точности измерения из-за  
40 утечки ионов кислорода через твердые электролиты измерительной ячейки и насоса, практически не могут быть использованы для определения концентрации кислорода, водорода и других элементов.

Наиболее близким по технической сущности является конструкция ячейки-сенсора с  
45 неразделенным газовым пространством с использованием твердого эталонного электрода (например, Ni-NiO) [SU 868528, 1978, G01N 27/46, A1]. Эта ячейка-сенсор содержит тонкую пластинку твердого электролита на основе диоксида циркония, стабилизированного иттрием (YSZ) с газодиффузионным электродом из никеля и  
50 противоэлектродом, электродом сравнения из платины, нанесенных методом шелкографии. Никель был взят из соображений наибольшей исследованности системы Ni-NiO. Известно, что потенциал определяющей является трехфазная граница металл-электролит-газ. Поэтому, формируя ее пропуском тока, задавалось на

границе определенное соотношение между металлом и оксидом, отклоняя его от соотношения при равновесии с газовой средой. Отключая ток и наблюдая по изменению потенциала за возвращением границы в равновесие, фиксировался потенциал задержки (площадка), который отвечал активности кислорода в анализируемой среде. Такой сенсор позволял в достаточно широком диапазоне, меняя полярность тока, менять соотношение  $Me-MeO$  твердого электрода сравнения и определять парциальное давление кислорода исследуемой среды. Способ его изготовления допускает групповую технологию, используя несущую подложку из твердого электролита.

К недостаткам конструкции прототипа можно отнести то, что такой сенсор требует дополнительного узла печки или нагревателя, которые не могут быть объединены с конструкцией сенсора. К тому же такая конструкция электрохимической ячейки газоанализатора требует усложнения способа измерения активности кислорода, значительного усложнения электронной измерительной схемы. Использование несущего твердого электролита, обеспечивающего механическую прочность, приводит к нефункциональному его использованию и удорожанию сенсора. Сам же материал твердого электролита  $YSZ$  недостаточно термостоек, а его геометрия делает его инерционным, т.е. ухудшает в целом виброустойчивость газоанализатора.

Задачей изобретения является расширение возможности использования ячейки для определения концентрации кислорода и упрощение технологии измерений концентрации кислорода в различных агрессивных средах, путем обеспечения возможности проведения измерений при более высоких температурах, и повышения точности измерения концентрации кислорода путем снижения утечки ионов с твердоэлектролитной ячейки, а также упрощение и удешевление конструкции.

Поставленная задача решается тем, что известная высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор для определения концентрации кислорода, содержащая газодиффузные электроды и твердый электролит на основе двуокиси циркония, выполнена в виде пластины-подложки толщиной не более 0,15-2 мм, выполненной из термостойкого изоляционного материала, одна из сторон которой покрыта слоем пленки твердого электролита на основе двуокиси циркония толщиной 2-20 мкм, на который нанесены пористые пленки толщиной 2-10 мкм каталитического электрода из металлов платиновой группы и инертного электрода из благородных металлов, например золота или серебра, покрытые слоем защитной пористой керамической пленки толщиной 5-10 мкм, на другой стороне пластины-подложки нанесен слой пленки нагревательного элемента толщиной не более 5-10 мкм, покрытый таким же как электроды, но непористым слоем защитной керамической пленки.

Поставленная задача будет также решена, если в способе изготовления высокотемпературной электрохимической ячейки-сенсора, включающем напыление и трафаретную печать, на одну из сторон пластинки-подложки из термостойкого изоляционного материала, толщиной не более 0,15-2 мм, наносят напылением слой пленки толщиной не более 2-20 мкм твердого электролита на основе диоксида циркония из наноструктурированного порошка с размером частиц 50-100 нм, затем способом трафаретной печати наносят на эту же сторону одинаковые по размерам пористые слои пленок инертного и каталитического электродов, а на другую сторону пластины-подложки наносят пленку плоского нагревателя толщиной не более 5-10 мкм, производят стабилизирующий окислительный обжиг, совмещенный с припеканием (вжиганием) нанесенных материалов электродов и нагревателя при

температуре 1050-1150°C, затем со стороны электродов наносят пористый, а со стороны нагревателя непористый защитные слой с их припеканием при температуре 950-1050°C.

5 Для удешевления ячейки-сенсора в качестве пластины-подложки использованы такие материалы, как кварц, корунд, окись алюминия, циркон или алюмомагнезиальная шпинель, а в качестве защитного слоя для каталитического и инертного электродов и нагревателя могут быть использованы пленки керамических материалов таких как алюмомагнезиальная шпинель, циркон или окись алюминия.

10 Для ускорения и автоматизации процесса изготовления электрохимической ячейки-сенсора напыление твердого электролита предлагается производить способом лазерной абляции с плотностью лазерного излучения  $0,5-1,5 \cdot 10^5$  Вт/см, при остаточном давлении  $1,5-3,0 \cdot 10^{-4}$  мбар, создавая при этом столб плазменного факела, перпендикулярный к подложке при расстоянии мишень - подложка 20-30 мм, или  
15 способом вакуумного напыления, например ионно-плазменного, в вакуумной камере при остаточном давлении  $1,5-3 \cdot 10^{-4}$  мбар с плотностью тока  $(0,5-1,5) \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>, при этом пластина-подложка должна быть разогрета до 400-650°C, а направление потока частиц от источника перпендикулярно к подложке и расстояние от источника до  
20 подложки составляет 20-40 мм.

Сравнение заявленного технического решения с известными решениями из уровня техники не выявило аналогичных решений, что позволяет установить его соответствие критерию «новизна».

25 Предложенная ячейка-сенсор и способ ее изготовления являются промышленно применимыми и разработанные технические средства соответствуют критерию «изобретательский уровень», так как они явным образом не следуют из уровня техники.

30 При этом из последнего не выявлено каких-либо преобразований, характеризующихся отличительными существенными признаками, для достижения указанного технического результата.

Таким образом, предложенное техническое решение соответствует установленным условиям патентоспособности.

35 Сущность изобретения поясняется чертежом.

40 Ячейка-сенсор содержит пластину-подложку 1, выполненную из термостойкого изоляционного материала. На одной стороне пластины сформирован тонкий 2-20 мкм слой твердого электролита 2, на которую нанесены каталитический 3 и инертный 4 электроды с выводами (не показаны) в холодную зону, покрытые для исключения абразивного износа исследуемым газом, пористым слоем керамики 5. На другой стороне пластины нанесен плоский нагреватель 6, покрытый непористой слоем керамики 7, такой же как по составу, что и пористое керамическое покрытие электродов 5.

45 Пример конкретного использования заявляемой конструкции для лямбда-зондов. Конструктивно электрохимическая часть выполнена в виде керамической пластинки-подложки 1 толщиной 0,15-2 мм из электроизоляционного, термостойкого, механически прочного материала, например кварца. Может быть также использована пластинка из окиси алюминия, циркона, др. Для выравнивания коэффициента  
50 теплового линейного расширения сопрягаемых материалов можно использовать смесь, содержащую 95-97% алюмомагнезиальной шпинели, остальное - добавки окиси магния, например керамика ГБ-7 или из смеси 94-97% окиси алюминия, остальное - добавки окиси кремния для выравнивания коэффициента теплового линейного

расширения сопрягаемых материалов, например керамика 22ХС.

На одной стороне пластины сформирован тонкий слой 2-20 мкм твердого электролита 2, например YSZ (диоксид циркония, стабилизированный иттрием), на который нанесены два электрода каталитический 3 (металлов платиновой группы) и инертный 4 из благородного металла (золота или серебра) толщиной 2-10 мкм с выводами в холодную зону, покрытые для исключения абразивного износа анализируемым газом, пористым слоем 5 керамики 5-10 мкм того же состава, что и подложка. На другой стороне керамической пластинки расположен плоский нагреватель 6 из платины или вольфрама, покрытый тонким 5-10 мкм непористым (газоплотным) слоем керамики 7, защищающий материал нагревателя от окисления.

Изготавливается ячейка-сенсор следующим образом.

На пластинку из термостойкого изоляционного материала, например, кварца, обеспечивающего термостойкость и механическую прочность электрохимической части сенсора, с размерами 25×25×2 мм напыляют на одной стороне тонкий слой твердого электролита 2-20 мкм. Для получения равномерного слоя требуемой толщины использовали наноструктурированный порошок электролита на основе диоксида циркония с размером частиц 50-100 нм.

Наиболее точным и удобным для нанесения таких тонких и одновременно прочных пленок твердого электролита оказались способы или лазерного, или вакуумного напыления.

Наносили с одной стороны тонкий слой твердого электролита YSZ толщиной 2-20 мкм. При меньшей толщине получалось неполное покрытие подложки, большая толщина приводила к нецелесообразному увеличению материала твердого электролита. Толщина напыляемого слоя задавалась временем напыления и контролировалась методом взвешивания и по изображению скола или шлифа на электронном сканирующем микроскопе. Напыление производили в вакуумной камере при разрежении  $1,5-3 \cdot 10^{-4}$  мбар, с плотностью лазерного излучения  $0,5-1,5 \cdot 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> на подложку, разогретую до 550-650°C. Большее отклонение условий напыления приводило к ухудшению качества покрытия. Испаряемая мишень требуемого состава YSZ имела цилиндрическую форму, а испарение велось с ее боковой поверхности при постоянном вращении мишени, что позволяло более равномерно испарять мишень и получать более однородные покрытия на больших площадях подложки.

При использовании способа лазерной абляции столб плазменного факела был перпендикулярен к подложке, расстояние мишень - подложка составляло 20-30 мм. Большее и меньшее расстояние приводило к ухудшению покрытия и снижению скорости напыления.

При вакуумного напылении, например ионно-плазменным, нанесение слоя твердого электролита производят в вакуумной камере при остаточном давлении  $1,5-3 \cdot 10^{-4}$  мбар с плотностью тока  $(0,5-1,5) \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>, при этом пластина-подложка разогрета до 400-650°C, а направление потока частиц от источника перпендикулярно к подложке и расстояние от источника до подложки составляет 20-40 мм.

После нанесения напылением слоя электролита способом трафаретной печати (шелкографии) наносили через маски инертный и каталитический электроды, а на противоположную сторону подложки - плоский нагреватель. Затем проводили стабилизирующий окислительный обжиг, совмещенный с припеканием (вжиганием) материалов электродов и нагревателя при температуре 1050-1150°C. После чего наносили пористый защитный керамический слой, предотвращающий эрозию

электродных материалов нагаром выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания и плотный защитный слой на основе керамики, предотвращающий коррозию материала нагревателя.

Для изготовления лямбда-зондов пластинки разрезали на узкие вытянутые полоски, имеющие все необходимые компоненты лямбда-зонда. Получаемые единичные электрохимические ячейки передавались на сборку датчиков.

Принцип действия заявляемой ячейки-сенсора основан на возникновении потенциала между каталитическим и инертным электродами, из-за разности парциального давления кислорода на их границах с твердым электролитом в зависимости от отношения окислителя и топлива. Такой сенсор может использоваться в системах подготовки топлива с лямбда регулированием, а также в датчиках газоанализаторов кислорода для котлоагрегатов и других топливосжигающих установок. Тонкослойное исполнение датчика приводит к улучшению термостойкости, к уменьшению времени отклика датчика на состав смеси, повышению чувствительности (снижению нижней границы рабочей температуры), более быстрому разогреву при меньшей мощности нагревателя, к увеличению срока службы и надежности.

#### Формула изобретения

1. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор для определения концентрации кислорода, содержащая газодиффузные электроды и твердый электролит на основе двуокиси циркония, отличающаяся тем, что она выполнена в виде плоской пластины-подложки толщиной не более 0,15-2 мм из термостойкого изоляционного материала, одна из сторон этой пластины покрыта слоем твердого электролита на основе двуокиси циркония толщиной 2-20 мкм, на который нанесены толщиной 2-10 мкм пористые газодиффузные каталитически активный электрод и каталитически неактивный электрод с защитным керамическим пористым покрытием, на другой стороне пластины-подложки размещен нагревательный элемент толщиной не более 5-10 мкм, покрытый таким же, как электроды, но непористым керамическим защитным слоем.

2. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что пластина-подложка выполнена из кварца.

3. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что пластина-подложка выполнена из алюмомагнезиальной шпинели.

4. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что пластина-подложка выполнена из смеси 95-97% алюмомагнезиальной шпинели, остальное добавки окиси магния для выравнивания коэффициента теплового линейного расширения сопрягаемых материалов.

5. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что пластина-подложка выполнена из окиси алюминия,

6. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что пластина-подложка выполнена из смеси 94-97% окиси алюминия, остальное добавки окиси кремния для выравнивания коэффициента теплового линейного расширения сопрягаемых материалов.

7. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что пластина-подложка выполнена из циркона.

8. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что каталитически активный пористый электрод выполнен из металла



платиновой группы.

9. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что нейтральный электрод выполнен или из никеля, или из серебра, или из золота.

10. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что в качестве защитного керамического слоя для пористых электродов и нагревателя использована алюмомагнезиальная шпинель.

11. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что в качестве защитного керамического слоя для пористых электродов и нагревателя использована смесь из 95-97% алюмомагнезиальной шпинели, остальное добавки окиси магния для выравнивания коэффициента теплового линейного расширения сопрягаемых материалов.

12. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что в качестве защитного керамического слоя для пористых электродов использована окись алюминия.

13. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что в качестве защитного керамического слоя для пористых электродов и нагревателя использована смесь из 95-97% окиси алюминия, остальное добавки окиси магния для выравнивания коэффициента теплового линейного расширения сопрягаемых материалов.

14. Высокотемпературная электрохимическая ячейка-сенсор по п.1, отличающаяся тем, что в качестве защитного керамического слоя для пористых электродов и нагревателя использован циркон.

15. Способ изготовления высокотемпературной электрохимической ячейки-сенсора по любому из пп.1-14, включающий напыление и трафаретную печать, отличающийся тем, что на одну из сторон пластины-подложки из термостойкого изоляционного материала толщиной не более 0,15-2 мм наносят напылением слой толщиной не более 2-20 мкм твердого электролита на основе диоксида циркония, затем способом трафаретной печати наносят на эту же сторону пористые газодиффузные электроды - каталитически активный и каталитически неактивный, толщиной 2-10 мкм, а на другую сторону пластины-подложки наносят нагревательный элемент в виде дорожки из металла толщиной не более 5-10 мкм, далее производят стабилизирующий окислительный обжиг, совмещенный с припеканием (вжиганием) нанесенных материалов электродов и нагревателя при температуре 1050-1150°C, затем со стороны электродов наносят пористый, а со стороны нагревателя непористый защитные слои с их припеканием при температуре 950-1050°C.

16. Способ изготовления высокотемпературной электрохимической ячейки-сенсора по п.15, отличающийся тем, что напыление слоя твердого электролита производят способом лазерной абляции.

17. Способ изготовления высокотемпературной электрохимической ячейки-сенсора по п.16, отличающийся тем, что нанесение слоя твердого электролита на одну из сторон пластины-подложки производят способом лазерной абляции с плотностью лазерного излучения  $0,5-1,5 \cdot 10^5$  Вт/см при остаточном давлении  $1,5-3,0 \cdot 10^{-4}$  мбар, создавая при этом столб плазменного факела, перпендикулярный подложке, при расстоянии мишень - подложка 20-30 мм.

18. Способ изготовления высокотемпературной электрохимической ячейки-сенсора по п.15, отличающийся тем, что нанесение слоя твердого электролита на одну из сторон пластины-подложки производят способом вакуумного напыления, например, ионно-плазменного.

19. Способ изготовления высокотемпературной электрохимической ячейки-сенсора по п.18, отличающийся тем, что нанесение слоя твердого электролита на одну из сторон пластины-подложки производят в вакуумной камере способом ионно-плазменного напыления при остаточном давлении  $1,5-3 \cdot 10^{-4}$  мбар с плотностью тока  $(0,5-1,5) \cdot 10^5$  А/см<sup>2</sup>, при этом пластина-подложка разогрета до 400-650°C, а направление потока частиц от источника перпендикулярно подложке и расстояние от источника до подложки составляет 20-40 мм.

10

15

20

25

30

35

40

45

50