

## Современные электронные газовые датчики: обзор основных физических принципов функционирования и перспективных разработок

Д. К. Кострин

Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия

dkkostrin@mail.ru

**Аннотация.** Электронные газовые датчики позволяют определять наличие конкретных химических веществ в составе газовой смеси и используются для решения различных задач – от контроля загрязнения атмосферного воздуха до поиска остаточных следов запрещенных веществ. В данной статье рассмотрены основные физические принципы функционирования газовых датчиков и приведены примеры некоторых перспективных разработок. Один из наиболее часто используемых при разработке газовых датчиков эффектов – изменение сопротивления ряда полупроводников, наблюдаемое в ходе адсорбции газа веществом при повышенных температурах. В данном случае особое значение имеет разработка конструкций микронагревателей с повышенной производительностью и сниженным энергопотреблением. Другой тип газовых датчиков – химически чувствительные полевые транзисторы, применяемые как для поиска определенных газов в воздушной смеси, так и для анализа жидких сред. В последние годы ведутся разработки датчиков данного типа для детектирования некоторых органических веществ и даже вирусов. Электрохимические газовые датчики могут быть охарактеризованы как одни из самых универсальных в отношении областей применения и детектируемых веществ. При разработке подобных датчиков важен выбор типа используемого электролита. Тепловые газовые датчики применяются намного реже, чем металлооксидные и электрохимические, однако все равно достаточно полезны в ряде случаев. Оптические газовые датчики реализуются на эффектах изменения параметров оптического излучения при прохождении через исследуемый объект или же при отражении от его поверхности. Также был разработан подход к определению содержания газов, в частности кислорода, основанный на эффекте люминесценции, эффективным гасителем которой служит данный газ. В последние годы все более эффективными становятся гибкие газовые датчики благодаря ряду преимуществ – миниатюризации и портативности, а также пригодности для ношения.

**Ключевые слова:** газовый датчик, воздушная смесь, концентрация, содержание, детектирование, чувствительность, селективность

**Для цитирования:** Кострин Д. К. Современные электронные газовые датчики: обзор основных физических принципов функционирования и перспективных разработок // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2024. Т. 17, № 4. С. 5–20. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-4-5-20.

## Modern Electronic Gas Sensors: an Overview of the Basic Physical Principles of Operation and Prospective Developments

D. K. Kostrin

Saint Petersburg Electrotechnical University, St Petersburg, Russia

dkkostrin@mail.ru

**Abstract.** Electronic gas sensors make it possible to determine the presence of specific chemicals in the composition of a gas mixture and are used to solve various tasks from monitoring atmospheric air pollution to searching for residual traces of prohibited substances. In this paper, not only the basic physical principles of the functioning of gas sensors are considered, but also examples of some prospective developments are given. One of the most frequently used effects in the development of gas sensors is the change in the resistance of a number of semiconductors observed during the adsorption of gas by a substance at elevated temperatures. An important task in this case is the development of microheater designs with increased productivity and reduced energy consumption. Another type of gas sensors are chemically sensitive field-effect transistors used both for searching for certain gases in an air mixture and for analyzing liquid media. In recent years, the development of this type of sensors designed to detect some organic substances and even viruses has been underway. Electrochemical gas sensors can be characterized as one of the most versatile in terms of applications and detectable substances. An important task in the development of electrochemical gas sensors is the choice of the type of electrolyte used. Thermal gas sensors are used much less frequently than metal oxide and electrochemical sensors, but they are still quite useful in a number of applications. Optical gas sensors are implemented on the effects of changing the parameters of optical radiation when it passes through the object under study or when it is reflected from its surface. An approach has also been developed to determine the content of gases, in particular oxygen, based on the effect of luminescence, the effective quencher of which is this gas. Flexible gas sensors have become increasingly effective in recent years due to a number of advantages, such as miniaturization and portability, as well as wearability.

**Keywords:** gas sensor, air mixture, concentration, content, detection, sensitivity, selectivity

**For citation:** Kostrin D. K. Modern Electronic Gas Sensors: an Overview of the Basic Physical Principles of Operation and Prospective Developments // LETI Transactions on Electrical Engineering & Computer Science. 2024. Vol. 17, no. 4. P. 5–20. doi: 10.32603/2071-8985-2024-17-4-5-20.

**Введение.** Электронные газовые датчики позволяют определять наличие конкретных химических веществ в составе газовой смеси и не предназначены для проведения ее количественного или качественного анализа. Такие датчики используются для решения различных задач от контроля загрязнения атмосферного воздуха до поиска остаточных следов запрещенных веществ [1]–[10].

Газовые датчики часто применяются для определения концентрации метана, угарного и углекислого газа; кислорода, озона; оксида, закиси и диоксида азота; аммиака, сероводорода; фторо- и хлороводорода; хлора; диоксида и гексафторида серы, сероуглерода, а также летучих органических соединений; бензола, толуола и ксилола. Часть из указанных веществ в определенной концентрации взрывоопасны, другие могут вызы-

вать серьезное раздражение органов дыхания или же токсическое поражение организма.

Важный параметр подобных датчиков – их селективность, показывающая, насколько чувствителен датчик к конкретному химическому веществу и не чувствителен ко всем иным веществам [11]. Можно отметить, что добиться идеальной избирательности газовых датчиков не представляется возможным.

**Металлооксидные газовые датчики.** Один из наиболее часто используемых при разработке газовых датчиков эффектов – это изменение сопротивления ряда полупроводников, наблюдаемое в ходе адсорбции газа веществом при повышенных температурах [12]–[23]. Среди всех веществ, применяемых для создания чувствительных элементов современных газовых датчиков, можно

отметить легированный диоксид олова. Используя определенное легирующее вещество и задавая необходимую рабочую температуру пленки оксида олова, можно получить относительно высокую селективность датчика [24], [25]. На рис. 1 показана зависимость чувствительности ( $\Delta I/I$ ) такого металлооксидного газового датчика для содержания 0.01 % угарного газа и 1 % метана в воздухе в зависимости от типа легирования и температуры датчика.

В случае использования меди в качестве легирующего вещества для диоксида олова оптимальная чувствительность датчика при обнаружении угарного газа фиксируется при температурах около 370 °С. В свою очередь для поиска метана необходимо применять легирование платиной, а оптимальное значение температуры составляет примерно 500 °С.

Хорошую избирательность демонстрирует датчик для обнаружения сероводорода, работающий при температурах около 260 °С, что вызвано заметной интенсивностью разложения данного газа на поверхности чувствительного элемента. При этом, уменьшая толщину рабочего слоя диоксида олова, можно добиться повышения скорости срабатывания датчика.

На рис. 2 показана конструкция металлооксидного газового датчика с планарным чувствительным элементом, с одной стороны которого нанесен чувствительный слой, а с другой располагается подогреватель. Входное окно в корпусе датчика закрыто мелкоячеистой металлической сеткой для защиты чувствительного элемента от механических воздействий.

При нагревании чувствительного элемента с помощью подогревателя [26], [27], установленного в корпусе датчика, на его поверхности наблю-

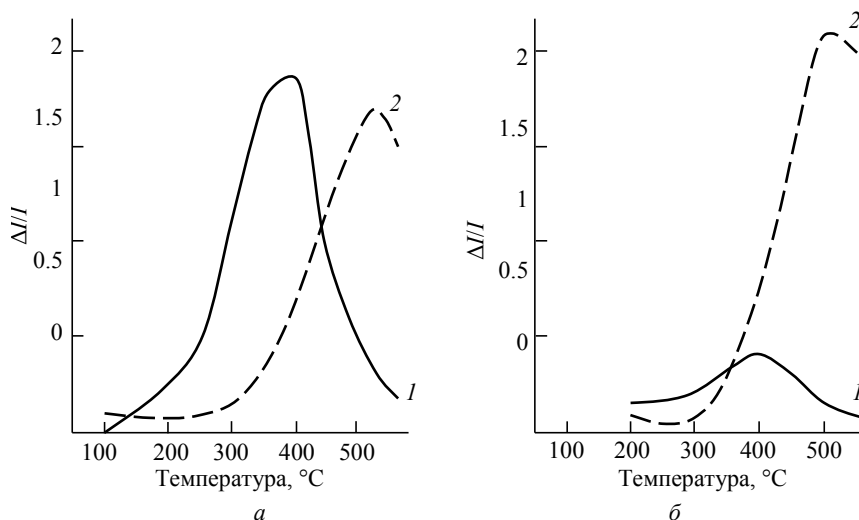


Рис. 1. Зависимость чувствительности металлооксидного газового датчика от рабочей температуры: а – диоксид олова с добавлением меди; б – с добавлением платины; 1 – 0.01 % угарного газа; 2 – 1 % метана

Fig. 1. Dependence of the sensitivity of the metal oxide gas sensor on the operating temperature: а – tin dioxide with the addition of copper; б – with the addition of platinum; 1 – 0.01 % carbon monoxide; 2 – 1 % methane

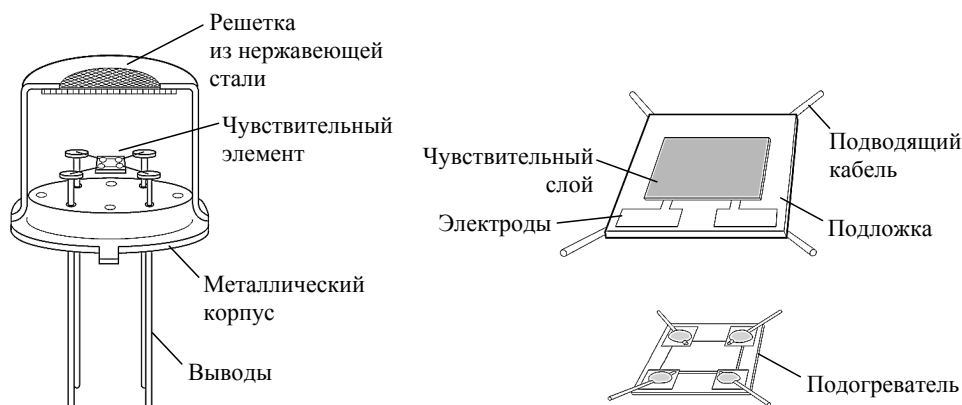


Рис. 2. Конструкция металлооксидного газового датчика с планарным чувствительным элементом

Fig. 2. Design of a metal oxide gas sensor with a planar sensing element

дается адсорбция присутствующего в воздушной смеси газа. В ходе данного процесса сопротивление датчика изменяется, что может быть преобразовано в электрический сигнал с применением электронных схем, построенных чаще всего на основе моста Уитстона [7], [10]. Причем чем больше анализируемого газа содержится в воздухе, тем существеннее изменение сопротивления датчика и, как следствие, больше выходное напряжение схемы преобразования.

Металлооксидные газовые датчики привлекают к себе особое внимание благодаря их простоте, низкой стоимости и чувствительности к широкому спектру летучих веществ. Одно из направлений исследований в данной области – разработка конструкций микронагревателей с повышенной производительностью, сниженным энергопотреблением и низкой стоимостью. Также в настоящее время проводятся исследования, направленные на повышение чувствительности и селективности датчиков, а также на снижение их времени отклика и энергопотребления [28], [29]. Интегрирование микронагревателей и микроэлектромеханических систем важно для получения оптимальных тепловых свойств – низкого энергопотребления и хорошей равномерности температуры по всему активному слою чувствительного элемента.

Оптимизация геометрии устройства, материалов мембран и резисторов влияет на механизмы теплопередачи, что приводит к улучшению характеристик рассеивания тепла и джоулевого нагрева. Помимо этих усовершенствований, снижение теплоемкости датчика, достигаемое за счет уменьшения тепловой массы с помощью методов микрообработки, также понижает энергопотребление и улучшает время отклика датчиков [30]. Благодаря уменьшению времени отклика селективность может быть повышена за счет быстрого циклического изменения температуры для получения дополнительной информации при измерениях [31].

Чтобы достичь хорошей однородности температуры, малого энергопотребления и низкой рабочей температуры при использовании обычных резистивных элементов из металла и металлических сплавов, были спроектированы и изготовлены микронагреватели с теплораспределяющими пластинами, микромостиками и резисторами сложной геометрии [32].

Рассмотрим применение в качестве нагревательного элемента планарного резистора, который может обеспечить высокую равномерность температуры по всей активной области тонкопленочных металлооксидных датчиков [19]. В качестве материала резистора используется пленка из оксида индия-олова (ИТО) с простой геометрией. Нитрид кремния используется в качестве как мембранного материала, так и пассивирующего и изоляционного слоев структуры. Структура газового датчика с планарным микронагревателем показана на рис. 3. Основой микронагревателя служит плоский резистор из оксида индия-олова, который находится под слоем активного оксида металла, изолированного тонким слоем нитрида кремния.

Общая площадь нагрева (площадь резистора из оксида индия-олова) составляет  $0.67 \text{ мм}^2$ , в то время как общая площадь мембраны составляет  $0.85 \text{ мм}^2$ . Активная чувствительная область (оксид олова) составляет  $0.25 \text{ мм}^2$  и геометрически располагается в центре как мембраны, так и микронагревателя.

Конструкция и технология изготовления данного датчика просты, но они отвечают требованиям низкого энергопотребления и линейности эффективности нагрева. Кроме того, данный нагревательный элемент обеспечивает высокую однородность температуры с градиентом не более  $17 \text{ }^\circ\text{C}$  при рабочей температуре активной области  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Датчики на основе химически чувствительных полевых транзисторов.** Данные устройства применяются как для поиска определенных

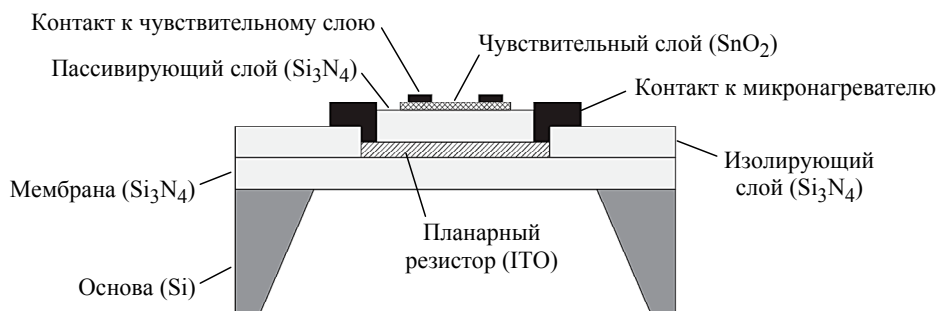


Рис. 3. Конструкция газового датчика с планарным микронагревателем  
Fig. 3. Design of a gas sensor with a planar microheater

газов в воздушной смеси, так и для анализа жидких сред. В основе такого датчика лежит полевой транзистор, затвор которого покрыт одним или несколькими слоями веществ, реагирующих на присутствие конкретных химических соединений (рис. 4). В результате возникающей на затворе реакции происходит изменение проводимости сток–исток транзистора, зависящее от вида определяемого вещества. Современные химически чувствительные полевые транзисторы используются для детектирования концентрации водорода в воздухе, поиска ряда нервно-паралитических газов, аммиака, углекислого газа, а также некоторых газов и соединений органического происхождения [33]–[39].

В процессе эксплуатации датчика на электрод сравнения подается такой постоянный потенциал относительно кремниевой основы *p*-типа, что если в анализируемой смеси не присутствует искомое вещество, то в промежутке исток–сток формируется канал *n*-типа. Далее при подаче доста-

точно малой разницы потенциалов между истоком и стоком контролируется протекающий через полевой транзистор ток, определяемый потенциалом на чувствительной мембране датчика. При появлении в анализируемой смеси искомого вещества или же увеличении его содержания наблюдается изменение разности потенциалов между электродом сравнения и чувствительной мембраной, что вызывает пропорциональное изменение тока, протекающего через химически чувствительный полевой транзистор. Данный факт позволяет рассматривать такой транзистор в виде резистора с химически изменяемым сопротивлением.

Затвор химически чувствительного полевого транзистора, предназначенного для определения концентрации водорода, реализуется с применением свинцово-никелевой пленки. В современных химически чувствительных полевых транзисторах для повышения стабильности их работы в промежутке между затвором и чувствительной мембраной может создаваться слой из адгезивно-

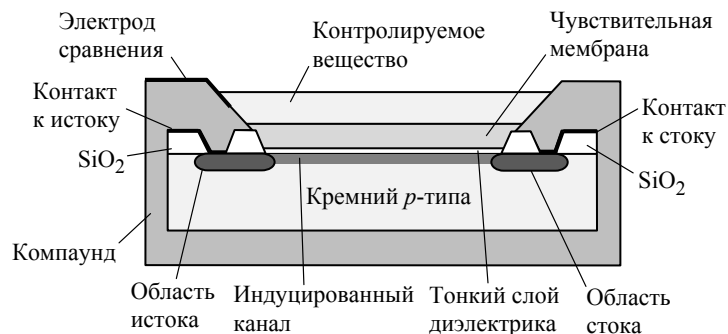


Рис. 4. Конструкция химически чувствительного полевого транзистора

Fig. 4. Design of a chemically sensitive field-effect transistor

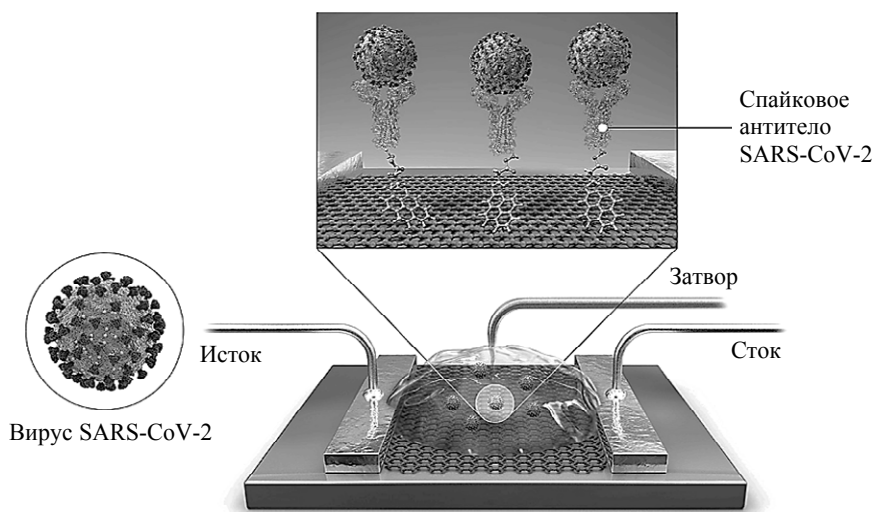


Рис. 5. Химически чувствительный полевой транзистор, предназначенный для диагностики COVID-19

Fig. 5. Chemically sensitive field-effect transistor designed for COVID-19 diagnostics

го геля серебро–хлорид серебра. Чувствительная мембрана данного датчика может быть создана как из пластмасс типа поливинилхлорида, так и из макромолекулярных материалов типа полиуретана, а также термостойкой силиконовой резины или полиэфиров. Важное преимущество химически чувствительных полевых транзисторов заключается в их миниатюрности и малом энергопотреблении.

В последние годы ведутся разработки данного типа датчиков, предназначенных для детектирования ряда органических веществ и даже вирусов [40], в частности SARS-CoV-2 для диагностики COVID-19 (рис. 5).

Обнаружение вируса SARS-CoV-2 в медицинских образцах может быть осуществлено с использованием устройства, построенного на основе химически чувствительного полевого транзистора. Для создания такого биодатчика применяются слои графена, покрытые антителами к спайковому белку SARS-CoV-2 с использованием специального эфира в качестве соединительного вещества [41]. Разработанный датчик показал высокую эффективность при обнаружении вируса даже в неподготовленных образцах и может быть модифицирован для анализа наличия иных биологических веществ.

**Электрохимические газовые датчики.** Данный тип газовых датчиков может быть охарактеризован как один из наиболее универсальных с точки зрения областей применения и детектируемых веществ [42], [43]. При этом в качестве измеряемого параметра, отражающего наличие определенного количества искомого газа, может выступать как выходное напряжение датчика, так и его сопротивление. Электрохимический датчик включает в себя не менее двух электродов, обеспечивающих перемещение зарядов, возникающих в результате химической реакции между электролитом и молекулами газа (рис. 6). Контролируемый газ вступает в реакцию окисления на газопроницаемом измерительном электроде, в результате чего возникают как ионы, так и электроны. Первые в дальнейшем перемещаются в электролите на контрэлектрод, а вторые попадают на него благодаря внешней электрической цепи. В результате на контрэлектроде наблюдается реакция восстановления.

Оба электрода производятся либо из металлов, обладающих свойствами катализатора данных химических реакций (платина, палладий), либо из металлов с нанесенным слоем угольного покрытия. Очевидно, что увеличение площади поверхности

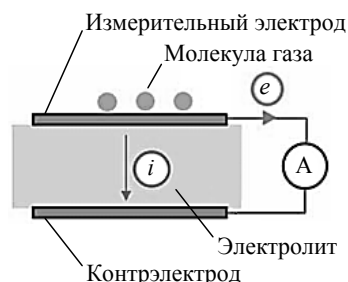


Рис. 6. Принцип работы электрохимического газового датчика  
Fig. 6. Principle of operation of the electrochemical gas sensor

электродов позволяет повысить чувствительность датчика за счет увеличения числа молекул газа, участвующих в химических реакциях. В конструкцию электрохимических газовых датчиков чаще всего дополнительно вводится еще один электрод – эталонный. Он нужен для учета неточностей измерения, вызванных процессами поляризации измерительного электрода. Также можно отметить необходимость контроля температуры электролита для введения соответствующей поправки.

При разработке электрохимических газовых датчиков важен выбор типа используемого электролита. Например, в датчиках, используемых для анализа концентрации кислорода, чаще всего применяется водный раствор гидроксида калия. При этом долговечность датчика на основе данного электролита невелика ввиду его быстрой деградации при контакте со склонным к вступлению в окислительную реакцию углекислым газом и образованию нерастворимых веществ. Более эффективно использование вместо щелочных электролитов сложных электролитических растворов кислот, у которых деградация происходит в десятки раз медленнее.

Рассмотрим экспериментальный интеллектуальный электрохимический газовый датчик для поиска этилена с диапазоном обнаружения от 0 до 10 ppm [44]. Датчик обладает линейной зависимостью с нелинейностью не более 0.2 % между выходным напряжением и концентрацией газа. Напряжение на выходе электрохимического датчика равно нулю при пропускании газообразного азота через газовую камеру со скоростью потока 0.4 л/мин. Газовая камера была сконструирована из одной круглой стеклянной пластины толщиной 5 мм и диаметром 20 мм, а входное и выходное отверстия имеют диаметр 6 мм (рис. 7). Такой датчик обеспечивает разрешение 0.1 ppm и имеет встроенную в конструкцию схему температурной компенсации. Также в устройство датчика был интегрирован микроконтроллер для передачи

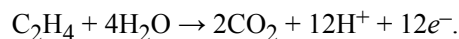
данных либо в режиме напряжения, либо в цифровом виде.

В данной экспериментальной установке датчик для обнаружения этилена состоит из диффузионного барьера, рабочего чувствительного электрода, контрэлектрода, электрода сравнения и электролита, а также слоя фосфорной кислоты. Используемый раствор электролита фосфорной кислоты обладает электрохимической стабильностью и слабо кристаллизуется. Кроме того, было обнаружено, что производство проводимости и вязкости электролита с фосфорной кислотой экспоненциально уменьшается с повышением температуры. Таким образом может быть получен электрохимический датчик с увеличенным сроком службы.

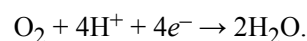
Рабочий электрод изготавливается посредством закрепления анода из золота с большой площадью поверхности на пористой гидрофобной мембране, в то время как контрэлектрод и электрод сравнения представляют собой тонкопленочные платиновые электроды. Гидрофобная мембрана, также называемая газопроницаемой, представляет собой полистирол с внешним покрытием. Внешние размеры датчика составляют 31 мм в длину и около 33.5 мм в диаметре. Однако площадь контрэлектрода плоского типа в 10.4 раза больше площади рабочего электрода для получения высокой чувствительности. Когда напряжение подается на золотые электроды, этилен каталитически окисляется на их поверхности после того, как он диффундирует в электрохимическую реакционную ячейку через барьер с помощью микронасоса. Ток количественно связан со скоростью электролити-

ческого процесса на рабочем электроде, потенциал которого поддерживается постоянным с помощью электрода сравнения. Электрод сравнения используется для устранения помех, возникающих в результате побочных реакций с контрэлектродом, кроме того он позволяет смещать потенциал рабочего электрода.

Этилен окисляется на рабочем электроде:



Контрэлектрод уравнивает реакцию на чувствительном электроде, превращая кислород, присутствующий в воздухе, в воду:



Следовательно, в случае идеальной работы рабочего электрода предельная плотность тока будет пропорциональна концентрации газообразного этилена.

Рассмотренные ранее конструкции ячеек электрохимических газовых датчиков, произведенные из металлокерамических пленок, используются для создания каталитических газовых датчиков, в которых для обработки электрических сигналов могут применяться достаточно сложные измерительные устройства [45]. Учитывая, что протекающие в таких датчиках химические реакции очень чувствительны к температуре применяемого твердого или жидкого электролита, необходимо предусмотреть наличие в конструкции устройства как специализированного нагревателя, так и дополнительного датчика для контроля температуры.

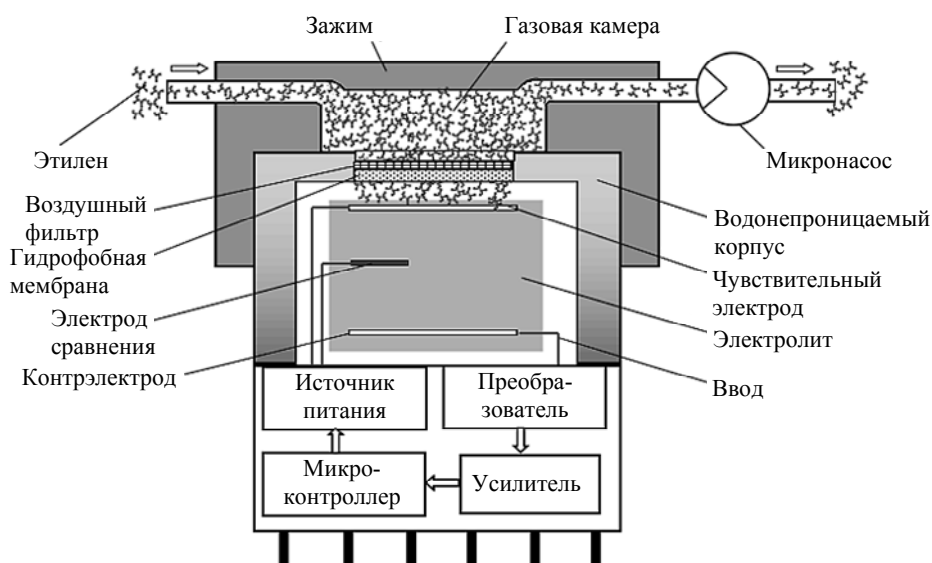


Рис. 7. Конструкция интеллектуального электрохимического газового датчика для обнаружения этилена

Fig. 7. Design of a smart electrochemical gas sensor for ethylene detection

Одной из областей применения таких газовых датчиков служит разработка контролирующих содержание кислорода лямбда-зондов, применяемых в автомобильной промышленности. Кислородный датчик определяет, оптимально ли работает двигатель автомобиля, соответствуют ли расчеты электронного блока управления реальной ситуации и есть ли необходимость в коррекции режимов работы. Датчик кислорода устанавливается в выхлопной системе автомобиля и определяет количество кислорода, не сгоревшего в процессе работы двигателя. Учитывая полученные с лямбда-зонда данные, электронный блок управления вносит необходимые поправки в установленном режиме работы двигателя внутреннего сгорания и корректирует пропорции топлива и воздуха в подаваемой смеси. Зачастую также используется второй лямбда-зонд, контролирующий функционирование каталитического нейтрализатора, снижающего уровень токсичности выхлопных газов.

**Тепловые газовые датчики.** Такие газовые датчики применяются намного реже, чем рассмотренные ранее металлооксидные и электрохимические, однако все равно достаточно полезны в ряде случаев. В основе принципа действия тепловых газовых датчиков лежит первый закон термодинамики, определяющий, что любые колебания внутренней энергии какой-либо системы происходят либо при выделении, либо при поглощении тепла. Таким образом, контролируя температуру объекта, например с помощью микрокалориметрии [46]–[48], можно зафиксировать протекание в его теле или на его поверхности как эндо-, так и экзотермических реакций. В таких датчиках измерительный зонд покрывается слоем материала, реагирующего на присутствие молекул какого-либо газа или жидкости. При помещении данного зонда в исследуемый объем благодаря протекающей между двумя веществами реакции происходит выделение или поглощение тепла. На рис. 8 приведена конструкция теплового газового датчика, размещенного с целью уменьшения потерь тепла в теплоизолирующем кожухе.

Для контроля температуры в данном случае используется термистор, на поверхность которого нанесен слой катализатора. Еще один элемент измерительной схемы – абсолютно такой же термистор с нанесенным на него защитным покрытием [49]–[51]. Применение второго термистора позволяет благодаря использованию моста Уитстона учесть внешние факторы и повысить точность измерений. Можно отметить, что в качестве контроли-

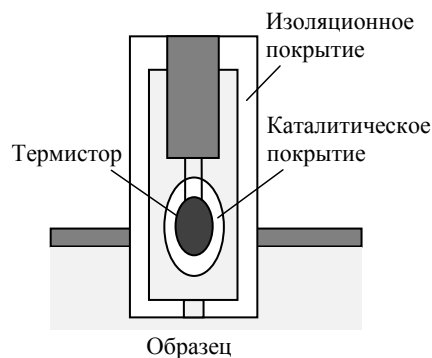


Рис. 8. Конструкция теплового газового датчика  
Fig. 8. Design of the thermal gas sensor

рующего температуру элемента могут применяться не только термисторы, но и другие датчики температуры, например металлические резистивные.

**Оптические газовые датчики.** Датчики данного типа реализуются на эффектах изменения параметров оптического излучения (интенсивность, длина волны, поляризация и др.) при прохождении излучения через исследуемый объект или же при отражении излучения от его поверхности [52]–[54]. В некоторых оптических газовых датчиках происходит испускание света в случае одновременного их облучения и воздействия ряда химических веществ.

На рис. 9 приведена конструкция оптического газового датчика, предназначенного для определения концентрации углекислого газа. Устройство включает в себя две полости, в которые поступает излучение от светоизлучающего диода. С целью увеличения степени отражения излучения от внутренних поверхностей полостей их стенки покрыты металлической пленкой. В левую полость ведут каналы от наружной газопроницаемой мембраны.

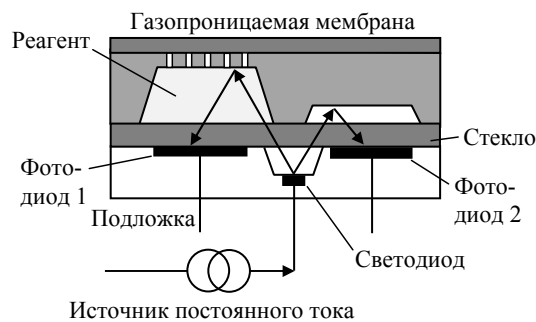


Рис. 9. Конструкция оптического газового датчика, предназначенного для определения концентрации углекислого газа

Fig. 9. Design of an optical gas sensor intended to determine the concentration of carbon dioxide

Левая полость датчика заполнена специальным реагентом с добавлением вещества-индикатора, а правая, контрольная, – пустая. При появ-



лении в исследуемом объеме молекул углекислого газа происходит реакция с молекулами угольной кислоты и ее радикалов, вызывающая изменение уровня кислотности реагента. Данный факт в свою очередь приводит к изменению окраски вещества-индикатора и, как следствие, к изменению уровня поглощения излучения в левой полости.

Излучение от светодиода, проходя через объем полостей и отражаясь от их стенок, поступает на два фотодиода. При изменении уровня пропускания излучения в левой полости выходное напряжение первого фотодиода также изменится по сравнению с эталонным значением, полученным от второго фотодиода.

Еще один тип оптических газовых датчиков представляют недисперсионные инфракрасные датчики, в которых используется свойство молекул газа поглощать инфракрасное излучение на определенных длинах волн. Для углекислого газа такая длина волны составляет 4.3 мкм. Устройство, реализующее данный метод, состоит из излучателя, инфракрасного датчика и оптического резонатора. Инфракрасное излучение, испускаемое источником, поглощается молекулами газа в оптическом резонаторе и после ослабления достигает приемника (рис. 10). Основываясь на потерях мощности инфракрасного излучения, можно с учетом закона Бугера–Ламберта–Бера рассчитать концентрацию газа [55]–[57].

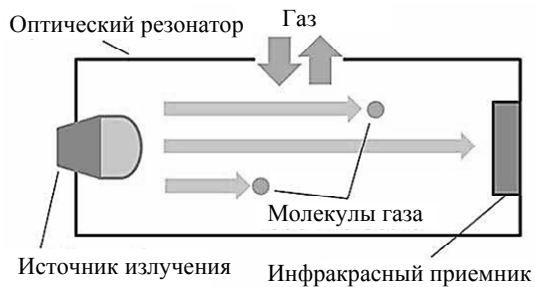


Рис. 10. Устройство недисперсионного инфракрасного газового датчика  
 Fig. 10. Design of a non-dispersive infrared gas sensor

Метод недисперсионного инфракрасного анализа превосходит другие методы измерения концентрации газов благодаря своей способности обнаруживать инертные газы при условии, что они обладают поглощающей способностью в инфракрасной области. Кроме того, недисперсионные инфракрасные газовые датчики, оснащенные излучателем и инфракрасным приемником, обеспечивают сверхнизкое энергопотребление, очень быстрый отклик и высокий уровень безопасности. С другой стороны, такие газы, как водород и

кислород, не могут быть обнаружены данным способом, поскольку они не обладают поглощением в инфракрасной области из-за их симметричной молекулярной структуры.

Похожим образом функционируют лазерные датчики остаточных газов [58], [59]. Молекулы газа поглощают излучение с определенной длиной волны, называемой линией поглощения, и генерируют молекулярную вибрацию.

В последние годы также был разработан подход к определению содержания газов, в частности кислорода, основанный на эффекте люминесценции, эффективным гасителем которой служит данный газ. Измерения на основе люминесценции могут стать одним из лучших способов определения содержания кислорода благодаря высокой чувствительности, отсутствию расхода анализируемого вещества и широкому спектру люминесцентных индикаторов и принципов детектирования, которые можно выбрать в соответствии с областью применения [60]–[62].

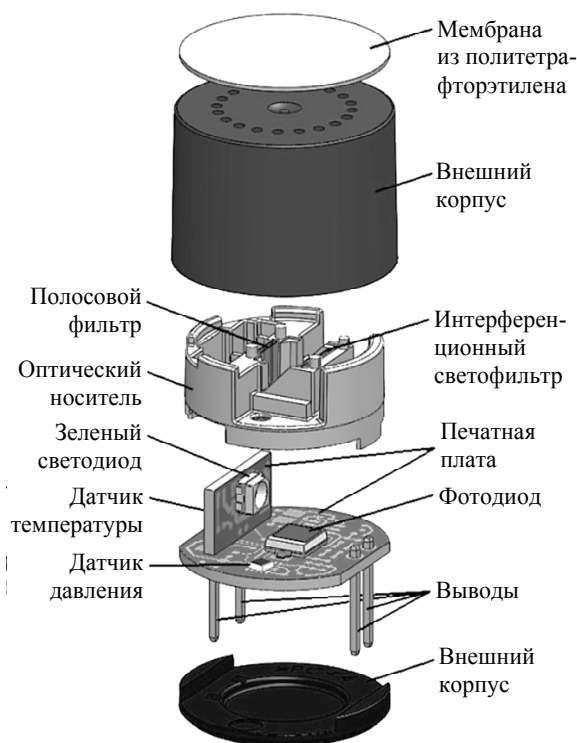


Рис. 11. Конструкция оптического датчика для определения концентрации кислорода  
 Fig. 11. Design of an optical sensor for determining oxygen concentration

Оптическая схема датчика располагается в миниатюрном (18 × 20 мм) компактном оптическом корпусе (рис. 11). Чувствительный слой наносится на интерференционный светофильтр с длиной среза 600 нм и закрепляется внутри оптического носителя под углом падения излучения 45°. В том же

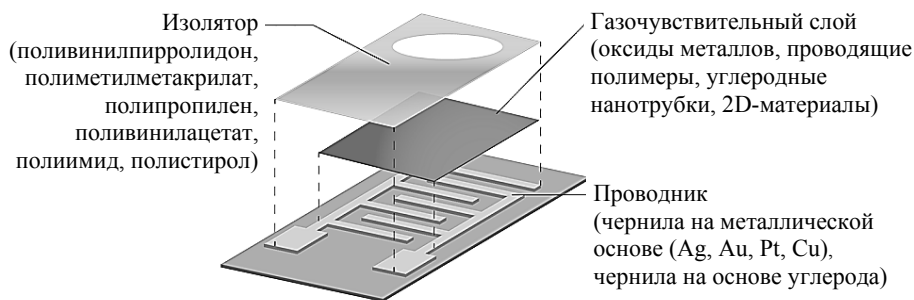


Рис. 12. Компоненты печатного электронного газового датчика  
Fig. 12. Components of a printed electronic gas sensor

носителе установлен полосовой фильтр с длиной волны пропускания 535 нм, блокирующий ультрафиолетовое излучение и размещенный под углом падения излучения  $0^\circ$ . Данный фильтр расположен непосредственно перед светодиодом с длиной волны излучения 535 нм, подключенным к специальной печатной плате, содержащей фотодиод, который собирает сигнал люминесценции, проходящий через интерференционный светофильтр.

Печатная плата также содержит датчики температуры и давления, так что измерения могут быть скорректированы с учетом изменений в характеристиках люминесценции, обусловленных этими параметрами окружающей среды. Также в конструкцию датчика добавлен внешний корпус, содержащий олеофобную и гидрофобную мембрану из политетрафторэтилена [63].

**Заключение.** Многообразие современных электронных газовых датчиков не ограничивается рассмотренными. На данный момент осуществляются исследования и разработка датчиков, основанных на иных методах детектирования наличия газов [64]–[73]. Можно отметить датчики на поверхностных акустических волнах, которые, по существу будучи датчиками сорбционного типа, обладают еще и некоторыми свойствами датчиков термометрического типа [74]. Такие датчики могут обнаруживать как пары различных летучих веществ, так и ряд газов по их тепловым характеристикам.

Электронные газовые датчики функционируют не только на основе измерения электрических, оптических, тепловых или механических харак-

теристик рабочего материала, также существуют датчики, использующие магнитные и пьезоэлектрические свойства веществ. В магнитных газовых датчиках изменение магнитных свойств активных материалов измеряется с помощью одного из таких подходов, как эффект Холла, намагниченность, ориентация спина, ферромагнитный резонанс, магнитооптический эффект Керра или эффект магнитостатических волновых колебаний [75], [76].

Гибкие подложки для газовых датчиков перспективны для применения в портативных анализаторах воздуха. В последние годы гибкие газовые датчики становятся все более эффективными благодаря ряду преимуществ, – миниатюризации и портативности, а также пригодности для ношения [77], [78]. Печатные электронные газовые датчики служат альтернативой обычным газовым датчикам, изготовленным с использованием традиционных методов – фотолитографии, травления и химического осаждения из паровой фазы (рис. 12).

Все рассмотренные ранее газовые датчики предназначены для обнаружения в исследуемом газе определенных компонентов. Они не подходят для проведения анализа состава газовой смеси, так как в этом случае необходимо использовать отдельный датчик для каждого из возможных веществ, входящих в состав анализируемой пробы. Также не стоит забывать о том, что датчики не селективны на 100 %, в них может возникать ложный сигнал от воздействия газов, входящих в состав анализируемой смеси.

#### Список литературы

1. Gas sensors: A review / Z. Yunusa, M. N. Hamidon, A. Kaiser, Z. Awang // *Sensors and Transducers*. 2014. Vol. 168, no. 4. P. 61–75.
2. Semiconductor gas sensors: Materials, technology, design, and application / M. V. Nikolic, V. Milovanovic, Z. Z. Vasiljevic, Z. Stamenkovic // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 22. P. 6694. doi: 10.3390/s20226694.
3. A survey on gas sensing technology / X. Liu, S. Cheng, H. Liu, S. Hu, D. Zhang, H. Ning // *Sensors*. 2012. Vol. 12, no. 7. P. 9635–9665. doi: 10.3390/s120709635.
4. Егоров А. А. Систематика, принцип работы и области применения датчиков // *Журн. радиоэлектроники*. 2009. № 3. С. 35–46.

5. Каттралл Р. В. Химические сенсоры. М.: Научный мир, 2000. 144 с.
6. Игнатьева Н. Датчики газа фирмы Figaro // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2005. № 2. С. 34–37.
7. Кострин Д. К., Ухов А. А. Датчики в электронных устройствах. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 240 с.
8. Боровский Е. Новые датчики газа фирмы Figaro // *Компоненты и технологии*. 2015. № 1. С. 122–124.
9. Романова И. Высокочувствительные датчики газа. Новинки от Figaro Engineering // *Электроника: Наука, технология, бизнес*. 2011. № 1. С. 64–70.
10. Кострин Д. К., Лисенков А. А., Ухов А. А. Электронные средства контроля технологических процессов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 228 с.
11. Демин И. Е. Выбор методов повышения газовой избирательности на примере сенсорной системы на основе полупроводниковых пленок  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$  // *Динамика систем, механизмов и машин*. 2018. Т. 6, № 2. С. 127–132.
12. Velmathi G., Mohan S., Henry R. Analysis and review of tin oxide-based chemoresistive gas sensor // *IETE Technical Rev.* 2015. Vol. 33, no. 3. P. 323–331. doi: 10.1080/02564602.2015.1080603.
13. Tomchenko E. A., Harmer G. P., Marquis B. T. Detection of chemical warfare agents using nanostructured metal oxide sensors // *Sensors and Actuators B: Chem.* 2005. Vol. 108, no. 1–2. P. 41–55. doi: 10.1016/j.snb.2004.11.059.
14. Fergus J. W. Perovskite oxides for semiconductor-based gas sensors // *Sensors and Actuators B: Chem.* 2007. Vol. 123, no. 2. P. 1169–1179. doi: 10.1016/j.snb.2006.10.051.
15. Metal-oxide-semiconductor based gas sensors: screening, preparation, and integration // J. Zhang, Z. Qin, D. Zeng, C. Xie // *Phys. Chem. Chem. Phys.* 2017. Vol. 19, no. 9. P. 6313–6329. doi: 10.1039/C6CP07799D.
16. Shen H., Li L., Xu D. Preparation of one-dimensional  $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$  nano-hetero-structures and their gas-sensing property // *RSC Advances*. Vol. 7, no. 53. 2017. P. 33098–33105. doi: 10.1039/C6RA28520A.
17. Gurlo A., Riedel R. Active metal electrode-oxide interface in gas sensor operation probed by in situ and time-resolved X-Ray spectroscopy // *ChemPhysChem*. 2010. Vol. 11, no. 1. P. 79–82. doi: 10.1002/cphc.200900773.
18. Investigation of High-sensitivity  $\text{NO}_2$  gas sensors with  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  nanorod sensing membrane grown by hydrothermal synthesis method // S.-Y. Chu, M.-J. Wu, T.-H. Yeh, C.-T. Lee, H.-Y. Lee // *Nanomaterials*. 2023. Vol. 13, no. 6. P. 1064. doi: 10.3390/nano13061064.
19. Planar Indium tin oxide heater for improved thermal distribution for metal oxide micromachined gas sensors // M. C. Cakir, D. Caliskan, B. Butun, E. Ozbay // *Sensors*. 2016. Vol. 16, no. 10. P. 1612. doi: 10.3390/s16101612.
20. Stability of metal oxide semiconductor gas sensors: A review // H. Chai, Z. Zheng, K. Liu, J. Xu, K. Wu, Y. Luo, H. Liao, M. Debliquy, C. Zhang // *IEEE Sensors J.* 2022. Vol. 22, no. 6. P. 5470–5481. doi: 10.1109/JSEN.2022.3148264.
21. Resistive gas sensors based on ME nanowires // A. Mirzaei, J.-H. Lee, S. M. Majhi, M. Weber, M. Bechelany, H. W. Kim, S. S. Kim // *J. of Appl. Phys.* 2019. Vol. 126, no. 24. P. 241102. doi: 10.1063/1.5118805.
22. Effect of IDE placement on response in metal oxide gas sensors // R. Prajesh, V. Goyal, V. Saini, J. Bhargava, A. Sharma, A. Agarwal // *Materials Research Express*. 2018. Vol. 5, no. 9. P. 096415. doi: 10.1088/2053-1591/aad728.
23. Романова И. Высокочувствительные датчики газа // *Электроника: Наука, Технология, Бизнес*. 2011. no. 1. С. 64–70.
24. Шаталова О. В., Филист С. А. Изготовление биотехнических и медицинских аппаратов и систем. М.: Изд-во Юрайт, 2019. 309 с.
25. Zakrzewska K., Radecka M., Rekas M. Effect of Nb, Cr, Sn additions on gas sensing properties of  $\text{TiO}_2$  thin films // *Thin Solid Films*. 1997. Vol. 310, no. 1–2. P. 161–166.
26. Разработка терморегулятора для электронных устройств различного исполнения // А. А. Ухов, В. А. Герасимов, Л. М. Селиванов, Д. К. Кострин, В. А. Симон // *Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ»*. 2018. № 9. С. 5–11.
27. Thermoregulator for biomedical electronic devices used in conditions of negative air temperatures // A. A. Uhov, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, D. K. Kostrin, V. A. Simon // *AIP Conf. Proc.* 2023. Vol. 2726. P. 020025. doi: 10.1063/5.0134261.
28. Wang C. Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors // *Sensors*. 2010. Vol. 10, no. 3. P. 2088–2106. doi: 10.3390/s100302088.
29. Development of micro-heaters with optimized temperature compensation design for gas sensors // W.-J. Hwang, K.-S. Shin, J.-H. Roh, D.-S. Lee, S.-H. Choa // *Sensors*. 2010. Vol. 11, no. 3. P. 2580–2591. doi: 10.3390/s110302580.
30. Microhotplate platforms for chemical sensor research // S. Semancik, R. E. Cavicchia, M. C. Wheelera, J. E. Tiffany, G. Poirier, R. M. Walton, J. S. Suehle, B. Panchapakesan, D. E. DeVoe // *Sensors and Actuators B: Chem.* 2010. Vol. 77, no. 1–2. P. 579–591. doi: 10.1016/S0925-4005(01)00695-5.
31. Enhancement of  $\text{NO}_2$  sensing properties of  $\text{In}_2\text{O}_3$ -based thin films using an Au or Ti surface modification // H. Steffes, C. Imawan, F. Solzbacher, E. Obermeier // *Sensors and Actuators B: Chem.* 2001. Vol. 78, no. 1–3. P. 106–112. doi: 10.1016/S0925-4005(01)00799-7.
32. Thermal optimization of micro-hotplates that have a silicon island // D. Briand, S. Heimgartner, M.-A. Getillat, B. van der Schoot, N. F. de Rooij // *J. of Micromechanics and Microengin.* 2002. Vol. 12, no. 6. P. 971–978. doi: 10.1088/0960-1317/12/6/330.
33. Janata J. Thirty years of CHEMFETs – A Personal view // *Electroanalysis*. 2004. Vol. 16, no. 22. P. 1831–1835. doi: 10.1002/elan.200403070.
34. Chemical gated field effect transistor by hybrid integration of one-dimensional silicon nanowire and

- two-dimensional tin oxide thin film for low power gas sensor / J.-W. Han, T. Rim, C.-K. Baek, M. Meyyappan // *ACS Appl. Materials and Interfaces*. 2015. Vol. 7, no. 38. P. 21263–21269. doi: 10.1021/acsami.5b05479.
35. Sedki M., Chen Y., Mulchandani A. Non-carbon 2D materials-based field-effect transistor biosensors: recent advances, challenges, and future perspectives // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 17. P. 4811. doi: 10.3390/s20174811.
36. Carbon nanotube field-effect transistor-based chemical and biological sensors / X. Yao, Y. Zhang, W. Jin, Y. Hu, Y. Cui // *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 3. P. 995. doi: 10.3390/s21030995.
37. Kaisti M. Detection principles of biological and chemical FET sensors // *Biosensors and Bioelectronics*. 2017. Vol. 98. P. 437–448. doi: 10.1016/j.bios.2017.07.010.
38. Fabrication, characterization, and modeling of an aluminum oxide-gate ion-sensitive field-effect Transistor-based pH sensor / S. Sinha, T. Pal, P. Sharma, D. Kharbanda, P. K. Khanna, A. Tanwar, R. Sharma, R. Mukhiya // *J. of Electronic Materials*. 2021. Vol. 50. P. 7085–7097. doi: 10.1007/s11664-021-09220-z.
39. An electronic nose using a single graphene FET and machine learning for water, methanol, and ethanol / T. Hayasaka, A. Lin, V. C. Copa, L. P. Lopez Jr., R. A. Loberternos, L. I. M. Ballesteros, Y. Kubota, Y. Liu, A. A. Salvador, L. Lin // *Microsystems and Nanoengin.* 2020. Vol. 6. P. 50. doi: 10.1038/s41378-020-0161-3.
40. Field-effect transistor biosensor for rapid detection of Ebola antigen / Y. Chen, R. Ren, H. Pu, X. Guo, J. Chang, G. Zhou, S. Mao, M. Kron, J. Chen // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, no. 1. P. 10974. doi: 10.1038/s41598-017-11387-7.
41. Nanomaterials and nanotechnology-associated innovations against viral infections with a focus on coronaviruses / M. Nasrollahzadeh, M. Sajjadi, G. J. Soufi, S. Irvani, R. S. Varma // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, no. 6. P. 1072. doi: 10.3390/nano10061072.
42. Setiabudi A., Yuliani G., Pawitan Z. An Oxygen sensor using simple Zinc-Air electrochemical cells: A simple device to demonstrate applied technology in electrochemistry teaching // *School Sci. Rev.* 2016. Vol. 97, no. 361. P. 30–34.
43. Electrochemical sensors for monitoring of indoor and outdoor air pollution / I. Cretescu, D. Lutic, L. R. Manea // *Electrochem. Sensors Technol. London: IntechOpen*, 2017. P. 65–84. doi: 10.5772/intechopen.68512.
44. A low cost compact measurement system constructed using a smart electrochemical sensor for the real-time discrimination of fruit ripening / L. Ma, L. Wang, R. Chen, K. Chang, S. Wang, X. Hu, X. Sun, Z. Lu, H. Sun, Q. Guo, M. Jiang, J. Hu // *Sensors*. 2016. Vol. 16, no. 4. P. 501. doi: 10.3390/s16040501.
45. Mirzaei A., Hashemi B., Janghorban K.  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based nanomaterials as gas sensors // *J. of Materials Sci.: Materials in Electronics*. 2016. Vol. 2. P. 3109–3144. doi: 10.1007/s10854-015-4200-z.
46. Calorimetric thermoelectric gas sensor for the detection of hydrogen, methane and mixed gases / N.-H. Park, T. Akamatsu, T. Itoh, N. Izu, W. Shin // *Sensors*. 2014. Vol. 14, no. 5. P. 8350–8362. doi: 10.3390/s140508350.
47. Vahidpour F., Oberlander J., Schoning M. J. Flexible calorimetric gas sensors for detection of a broad concentration range of gaseous hydrogen peroxide: A step forward to online monitoring of food-package sterilization processes // *Phys. Status Solidi A*. 2018. Vol. 215, no. 15. P. 1800044. doi: 10.1002/pssa.201800044.
48. Realisation of a calorimetric gas sensor on polyimide foil for applications in aseptic food industry / P. Kirchner, J. Oberlander, P. Friedrich, J. Berger, G. Rysstad, M. Keusgen, M. J. Schoning // *Sensors and Actuators B: Chem.* 2012. Vol. 170. P. 60–66. doi: 10.1016/j.snb.2011.01.032.
49. Бондарь О. Г., Брежнева Е. О. Повышение эффективности измерений концентрации горючих газов термokatалитическим датчиком // *Изв. Юго-Зап. гос. ун-та*. 2020. Т. 24, № 1. С. 189–205. doi: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-189-205.
50. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement / E. E. Karpov, E. F. Karpov, A. Suchkov, S. Mironov, A. Baranov, V. Sleptsov, L. Calliari // *Sensors and Actuators A: Phys.* 2013. Vol. 194. P. 176–180. doi: 10.1016/j.sna.2013.01.057.
51. Bondar' O. G., Brezhneva E. O., Pozdnyakov V. V. Methods and Algorithms for control of a thermocatalytic hydrogen sensor // *Measurement Techniques*. 2018. Vol. 61. P. 514–519. doi: 10.1007/s11018-018-1460-z.
52. Черненко А. Инфракрасные датчики газа SGX // *Компоненты и технологии*. 2015. № 7. С. 40–42.
53. Bogue R. Detecting gases with light: a review of optical gas sensor technologies // *Sensor Rev.* 2015. Vol. 35, no. 2. P. 133–140. doi: 10.1108/SR-09-2014-696.
54. On-chip optical gas sensors based on group-IV materials / J. Wu, G. Yue, W. Chen, Z. Xing, J. Wang, W. R. Wong, Z. Cheng, S. Y. Set, G. S. Murugan, X. Wang, T. Liu // *ACS Photonics*. 2020. Vol. 7, no. 11. P. 2923–2940. doi: 10.1021/acsp Photonics.0c00976.
55. Popa D., Udrea F. Towards integrated mid-infrared gas sensors // *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 9. P. 2076. doi: 10.3390/s19092076.
56. Development of a tuneable NDIR optical electronic nose / S. Esfahani, A. Tiele, S. O. Agbroko, J. A. Covington // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 23. P. 6875. doi: 10.3390/s20236875.
57. On-chip readout plasmonic mid-IR gas sensor / Q. Chen, L. Liang, Q. L. Zheng, Y. Zhang, L. Wen // *Opto-Electronic Advances*. 2020. Vol. 3, no. 7. P. 190040. doi: 10.29026/oea.2020.190040.
58. Highly sensitive laser based trace-gas sensor technology and its application to stable isotope ratio analysis / R. Yoshimura, M. Kohtoku, K. Fujii, T. Sakamoto, Y. Sakai // *NTT Techn. Rev.* 2014. Vol. 12, no. 4. P. 1–6.
59. Cavity-enhanced Absorption spectroscopy of methane at 1.73  $\mu$ m / H. R. Barry, L. Corner, G. Hancock, R. Peverall, G. A. D. Ritchie // *Chem. Phys. Lett.* 2001. Vol. 333, no. 3–4. P. 285–289. doi: 10.1016/S0009-2614(00)01388-9.

60. Lakowicz J. R. Quenching of fluorescence // Principles of Fluorescence Spectroscopy. New York: Springer, 2006. P. 277–330. doi: 10.1007/978-0-387-46312-4\_8.
61. Wolfbeis O. S. Luminescent sensing and imaging of oxygen: fierce competition to the Clark electrode // BioEssays. 2015. Vol. 37, no. 8. P. 921–928. doi: 10.1002/bies.201500002.
62. Quaranta M., Borisov S. M., Klimant I. Indicators for optical oxygen sensors // Bioanalytical Rev. 2012. Vol. 4, no. 2. P. 115–157. doi: 10.1007/s12566-012-0032-y.
63. Towards a novel optical trace oxygen sensor for commercial use / G. R. McDowell, F. G. Farrow, M. Uttamli, A. S. Holmes-Smith, C. Mitchell, P. H. Shannon // IEEE Sensors. 2016. P. 1–3. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808789.
64. Review of recent trends in gas sensing technologies and their miniaturization potential / S. Lakkis, R. Younes, Y. Alayli, M. Sawan // Sensor Rev. 2014. Vol. 34, no. 1. P. 24–35. doi: 10.1108/SR-11-2012-724.
65. A review of gas measurement set-ups / L. Fusnik, B. Szafraniak, A. Paleczek, D. Grochala, A. Rydosz // Sensors. 2022. Vol. 22, no. 7. P. 2557. doi: 10.3390/s22072557.
66. A review on environmental gas sensors: Materials and technologies / S. Dhall, B. R. Mehta, A. K. Tyagi, K. Sood // Sensors Intern. 2021. Vol. 2. P. 100116. doi: 10.1016/j.sintl.2021.100116.
67. Solid state gas sensors: State of the art and future activities / S. Capone, A. Forleo, L. Francioso, R. Rella, P. Siciliano, J. Spadavecchia, D. S. Presicce, A. M. Taurino // J. of Optoelectronics and Advanced Materials. 2003. Vol. 5, no. 5. P. 1335–1348. doi: 10.1002/chin.200429283.
68. Review on smart gas sensing technology / S. Feng, F. Farha, Q. Li, Y. Wan, Y. Xu, T. Zhang, H. Ning // Sensors. 2019. Vol. 19, no. 17. P. 3760. doi: 10.3390/s19173760.
69. A gas sensor for application as a propane leak detector / J. T. Guillen Bonilla, H. Guillen Bonilla, V.-M. Rodriguez-Betancourt, A. Guillen Bonilla, A. Casillas Zamora, O. Blanco Alonso, J. A. Ramirez Ortega // J. of Sensors. 2021. Vol. 2021. P. 8871166. doi: 10.1155/2021/8871166.
70. Fan H., Schaffernicht E., Lilienthal A. J. Ensemble learning-based approach for gas detection using an electronic nose in robotic applications // Frontiers in Chemistry. 2022. Vol. 10. P. 863838. doi: 10.3389/fchem.2022.863838.
71. Liquid crystal core polymer fiber mat electronic gas sensors / D. M. Agra-Kooijman, C. Robb, Y. Guan, A. Jakli, J. L. West // Liquid Crystals. 2021. Vol. 48, no. 13. P. 1880–1887. doi: 10.1080/02678292.2021.1904522.
72. Универсальный газовый датчик на поверхностных акустических волнах / Р. Г. Крышталь, А. П. Кундин, А. В. Медведь, В. В. Шемет // Журн. технической физики. 2002. Т. 72, no. 10. С. 114–118.
73. Богдасаров О. Е., Крышталь Р. Г. Универсальный газовый датчик на основе резонатора на поверхностных акустических волнах для систем хроматографии // Датчики и системы. 2004. № 8. С. 43–47.
74. Газовый датчик сорбционного типа на поверхностных акустических волнах, чувствительный к тепловым свойствам газов / Р. Г. Крышталь, А. П. Кундин, А. В. Медведь, В. В. Шемет // Письма в Журн. технической физики. 2002. Т. 28, no. 2. С. 25–29.
75. Shinde P. V., Rout C. S. Magnetic gas sensing: working principles and recent developments // Nanoscale advances. 2021. Vol. 3, no. 6. P. 1551–1568. doi: 10.1039/D0NA00826E.
76. Maksymov I. S., Kostylev M. Magneto-electronic hydrogen gas sensors: A critical review // Chemosensors. 2022. Vol. 10, no. 2. P. 49. doi: 10.3390/chemosensors10020049.
77. Flexible gas sensor printed on a polymer substrate for sub-ppm acetone detection / W. Andrysiewicz, J. Krzeminski, K. Skarzynski, K. Marszalek, M. Sloma, A. Rydosz // Electronic Materials Lett. 2020. Vol. 16. P. 146–155. doi: 10.1007/s13391-020-00199-z.
78. Challenges and opportunities for printed electrical gas sensors / G. Barandun, L. Gonzalez-Macia, H. S. Lee, C. Dincer, F. Guder // ACS Sensors. 2022. Vol. 7, no. 10. P. 2804–2822. doi: 10.1021/acssensors.2c01086.

#### Информация об авторе

**Кострин Дмитрий Константинович** – д-р техн. наук, доцент кафедры электронных приборов и устройств СПбГЭТУ «ЛЭТИ».

E-mail: [dkkkostrin@mail.ru](mailto:dkkkostrin@mail.ru)

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

#### References

1. Gas sensors: A review / Z. Yunusa, M. N. Hamidon, A. Kaiser, Z. Awang // Sensors and Transducers. 2014. Vol. 168, no. 4. P. 61–75.
2. Semiconductor gas sensors: Materials, technology, design, and application / M. V. Nikolic, V. Milovanovic, Z. Z. Vasiljevic, Z. Stamenkovic // Sensors. 2020. Vol. 20, no. 22. P. 6694. doi: 10.3390/s20226694.
3. A survey on gas sensing technology / X. Liu, S. Cheng, H. Liu, S. Hu, D. Zhang, H. Ning // Sensors. 2012. Vol. 12, no. 7. P. 9635–9665. doi: 10.3390/s120709635.
4. Egorov A. A. Sistematika, princip raboty i oblasti primeneniya datchikov // Zhurn. radioelektroniki. 2009. No. 3. S. 35–46. (In Russ.).
5. Kattrall R. V. Himicheskie sensory. M.: Nauchnyj mir, 2000. 144 s. (In Russ.).
6. Ignat'eva N. Datchiki gaza firmy Figaro // Jelektronika: Nauka, Tehnologija, Biznes. 2005. No. 2. S. 34–37. (In Russ.).

7. Kostrin D. K., Uhov A. A. Datchiki v jelektronnyh ustrojstvah. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2013. 240 s. (In Russ.).
8. Borovskij E. Novye datchiki gaza firmy Figaro // Komponenty i tehnologii. 2015. no. 1. S. 122–124. (In Russ.).
9. Romanova I. Vysokochuvstvitel'nye datchiki gaza. Novinki ot Figaro Engineering // Jelektronika: Nauka, Tehnologija, Biznes. 2011. No. 1. S. 64–70. (In Russ.).
10. Kostrin D. K., Lisenkov A. A., Uhov A. A. Jelektronnye sredstva kontrolja tehnologicheskikh processov. SPb.: Izd-vo SPbGJeTU «LJeTI», 2016. 228 s. (In Russ.).
11. Demin I. E. Vybor metodov povyshenija gazovoj izbitratel'nosti na primere sensornoj sistemy na osnove poluprovodnikovyh plenok  $\text{In}_2\text{O}_3\text{-Ga}_2\text{O}_3$  // Dinamika sistem, mehanizmov i mashin. 2018. T. 6, № 2. S. 127–132. (In Russ.).
12. Velmathi G., Mohan S., Henry R. Analysis and review of tin oxide-based chemoresistive gas sensor // IETE Technical Review. 2015. Vol. 33, no. 3. P. 323–331. doi: 10.1080/02564602.2015.1080603.
13. Tomchenko E. A., Harmer G. P., Marquis B. T. Detection of chemical warfare agents using nanostructured metal oxide sensors // Sensors and Actuators B: Chem. 2005. Vol. 108, no. 1–2. P. 41–55. doi: 10.1016/j.snb.2004.11.059.
14. Fergus J. W. Perovskite oxides for semiconductor-based gas sensors // Sensors and Actuators B: Chem. 2007. Vol. 123, no. 2. P. 1169–1179. doi: 10.1016/j.snb.2006.10.051.
15. Metal-oxide-semiconductor based gas sensors: screening, preparation, and integration / J. Zhang, Z. Qin, D. Zeng, C. Xie // Phys. Chem. Chem. Phys. 2017. Vol. 19, no. 9. P. 6313–6329. doi: 10.1039/C6CP07799D.
16. Shen H., Li L., Xu D. Preparation of one-dimensional  $\text{SnO}_2\text{-In}_2\text{O}_3$  nano-hetero-structures and their gas-sensing property // RSC Advances. Vol. 7, no. 53. 2017. P. 33098–33105. doi: 10.1039/C6RA28520A.
17. Gurlo A., Riedel R. Active metal electrode-oxide interface in gas sensor operation probed by in situ and time-resolved X-Ray spectroscopy // ChemPhysChem. 2010. Vol. 11, no. 1. P. 79–82. doi: 10.1002/cphc.200900773.
18. Investigation of high-sensitivity  $\text{NO}_2$  gas sensors with  $\text{Ga}_2\text{O}_3$  nanorod sensing membrane grown by hydrothermal synthesis method / S.-Y. Chu, M.-j. Wu, T.-H. Yeh, C.-T. Lee, H.-Y. Lee // Nanomaterials. 2023. Vol. 13, no. 6. P. 1064. doi: 10.3390/nano13061064.
19. Planar Indium tin oxide heater for improved thermal distribution for metal oxide micromachined gas sensors / M. C. Cakir, D. Caliskan, B. Butun, E. Ozbay // Sensors. 2016. Vol. 16, no. 10. P. 1612. doi: 10.3390/s16101612.
20. Stability of metal oxide semiconductor gas sensors: A review / H. Chai, Z. Zheng, K. Liu, J. Xu, K. Wu, Y. Luo, H. Liao, M. Debliquy, C. Zhang // IEEE Sensors J. 2022. Vol. 22, no. 6. P. 5470–5481. doi: 10.1109/JSEN.2022.3148264.
21. Resistive gas sensors based on ME nanowires / A. Mirzaei, J.-H. Lee, S. M. Majhi, M. Weber, M. Bechelany, H. W. Kim, S. S. Kim // J. of Appl. Phys. 2019. Vol. 126, no. 24. P. 241102. doi: 10.1063/1.5118805.
22. Effect of IDE placement on response in metal oxide gas sensors / R. Prajesh, V. Goyal, V. Saini, J. Bhargava, A. Sharma, A. Agarwal // Materials Research Express. 2018. Vol. 5, no. 9. P. 096415. doi: 10.1088/2053-1591/aad728. (In Russ.).
23. Romanova I. Vysokochuvstvitel'nye datchiki gaza // Jelektronika: Nauka, Tehnologija, Biznes. 2011. No. 1. S. 64–70. (In Russ.).
24. Shatalova O. V., Filist S. A. Izgotovlenie biotekhnicheskikh i medicinskih apparatov i sistem. M.: Izd-vo Jurajt, 2019. 309 s. (In Russ.).
25. Zakrzewska K., Radecka M., Rekas M. Effect of Nb, Cr, Sn additions on gas sensing properties of  $\text{TiO}_2$  thin films // Thin Solid Films. 1997. Vol. 310, no. 1–2. P. 161–166.
26. Razrabotka termoreguljatora dlja jelektronnyh ustrojstv ulichnogo ispolnenija / A. A. Uhov, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, D. K. Kostrin, V. A. Simon // Izv. SPbGJeTU «LJeTI». 2018. no. 9. S. 5–11. (In Russ.).
27. Thermoregulator for biomedical electronic devices used in conditions of negative air temperatures / A. A. Uhov, V. A. Gerasimov, L. M. Selivanov, D. K. Kostrin, V. A. Simon // AIP Conf. Proc. 2023. Vol. 2726. P. 020025. doi: 10.1063/5.0134261.
28. Wang C. Metal oxide gas sensors: Sensitivity and influencing factors // Sensors. 2010. Vol. 10, no. 3. P. 2088–2106. doi: 10.3390/s100302088.
29. Development of micro-heaters with optimized temperature compensation design for gas sensors / W.-J. Hwang, K.-S. Shin, J.-H. Roh, D.-S. Lee, S.-H. Choa // Sensors. 2010. Vol. 11, no. 3. P. 2580–2591. doi: 10.3390/s110302580.
30. Microhotplate platforms for chemical sensor research / S. Semancik, R. E. Cavicchia, M. C. Wheelera, J. E. Tiffany, G. Poirier, R. M. Walton, J. S. Suehle, B. Panchapakesan, D. E. DeVoe // Sensors and Actuators B: Chem. 2010. Vol. 77, no. 1–2. P. 579–591. doi: 10.1016/S0925-4005(01)00695-5.
31. Enhancement of  $\text{NO}_2$  sensing properties of  $\text{In}_2\text{O}_3$ -based thin films using an Au or Ti surface modification / H. Steffes, C. Imawan, F. Solzbacher, E. Obermeier // Sensors and Actuators B: Chem. 2001. Vol. 78, no. 1–3. P. 106–112. doi: 10.1016/S0925-4005(01)00799-7.
32. Thermal optimization of micro-hotplates that have a silicon island / D. Briand, S. Heimgartner, M.-A. Getillat, B. van der Schoot, N. F. de Rooij // J. of Micromechanics and Microengineering. 2002. Vol. 12, no. 6. P. 971–978. doi: 10.1088/0960-1317/12/6/330.
33. Janata J. Thirty years of CHEMFETs – A Personal view // Electroanalysis. 2004. Vol. 16, no. 22. P. 1831–1835. doi: 10.1002/elan.200403070.
34. Chemical gated field effect transistor by hybrid integration of one-dimensional silicon nanowire and two-dimensional tin oxide thin film for low power gas sensor / J.-W. Han, T. Rim, C.-K. Baek, M. Meyyappan // ACS Appl. Materials and Interfaces. 2015. Vol. 7, no. 38. P. 21263–21269. doi: 10.1021/acsami.5b05479.

35. Sedki M., Chen Y., Mulchandani A. Non-carbon 2D materials-based field-effect transistor biosensors: recent advances, challenges, and future perspectives // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 17. P. 4811. doi: 10.3390/s20174811.
36. Carbon nanotube field-effect transistor-based chemical and biological sensors / X. Yao, Y. Zhang, W. Jin, Y. Hu, Y. Cui // *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 3. P. 995. doi: 10.3390/s21030995.
37. Kaisti M. Detection principles of biological and chemical FET sensors // *Biosensors and Bioelectronics*. 2017. Vol. 98. P. 437–448. doi: 10.1016/j.bios.2017.07.010.
38. Fabrication, characterization, and modeling of an aluminum oxide-gate ion-sensitive field-effect Transistor-based pH sensor / S. Sinha, T. Pal, P. Sharma, D. Kharbanda, P. K. Khanna, A. Tanwar, R. Sharma, R. Mukhiya // *J. of Electronic Materials*. 2021. Vol. 50. P. 7085–7097. doi: 10.1007/s11664-021-09220-z.
39. An electronic nose using a single graphene FET and machine learning for water, methanol, and ethanol / T. Hayasaka, A. Lin, V. C. Copa, L. P. Lopez Jr., R. A. Loberternos, L. I. M. Ballesteros, Y. Kubota, Y. Liu, A. A. Salvador, L. Lin // *Microsystems and Nanoengin.* 2020. Vol. 6. P. 50. doi: 10.1038/s41378-020-0161-3.
40. Field-effect transistor biosensor for rapid detection of Ebola antigen / Y. Chen, R. Ren, H. Pu, X. Guo, J. Chang, G. Zhou, S. Mao, M. Kron, J. Chen // *Scientific Reports*. 2017. Vol. 7, no. 1. P. 10974. doi: 10.1038/s41598-017-11387-7.
41. Nanomaterials and nanotechnology-associated innovations against viral infections with a focus on coronaviruses / M. Nasrollahzadeh, M. Sajjadi, G. J. Soufi, S. Irvani, R. S. Varma // *Nanomaterials*. 2020. Vol. 10, no. 6. P. 1072. doi: 10.3390/nano10061072.
42. Setiabudi A., Yuliani G., Pawitan Z. An Oxygen sensor using simple Zinc-Air electrochemical cells: A simple device to demonstrate applied technology in electrochemistry teaching // *School Sci. Rev.* 2016. Vol. 97, no. 361. P. 30–34.
43. Electrochemical sensors for monitoring of indoor and outdoor air pollution / I. Cretescu, D. Lutic, L. R. Manea // *Electrochem. Sensors Technol.* London: IntechOpen, 2017. P. 65–84. doi: 10.5772/intechopen.68512.
44. A low cost compact measurement system constructed using a smart electrochemical sensor for the real-time discrimination of fruit ripening / L. Ma, L. Wang, R. Chen, K. Chang, S. Wang, X. Hu, X. Sun, Z. Lu, H. Sun, Q. Guo, M. Jiang, J. Hu // *Sensors*. 2016. Vol. 16, no. 4. P. 501. doi: 10.3390/s16040501.
45. Mirzaei A., Hashemi B., Janghorban K.  $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> based nanomaterials as gas sensors // *J. of Materials Sci.: Materials in Electronics*. 2016. Vol. 2. P. 3109–3144. doi: 10.1007/s10854-015-4200-z.
46. Calorimetric thermoelectric gas sensor for the detection of hydrogen, methane and mixed gases / N.-H. Park, T. Akamatsu, T. Itoh, N. Izu, W. Shin // *Sensors*. 2014. Vol. 14, no. 5. P. 8350–8362. doi: 10.3390/s140508350.
47. Vahidpour F., Oberlander J., Schoning M. J. Flexible calorimetric gas sensors for detection of a broad concentration range of gaseous hydrogen peroxide: A step forward to online monitoring of food-package sterilization processes // *Phys. Status Solidi A*. 2018. Vol. 215, no. 15. P. 1800044. doi: 10.1002/pssa.201800044.
48. Realisation of a calorimetric gas sensor on polyimide foil for applications in aseptic food industry / P. Kirchner, J. Oberlander, P. Friedrich, J. Berger, G. Rysstad, M. Keusgen, M. J. Schoning // *Sensors and Actuators B: Chem.* 2012. Vol. 170. P. 60–66. doi: 10.1016/j.snb.2011.01.032.
49. Bondar' O. G., Brezhneva E. O. Povyshenie jefektivnosti izmerenij koncentracii gorjuchih gazov termo-kataliticheskim datchikom // *Izv. Jugo-Zap. gos. un-ta*. 2020. T. 24, no. 1. S. 189–205. doi: 10.21869/2223-1560-2020-24-1-189-205. (In Russ.).
50. Energy efficient planar catalytic sensor for methane measurement / E. E. Karpov, E. F. Karpov, A. Suchkov, S. Mironov, A. Baranov, V. Sleptsov, L. Calliari // *Sensors and Actuators A: Phys.* 2013. Vol. 194. P. 176–180. doi: 10.1016/j.sna.2013.01.057.
51. Bondar' O. G., Brezhneva E. O., Pozdnyakov V. V. Methods and algorithms for control of a thermocatalytic hydrogen sensor // *Measurement Techniques*. 2018. Vol. 61. P. 514–519. doi: 10.1007/s11018-018-1460-z.
52. Chernenkov A. Infrakrasnye datchiki gaza SGX // *Komponenty i tehnologii*. 2015. No. 7. S. 40–42. (In Russ.).
53. Bogue R. Detecting gases with light: a review of optical gas sensor technologies // *Sensor Rev.* 2015. Vol. 35, no. 2. P. 133–140. doi: 10.1108/SR-09-2014-696.
54. On-chip optical gas sensors based on group-IV materials / J. Wu, G. Yue, W. Chen, Z. Xing, J. Wang, W. R. Wong, Z. Cheng, S. Y. Set, G. S. Murugan, X. Wang, T. Liu // *ACS Photonics*. 2020. Vol. 7, no. 11. P. 2923–2940. doi: 10.1021/acsp Photonics.0c00976.
55. Popa D., Udrea F. Towards integrated mid-infrared gas sensors // *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 9. P. 2076. doi: 10.3390/s19092076.
56. Development of a Tuneable NDIR optical electronic nose / S. Esfahani, A. Tiele, S. O. Agbroko, J. A. Covington // *Sensors*. 2020. Vol. 20, no. 23. P. 6875. doi: 10.3390/s20236875.
57. On-chip readout plasmonic mid-IR gas sensor / Q. Chen, L. Liang, Q. L. Zheng, Y. Zhang, L. Wen // *Opto-Electronic Advances*. 2020. Vol. 3, no. 7. P. 190040. doi: 10.29026/oea.2020.190040.
58. Highly sensitive laser based trace-gas sensor technology and its application to stable isotope ratio analysis / R. Yoshimura, M. Kohtoku, K. Fujii, T. Sakamoto, Y. Sakai // *NTT Techn. Rev.* 2014. Vol. 12, no. 4. P. 1–6.
59. Cavity-enhanced absorption spectroscopy of methane at 1.73  $\mu$ m / H. R. Barry, L. Corner, G. Hancock, R. Peverall, G. A. D. Ritchie // *Chem. Phys. Lett.* 2001. Vol. 333, no. 3–4. P. 285–289. doi: 10.1016/S0009-2614(00)01388-9.
60. Quenching of fluorescence / J. R. Lakowicz // *Principles of Fluorescence Spectroscopy*. New York:



Springer, 2006. P. 277–330. doi: 10.1007/978-0-387-46312-4\_8.

61. Wolfbeis O. S. Luminescent sensing and imaging of oxygen: fierce competition to the Clark electrode // *BioEssays*. 2015. Vol. 37, no. 8. P. 921–928. doi: 10.1002/bies.201500002.

62. Quaranta M., Borisov S. M., Klimant I. Indicators for optical oxygen sensors // *Bioanalytical Rev.* 2012. Vol. 4, no. 2. P. 115–157. doi: 10.1007/s12566-012-0032-y.

63. Towards a novel optical trace oxygen sensor for commercial use / G. R. McDowell, F. G. Farrow, M. Uttamallal, A. S. Holmes-Smith, C. Mitchell, P. H. Shannon // *IEEE Sensors*. 2016. P. 1–3. doi: 10.1109/ICSENS.2016.7808789.

64. Review of recent trends in gas sensing technologies and their miniaturization potential / S. Lakkis, R. Younes, Y. Alayli, M. Sawan // *Sensor Rev.* 2014. Vol. 34, no. 1. P. 24–35. doi: 10.1108/SR-11-2012-724.

65. A review of gas measurement set-ups / L. Fusnik, B. Szafraniak, A. Paleczek, D. Grochala, A. Rydosz // *Sensors*. 2022. Vol. 22, no. 7. P. 2557. doi: 10.3390/s22072557.

66. A review on environmental gas sensors: Materials and technologies / S. Dhall, B. R. Mehta, A. K. Tyagi, K. Sood // *Sensors intern.* 2021. Vol. 2. P. 100116. doi: 10.1016/j.sintl.2021.100116.

67. Solid state gas sensors: State of the art and future activities / S. Capone, A. Forleo, L. Francioso, R. Rella, P. Siciliano, J. Spadavecchia, D. S. Presicce, A. M. Taurino // *J. of Optoelectronics and Advanced Materials*. 2003. Vol. 5, no. 5. P. 1335–1348. doi: 10.1002/chin.200429283.

68. Review on smart gas sensing technology / S. Feng, F. Farha, Q. Li, Y. Wan, Y. Xu, T. Zhang, H. Ning // *Sensors*. 2019. Vol. 19, no. 17. P. 3760. doi: 10.3390/s19173760.

69. A Gas sensor for application as a propane leak detector / J. T. Guillen Bonilla, H. Guillen Bonilla, V.-M. Rodriguez-Betancourt, A. Guillen Bonilla, A. Casillas Zamora, O. Blanco Alonso, J. A. Ramirez Ortega // *J. of Sensors*. 2021. Vol. 2021. P. 8871166. doi: 10.1155/2021/8871166.

70. Fan H., Schaffernicht E., Lilienthal A. J. Ensemble learning-based approach for gas detection using an electronic nose in robotic applications // *Frontiers in Chemistry*. 2022. Vol. 10. P. 863838. doi: 10.3389/fchem.2022.863838.

71. Liquid crystal core polymer fiber mat electronic gas sensors / D. M. Agra-Kooijman, C. Robb, Y. Guan, A. Jakli, J. L. West // *Liquid Crystals*. 2021. Vol. 48, no. 13. P. 1880–1887. doi: 10.1080/02678292.2021.1904522.

72. Universal'nyj gazovyj datchik na poverh-nostnyh akusticheskikh volnah / R. G. Kryshthal', A. P. Kundin, A. V. Medved', V. V. Shemet // *Zhurn. tehnikeskoj fiziki*. 2002. T. 72, no. 10. S. 114–118. (In Russ.).

73. Bogdasarov O. E., Kryshthal' R. G. Universal'nyj gazovyj datchik na osnove rezonatora na poverh-nostnyh akusticheskikh volnah dlja sistem hromatografii // *Datchiki i sistemy*. 2004. no. 8. S. 43–47. (In Russ.).

74. Gazovyj datchik sorbcionnogo tipa na poverh-nostnyh akusticheskikh volnah, chuvstvitel'nyj k teplovyim svojstvam gazov / R. G. Kryshthal', A. P. Kundin, A. V. Medved', V. V. Shemet // *Pis'ma v Zhurn. tehnikeskoj fiziki*. 2002. T. 28, no. 2. S. 25–29. (In Russ.).

75. Shinde P. V., Rout C. S. Magnetic gas sensing: working principles and recent developments // *Nanoscale Advances*. 2021. Vol. 3, no. 6. P. 1551–1568. doi: 10.1039/D0NA00826E.

76. Maksymov I. S., Kostylev M. Magneto-electronic hydrogen gas sensors: A critical review // *Chemosensors*. 2022. Vol. 10, no. 2. P. 49. doi: 10.3390/chemosensors10020049.

77. Flexible gas sensor printed on a polymer substrate for sub-ppm acetone detection / W. Andrysiewicz, J. Krzeminski, K. Skarzynski, K. Marszalek, M. Sloma, A. Rydosz // *Electronic Materials Lett.* 2020. Vol. 16. P. 146–155. doi: 10.1007/s13391-020-00199-z.

78. Challenges and opportunities for printed electrical gas sensors / G. Barandun, L. Gonzalez-Macia, H. S. Lee, C. Dincer, F. Guder // *ACS Sensors*. 2022. Vol. 7, no. 10. P. 2804–2822. doi: 10.1021/acssensors.2c01086.

#### Information about the author

**Dmitry K. Kostrin** – Dr Sci. (Eng.), Assistant Professor of the Department of Electronic Instruments and Devices of Saint Petersburg Electrotechnical University.

E-mail: [dkkostrin@mail.ru](mailto:dkkostrin@mail.ru)

<http://orcid.org/0000-0002-6284-0246>

Статья поступила в редакцию 14.12.2023; принята к публикации после рецензирования 10.02.2024; опубликована онлайн 23.04.2024.

Submitted 14.12.2023; accepted 10.02.2024; published online 23.04.2024.