УДК 544.723;538.9 *Оригинальная статья*

Влияние ультрафиолетового излучения на селективность сенсоров газа на основе оксида цинка

Н.А. Клычков, В.В. Симаков, И.В. Синёв, А.Д. Чиркова
ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»,
410012, Россия, Саратов, ул. Астраханская, 83
nklychkov@mail.ru

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.668

Аннотация: В работе исследовано влияние интенсивности ультрафиолетового излучения на отклик и селективность газовых сенсоров на основе слоёв оксида цинка *ZnO*, сформированных методом химического осаждения с последующим отжигом при 400°C в кислородосодержащей атмосфере. Показано, что облучение с длиной волны 365 нм и интенсивностью от 5 мВт/см² до 20 мВт/см² увеличивает отклик сенсора на пары этанола, изопропанола и ацетона при рабочей температуре 230°C до 10 раз. Зависимость величины фотоотклика при облучении образца длинами волн 400 нм и 525 нм от состава газовой среды указывает на ионизацию глубоких примесных центров, индуцированных адсорбированными молекулами газов. На основе концентрационных зависимостей отклика рассчитаны коэффициенты селективности и специфичности, демонстрирующие увеличение селективности к этанолу с ростом интенсивности излучения до 2 раз. Полученные результаты показывают, что изменение интенсивности излучения позволяет управлять селективностью сенсоров за счёт селективной ионизации поверхностных состояний, связанных с различными адсорбированными газами.

Ключевые слова: оксид цинка, фотоактивация, отклик сенсора газа, селективность, специфичность, примесные центры.

Клычков Никита Александрович – аспирант 4 года обучения, ассистент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, Институт физики ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»
Симаков Вячеслав Владимирович – д.т.н., профессор кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»
Синёв Илья Владимирович – к.ф.-м.н., доцент кафедры материаловедения, технологии и управления качеством, ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»
Чиркова Анастасия Денисовна – старший лаборант ФГБОУ ВО «Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Original paper

Effect of ultraviolet radiation on the selectivity of zinc oxide gas sensors

N.A. Klychkov, V.V. Simakov, I.V. Sinev, A.D. Chirkova
Saratov State University, Saratov, Russia

DOI: 10.26456/pcascnn/2026.18.668

Abstract: This work investigates the effect of ultraviolet irradiation intensity on the response and selectivity of gas sensors based on zinc oxide *ZnO* layers. The *ZnO* layers were synthesized by chemical deposition followed by thermal annealing at 400°C in an oxygen-containing atmosphere. It is shown that UV irradiation at 365 nm with intensities from 5 mW/cm² to 20 mW/cm² enhances the sensor response to ethanol, isopropanol, and acetone vapors by up to 10 times. The dependence of the photo-response magnitude on the gas environment observed upon irradiation at 400 nm and 525 nm indicates ionization of deep impurity centers induced by adsorbed gas molecules. From the

© Н.А. Клычков, В.В. Симаков, И.В. Синёв, А.Д. Чиркова, 2026

concentration dependences of the sensor response, the selectivity and specificity coefficients are calculated, demonstrating a 2-fold increase in selectivity to ethanol with increasing illumination intensity. The obtained results reveal that varying the illumination intensity enables control over the sensor selectivity through the selective ionization of surface states associated with different adsorbed gases.
Keywords: zinc oxide, photoactivation, gas sensor response, selectivity, specificity, impurity centers.

Nikita A. Klychkov – 4th year postgraduate student, Assistant at the Department of Materials Science, Technology and Quality Management, Physics Institute, Saratov State University, ORCID: 0009-0003-7969-3291
Viacheslav V. Simakov – Dr. Sc., Professor, Material Sciences, Technologies and Quality Management Department, Saratov State University, ORCID: 0000-0001-9665-5930
Ilya V. Sinev – Ph. D., Docent, Material Sciences, Technologies and Quality Management Department, Saratov State University, ORCID: 0000-0002-1005-1616
Anastasiya D. Chirkova – Senior Laboratory Specialist, Physics Institute, Saratov State University

Поступила в редакцию/received: 20.07.2026; после рецензирования/revised: 26.08.2026; принята/accepted: 29.08.2026.

1. Введение

Перспективным подходом к управлению функциональными характеристиками полупроводниковых газовых сенсоров (откликом, временами отклика и восстановления, селективностью и др.) является их фотоактивация [1]. Адсорбированные молекулы газов наряду с собственными дефектами материала (например, вакансиями кислорода V_O) создают энергетические уровни в запрещённой зоне полупроводника, участвующие в процессах ионизации и рекомбинации носителей заряда. Облучение активного слоя сенсора вызывает перераспределение заряда полупроводника за счёт ионизации этих уровней, что влияет на избирательность отклика к отдельным компонентам газовых смесей [2].

Использование ультрафиолетового (УФ) излучения является альтернативой высокотемпературному нагреву металлооксидных сенсоров газа. В то же время, длительная эксплуатация сенсоров при температурах порядка 350°C и выше приводит к дрейфу базовой линии проводимости, спеканию и укрупнению зёрен, а также ухудшению газочувствительных свойств [3]. В работе [4] показано, что повышение температуры отжига слоёв оксида цинка *ZnO* свыше 400°C сопровождается ростом зёрен и снижением чувствительности к этанолу.

Оксид цинка является одним из наиболее перспективных материалов для создания газочувствительных структур, функциональными характеристиками которых управляют с помощью облучения в УФ-диапазоне длин волн [5]. Ширина запрещённой зоны 3,4 эВ обеспечивает поглощение излучения с длиной волны 365 нм с коэффициентом поглощения от 10^4 см$^{-1}$ до 10^5 см$^{-1}$ [6]. Несмотря на это, фотоотклик *ZnO* наблюдается при облучении видимым светом (вплоть до 520 нм) за счёт ионизации глубоких центров, связанных с собственными дефектами материала, содержание которых зависит от морфологии

фоточувствительных структур [7, 8]. Сенсибилизация оксидов металлов узкозонными полупроводниками позволяет расширить спектральный диапазон фотоактивации в длинноволновую область [9].

Освещение слоёв ZnO позволяет управлять величиной и, при определённых условиях, знаком отклика на газы-восстановители, что обусловлено изменением положения квазиуровня Ферми относительно примесных уровней адсорбатов [10]. Понимание физических механизмов газочувствительности открывает возможности для управления типом отклика для создания селективных сенсорных систем [11].

Влияние излучения на газочувствительные свойства сенсора может быть усилено за счёт модификации материала активного слоя – изменения морфологии, легирования или создания композитов. Повышение отклика ZnO к водороду при облучении за счёт перехода от плёночной морфологии к нанолентам продемонстрировано в работе [12]. В композитной системе на основе $ZnO-SnO_2$ показано, что доля оксида цинка влияет на кинетику фотопроводимости и газочувствительность, что авторы связывают с изменением высоты межзёренных барьеров [13]. Для сенсоров на основе ZnO, модифицированного платиной, наблюдалось повышение селективности к парам органических соединений (этанол, ацетон и др.) при воздействии УФ-излучения [14].

В работе [15] предложено использовать показатель нелинейности вольт-амперных характеристик для распознавания газов-восстановителей, а в [16] – динамику изменения сопротивления активного слоя. Облучение мультисенсорных систем на основе слоёв SnO_2 длиной волны 365 нм повышает вероятность классификации паров органических растворителей [17]. Вместе с тем, влияние излучения на селективность одиночного сенсора ZnO не рассматривалось, что и послужило основой для настоящего исследования.

Целью настоящей работы является установление закономерностей влияния УФ-излучения на отклик и селективность одиночного сенсора газа на основе слоёв оксида цинка при воздействии паров этанола, ацетона и изопропанола.

2. Методика эксперимента и образцы

Исходными реагентами для синтеза образцов служили порошок дигидрата ацетата цинка ($Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O$) и 25% водный раствор аммиака. В качестве растворителя использовали изопропиловый спирт.

Для приготовления 0.1 М раствора ацетата цинка навеску порошка массой 1.1 г растворяли в 50 мл изопропилового спирта, нагретого до 60°С. Перемешивание раствора осуществляли на магнитной мешалке со скоростью 800 об/мин в течение 30 минут до полного растворения соли.

Для гомогенизации системы раствор ацетата цинка обрабатывали в ультразвуковой ванне в течение 5 минут.

Для приготовления раствора аммиака смешивали 3,74 мл его водного раствора и 50 мл изопропилового спирта. Смесь перемешивали на магнитной мешалке в течение 30 минут до полной гомогенизации.

В стакан, помещённый в ледяную баню, отбирали 20 мл приготовленного 0,1 М раствора ацетата цинка и охлаждали систему до температуры 5°С. Раствор аммиака добавляли к раствору ацетата цинка порциями объёмом 1 мл. В процессе смешивания растворов контролировалось значение pH реакционной смеси с помощью индикаторных полосок. Процесс добавления раствора аммиака прекращали при достижении значения $pH = 8$:

$$Zn(CH_3COO)_2 + 2NH_4OH = Zn(OH)_2 \downarrow + 2CH_3COONH_4, \quad (1)$$

Раствор с гидроксидом цинка $Zn(OH)_2$ перемешивали при температуре 5°С в течение часа на магнитной мешалке при скорости вращения якоря 800 об/мин. После перемешивания раствор оставляли в ледяной бане на 1 час. В течение первых 15 минут наблюдалось формирование гелеобразного осадка.

Полученный осадок подвергали многоступенчатой промывке абсолютным изопропанолом для удаления побочных ионных продуктов реакции (ионы аммония NH_4^+, ацетат-ионы CH_3COO^-), включающей центрифугирование (центрифуга Sigma 2-16P) при скорости вращения 4000 об/мин в течение 3 минут. После каждого цикла надосадочную жидкость декантировали.

Очищенный осадок $Zn(OH)_2$ редиспергировали в изопропаноле объёмом 1 мл с образованием стабильной коллоидной суспензии. Для дезагрегации частиц и получения однородной системы суспензию обрабатывали в ультразвуковой ванне в течение 10 минут.

Перед нанесением покрытий поверхность поликристаллических подложек Al_2O_3 размером 5×10 мм подвергали очистке. Сначала подложки помещали в стеклянный стакан с 10 мл ацетона и подвергали обработке ультразвуковой в ванне при температуре 70°С в течение 10 минут. Затем проводили механическую очистку поверхности подложки щёткой из натурального ворса под струёй деионизированной воды для удаления адсорбированных частиц и органических остатков. На заключительном этапе подложки закрепляли во вращающемся держателе центрифуги, где при скорости вращения 3000 об/мин происходило полное удаление жидкости с поверхности за счёт действия центробежных сил.

Слои гидроксида цинка формировали методом центрифугирования на предварительно очищенные поликоровые подложки. Для этого на

подложку наносили 0,1 мл суспензии, содержащей $Zn(OH)_2$, и центрифугировали в течение 30 секунд. Сформированные слои сушили при температуре 80°C в течение 30 минут для удаления остаточного растворителя и завершения процессов поликонденсации.

Заключительным этапом синтеза являлась термическая обработка образцов в трубчатой электропечи SNOL 0,2/1250. Термообработка образцов включала в себя нагрев до 400°C со скоростью 5°C/с, изотермическую выдержку в печи 5 часов в потоке кислорода 100 см^3/мин. Данный этап обеспечивал разложение органических остатков, дегидратацию гидроксида цинка с образованием оксидной фазы, кристаллизацию и стабилизацию структурных и электрических свойств образцов:

$$Zn(OH)_2 = ZnO + H_2O\uparrow. \qquad (2)$$

Согласно данным СЭМ, полученные слои имели пористую структуру, образованную ансамблем гексагональных наностержней [0].

На рис. 1 представлен процесс синтеза слоёв.

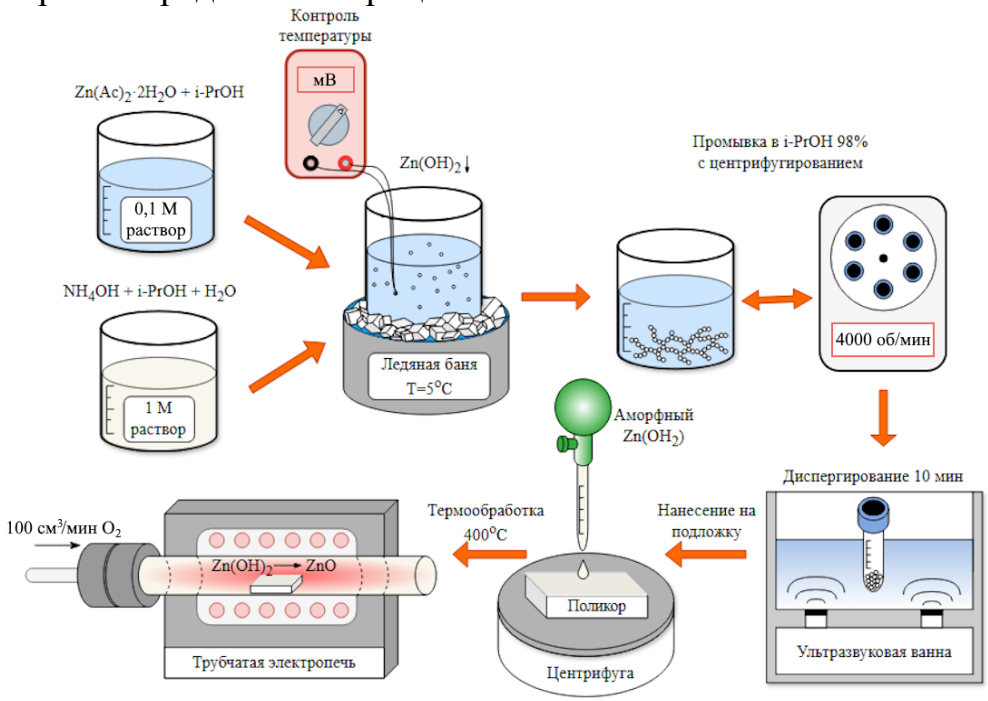

Рис. 1. Схематическое изображение процесса синтеза образцов.

После термообработки на поверхность образца наносились металлические электроды. Осаждение на поверхность слоя ZnO проводилось через проволочную маску методом термического испарения хрома в установке ORION-40T. Межэлектродный зазор составлял 40 мкм, толщина металлического слоя составляла 1 мкм.

На рис. 2 изображена схема установки для измерения фото- и газочувствительных свойств образцов.

Поток чистого осушенного воздуха формировался генератором

ГЧВ-1.2-3 (НПП «Химэлектроника»); остаточная концентрация паров воды не превышала 10 мд. Потоки насыщенных паров проб создавались методом барботирования с последующим смешением с сухим воздухом в заданных пропорциях. Расход газа через измерительную камеру во всех экспериментах составлял 100 см^3/мин.

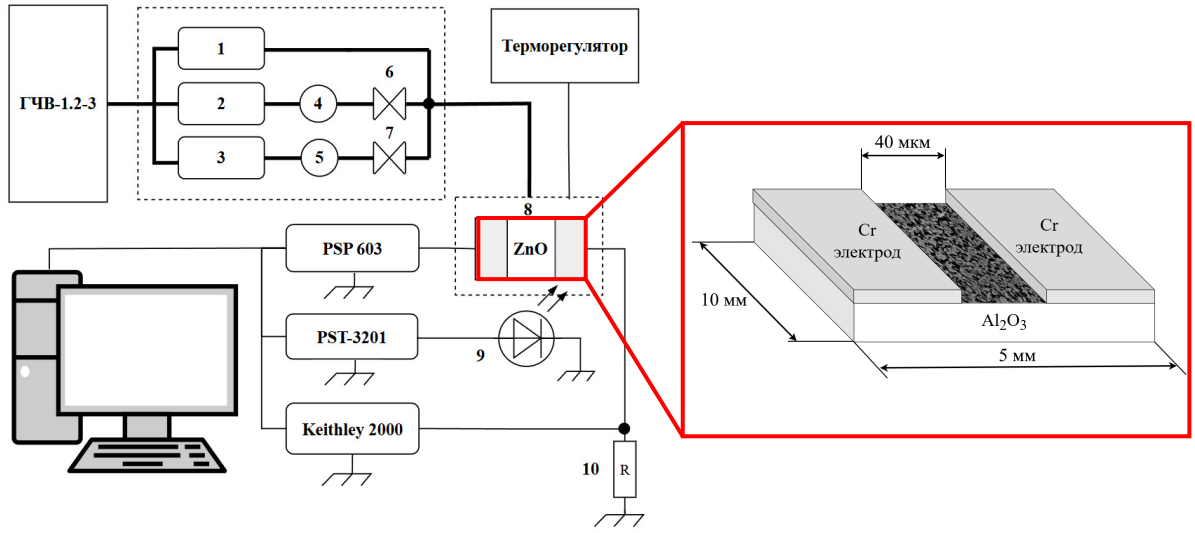

Рис. 2. Схематическое изображение измерительного стенда и структуры образца: 1, 2, 3 – регуляторы массового расхода газа, 4 и 5 – барботёры, 6 и 7 – электромагнитные клапаны, 8 – образец, 9 – светодиод, 10 – нагрузочное сопротивление (пунктиром выделены термостатируемые элементы стенда).

Измерение проводимости образца осуществлялось потенциометрическим методом в режиме постоянного напряжения. Образец облучался УФ-светодиодом с длиной волны 365 нм через кварцевое окно. Газочувствительные свойства образца измерялись при рабочей температуре 230°C в темноте и при постоянной интенсивности излучения от 5 мВт/см^2 до 20 мВт/см^2.

3. Экспериментальные результаты и их обсуждение

На рис. 3 а-г представлены концентрационные зависимости отклика сенсора к парам проб при различной интенсивности УФ-излучения I. Отклик к газам рассчитывался как относительное изменение проводимости:

$$S_{\text{gas}} = (G_{\text{gas}} - G_0)/G_0 , \qquad (3)$$

где G_{gas} и G_0 – стационарная проводимость образца в газовой пробе и в осушенном воздухе соответственно.

Как следует из рис. 3, увеличение интенсивности излучения (365 нм) до 20 мВт/см^2 приводит к росту отклика сенсора на воздействие газов до 10 раз во всём исследованном диапазоне концентраций. При этом характер усиления зависит от природы газа: при облучении свыше 5 мВт/см^2 отклик

на этанол начинает превышать отклик на изопропанол, что свидетельствует о селективном усилении сенсора к этанолу.

Наиболее вероятной причиной наблюдаемого увеличения отклика при облучении является фотоионизация поверхностных электронных состояний, индуцированных адсорбцией молекул донорных газов. Для проверки данного предположения исследовался фотоотклик структур в насыщенных парах этанола, ацетона и изопропанола в спектральной области за краем фундаментального поглощения ZnO, где межзонные переходы невозможны (см. рис. 4).

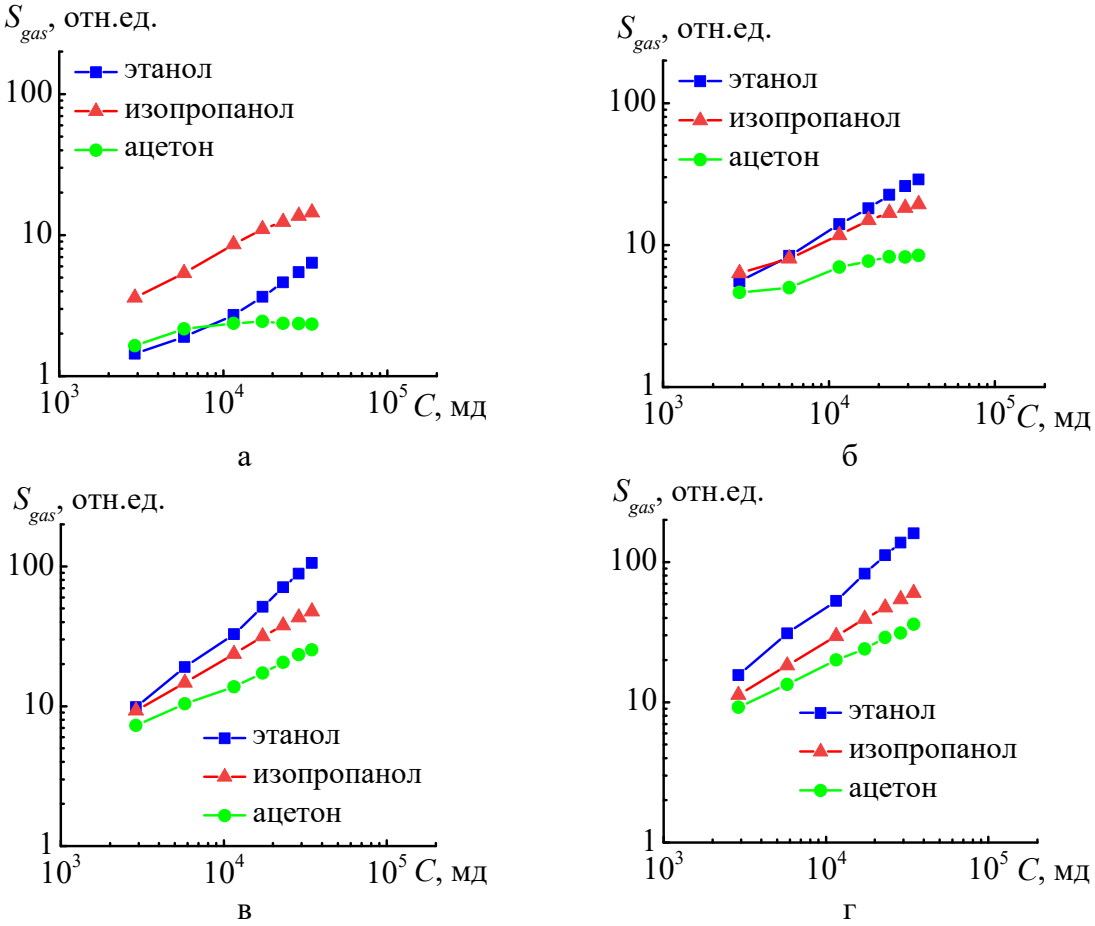

Рис. 3. Концентрационные зависимости отклика к газам при различной интенсивности излучения: а – в темноте, б – I = 5 мВт/см^2, в – I = 10 мВт/см^2, г – I = 20 мВт/см^2.

Фотоотклик оценивался как относительное изменение проводимости при освещении G_{photo} по сравнению темновой проводимостью на воздухе G_0:

$$S_{\text{photo}} = \left(G_{\text{photo}} - G_0\right)/G_0 \,. \qquad (4)$$

Наблюдаемое различие в величине фотоотклика в насыщенных парах веществ указывает на определяющую роль ионизации поверхностных примесных центров, индуцированных адсорбированными частицами газа.

При облучении 400 нм фотоотклик варьировался от 0,3 отн. ед. на

воздухе до 1,2 отн. ед. в парах этанола (см. рис. 4 а). При 525 нм фотоотклик в этаноле составлял 0,15 отн. ед., в ацетоне и на воздухе составлял 0,08 отн. ед., тогда как в изопропаноле не превышал уровня шума (см. рис. 4 б). Это различие указывает на недостаточность энергии фотонов для фотоионизации уровней, индуцированных изопропанолом.

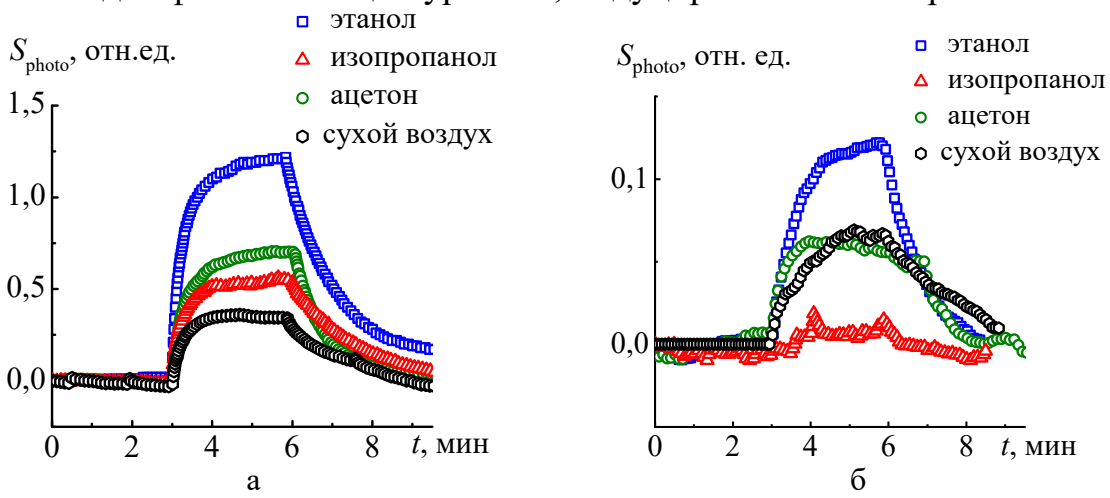

Рис. 4. Фотоотклик сенсора на воздействие излучения в кислородсодержащей атмосфере и в газовых средах, содержащих пары проб: а – 400 нм, б – 525 нм.

Спад фотоотклика с ростом длины волны (см. рис. 4 б) связан с уменьшением коэффициента поглощения и снижением скорости фотоионизации центров в приповерхностном слое и объёме материала. В условиях оптического возбуждения происходит перераспределение заряда в приповерхностной области полупроводника, сопровождающееся смещением электронного квазиуровня Ферми и обусловливает селективный характер ионизации поверхностных состояний.

Для оценки влияния освещения на селективность сенсоров в системе исследуемых веществ на основе данных рис. 3 были рассчитаны коэффициенты селективности (sel) и специфичности (spec) при фиксированной концентрации аналитов (см. рис. 5):

$$sel = S_0 / S_i , \quad spec = S_0 \Big/ \sum_{i=0...2}^{2} S_i , \tag{5}$$

где S_0 – отклик к парам целевого газа (этанола), S_i – отклик на воздействие мешающих примесей.

Коэффициент селективности показывает, во сколько раз отклик на целевой газ превышает отклик на нецелевой. Коэффициент специфичности отражает долю отклика на определённый газ в суммарном отклике на все газы [18].

Анализ экспериментальных данных показал, что увеличение интенсивности освещения приводит к монотонному росту селективности сенсора к этанолу (см. рис. 5 а). Максимальное значение коэффициента селективности достигается для пары этанол/ацетон и составляет 4,5. Для

пары этанол/изопропанол коэффициент возрастает с 0,81 до 2,39 при увеличении интенсивности освещения. При этом селективность для пары изопропанол/ацетон снижается.

В темновых условиях наблюдается наибольшая специфичность сенсора к изопропанолу. С ростом интенсивности освещения специфичность к изопропанолу снижается с 0,6 до 0,25, тогда как к этанолу возрастает с 0,25 до 0,63 (см. рис. 5 б). Практически это означает, что переключение между режимами детектирования этанола и изопропанола с помощью одного сенсора может осуществляться варьированием интенсивности освещения.

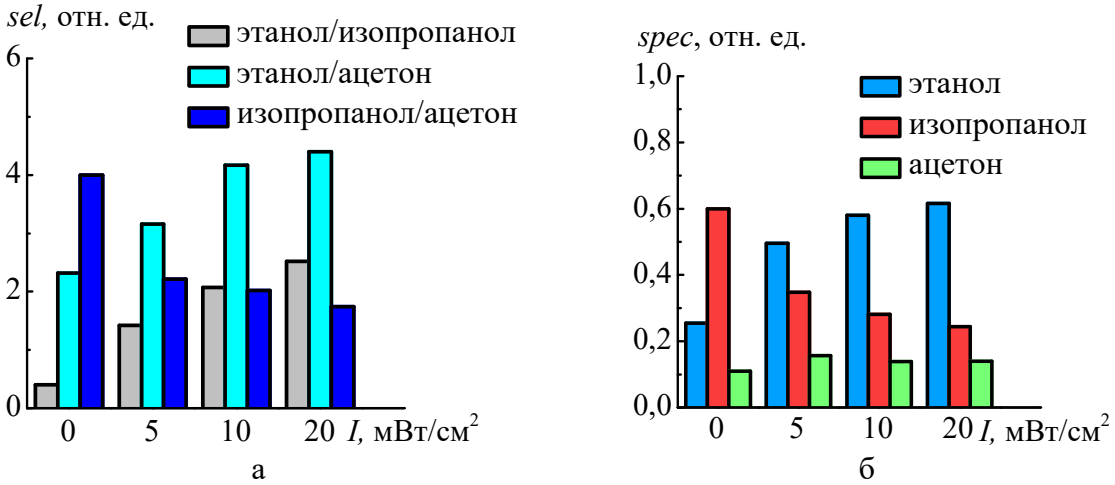

Рис. 5. Влияние интенсивности излучения светодиода на: а – коэффициент селективности, б – коэффициент специфичности.

4. Заключение

В работе исследовано влияние освещения на отклик и селективность газовых сенсоров на основе пористых слоёв *ZnO*, сформированных методом химического осаждения. Установлено, что освещение образца с длиной волны 365 нм и интенсивностью от 5 мВт/см^2 до 20 мВт/см^2 приводит к увеличению отклика сенсора на пары этанола, изопропанола и ацетона до 10 раз при рабочей температуре 230°C. Облучение образца приводит к селективному увеличению отклика сенсора на пары этанола по сравнению с ацетоном и изопропанолом. Повышение отклика и селективности обусловлено различной глубиной залегания адсорбционно-индуцированных уровней газов, что обеспечивает селективный характер их фотоионизации.

Таким образом, изменение интенсивности освещения позволяет управлять откликом и селективностью одиночного сенсора газа, что может служить основой для создания фотоуправляемых систем распознавания газов на основе слоев оксида цинка.

Библиографический список:

1. **Espid, E.** UV-LED photo-activated chemical gas sensors: a review / E. Espid, F. Taghipour // Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences. – 2017. – V. 42. – I. 5. – P. 416-432. DOI: 10.1080/10408436.2016.1226161.
2. **de Lacy Costello, B.P.J.** Highly sensitive room temperature sensors based on the UV-LED activation of zinc oxide nanoparticles / B.P.J. de Lacy Costello, R.J. Ewen, N.M. Ratcliffe, M. Richards // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2008. – Vol. 134. – I. 2. – P. 945-952. DOI: 10.1016/j.snb.2008.06.055.
3. **Korotcenkov, G.** Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice? / G. Korotcenkov // Materials Science and Engineering B. – 2007. – V. 139. – I. 1. – P. 1-23. DOI: 10.1016/j.mseb.2007.01.044.
4. **Клычков, Н.А.** Управление морфологией и проводимостью гексагональных наностержней ZnO с помощью термообработки для приложений газовой сенсорики / Н.А. Клычков, В.В. Симаков, И.В. Синёв и др. // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2025. – Вып. 17. – С. 649-657. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.649.
5. **Wang, C.** Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors / C. Wang, L. Yin, L. Zhang, D. Xiang, R. Gao // Sensors. – 2010. – V. 10. – I. 3. – P. 2088-2106. DOI: 10.3390/s100302088.
6. **Yoshikawa, H.** Optical constants of ZnO / H. Yoshikawa, S. Adachi // Japanese Journal of Applied Physics. – 1997. – V. 36. – № 10R. – P. 6237-6243. DOI: 10.1143/JJAP.36.6237.
7. **Geng, Q.** Gas sensing property of ZnO under visible light irradiation at room temperature / Q. Geng, Z. He, X. Chen et al. // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2013. – V. 188. – P. 293-297. DOI: 10.1016/j.snb.2013.07.001.
8. **Wang, Y.** Controllable synthesis of ZnO nanoflowers and their morphology-dependent photocatalytic activities / Y. Wang, X. Li, N. Wang et al. // Separation and Purification Technology. – 2008, – V. 62. – I. 3. – P. 727–732. DOI: 10.1016/j.seppur.2008.03.035.
9. **Рябко, А.А.** Сенсибилизация наностержней ZnO коллоидными квантовыми точками $AgInS_2$ для адсорбционных газовых сенсоров с фотоактивацией / А.А. Рябко, С.С. Налимова, Д.С. Мазинг и др. // Журнал технической физики. – 2022. – Т. 92. – Вып. 6. – С. 846-852. DOI: 10.21883/JTF.2022.06.52514.15-22.
10. **Клычков, Н.А.** Использование освещения для идентификации газовых сред полупроводниковыми сенсорами на основе оксида цинка / Н.А. Клычков, В.В. Симаков, И.В. Синёв // Физика и техника полупроводников. – 2025. – Т. 59. – Вып. 5. – С. 259-264. DOI: 10.61011/FTP.2025.05.61469.7910.
11. **Vorobyeva, N.** Inversion of NH3 sensor signal and paramagnetic centers of nanocrystalline ZnO(Ga) / N. Vorobyeva, M. Rumyantseva, E. Konstantinova et al. // Procedia Engineering. – 2011. – V. 25. – P. 296-299. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.073.
12. **Fan, S.W.** UV-activated room-temperature gas sensing mechanism of polycrystalline ZnO / S.W. Fan, A.K. Srivastava, V.P. Dravid // Applied Physics Letters. – 2009. – V. 95. – I. 14. – Art. №. 142106. – 3 p. DOI: 10.1063/1.3243458.
13. **Gulyaeva, I.A.** Investigation of electrophysical, photo- and gas-sensitive properties of $ZnO\text{-}SnO_2$ sol-gel films / I.A. Gulyaeva, A.P. Ivanisheva, M.G. Volkova et al. // Journal of Advanced Dielectrics. – 2024. – V. 14. – № 1. – Art. № 2245002. – 9 p. DOI: 10.1142/S2010135X22450023.
14. **Deng, Q.** Temperature and light modulation to enhance the selectivity of Pt-modified zinc oxide gas sensor / Q. Deng, S. Gao, T. Lei et al. // Sensors and Actuators B: Chemical. – 2017. – V. 247. – P. 903-915. DOI: 10.1016/j.snb.2017.03.107.
15. **Симаков, В.В.** Вольт-амперные характеристики тонкопленочных газочувствительных структур на основе оксида олова / В.В. Симаков, О.В. Якушева, А.И. Гребенников, В.В. Кисин // Письма в Журнал технической физики. – 2005. – Т. 31. – Вып. 8. – С. 30-35.
16. **Смирнов, А.В.** Отклик газочувствительной микросистемы на запах перегретой изоляции электрического кабеля / А.В. Смирнов, А.И. Гребенников, А.Н. Грибов и др. // Нано-и микросистемная техника. – 2014. – Вып. 2. – С. 53-56.
17. **Синёв, И.В.** Влияние освещения на распознавательную способность мультисенсорных микросистем на основе нитевидных нанокристаллов диоксида олова / И.В. Синёв, Н.А. Клычков, Д.А. Тимошенко, В.В. Симаков // Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов. – 2020. – Вып. 12. – С. 713-721. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.713.
18. **Danzer, K.** Selectivity and specificity in analytical chemistry. General considerations and attempt of a definition and quantification / K. Danzer // Fresenius' Journal of Analytical Chemistry. – 2001. – V. 369. – I. 5. – P. 397-402. DOI: 10.1007/s002160000684.

References:

1. Espid E., Taghipour F. UV-LED photo-activated chemical gas sensors: a review, *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2017, vol. 42, issue 5, pp. 416-432. DOI: 10.1080/10408436.2016.1226161.
2. de Lacy Costello B.P.J., Ewen R.J., Ratcliffe N.M., Richards M. Highly sensitive room temperature sensors based on the UV-LED activation of zinc oxide nanoparticles, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2008, vol. 134, issue 2, pp. 945-952. DOI: 10.1016/j.snb.2008.06.055.
3. Korotcenkov G. Metal oxides for solid-state gas sensors: What determines our choice?, *Materials Science and Engineering B*, 2007, vol. 139, issue 1, pp. 1-23. DOI: 10.1016/j.mseb.2007.01.044.
4. Klychkov N.A., Simakov V.V., Sinev I.V. et al. Upravlenie morfologiej i provodimostyu geksagonalnykh nanosterzhnej ZnO s pomoshchyu termoobrabotki dlya prilozhenij gazovoj sensoriki [Morphology and conductivity control in hexagonal ZnO nanorods through annealing for gas sensor applications], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov [Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials],* 2025, issue 17, pp. 649-657. DOI: 10.26456/pcascnn/2025.17.649. (In Russian).
5. Wang C., Yin L., Zhang L., Xiang D., Gao R. Metal oxide gas sensors: sensitivity and influencing factors, *Sensors*, 2010, vol. 10, issue 3, pp. 2088-2106. DOI: 10.3390/s100302088.
6. Yoshikawa H., Adachi S. Optical constants of ZnO, *Japanese Journal of Applied Physics*, 1997, vol. 36, no. 10R, pp. 6237-6243. DOI: 10.1143/JJAP.36.6237.
7. Geng Q., He Z., Chen X. et al. Gas sensing property of ZnO under visible light irradiation at room temperature, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2013, vol. 188, pp. 293-297. DOI: 10.1016/j.snb.2013.07.001.
8. Wang Y., Li X., Wang N. et al. Controllable synthesis of ZnO nanoflowers and their morphology-dependent photocatalytic activities, *Separation and Purification Technology*, 2008, vol. 62, issue 3, pp. 727-732. DOI: 10.1016/j.seppur.2008.03.035.
9. Ryabko A.A., Nalimova S.S., Mazing D.S. et al. Sensitization of ZnO nanorods by $AgInS_2$ colloidal quantum dots for adsorption gas sensors with light activation, Technical Physics, 2022, vol. 67, no. 6, pp. 717-722. DOI: 10.21883/TP.2022.06.54418.15-22.
10. Klychkov N.A., Simakov V.V., Sinev I.V. Light-assisted gas identification using ZnO semiconductor sensors, *Semiconductors*, 2025, vol. 59, issue 5, pp. 241-245. DOI: 10.61011/SC.2025.05.61987.7910.
11. Vorobyeva N., Rumyantseva M., Konstantinova E. et al. Inversion of NH_3 sensor signal and paramagnetic centers of nanocrystalline ZnO(Ga), *Procedia Engineering*, 2011, vol. 25, pp. 296-299. DOI: 10.1016/j.proeng.2011.12.073.
12. Fan S.W., Srivastava A.K., Dravid V.P. UV-activated room-temperature gas sensing mechanism of polycrystalline ZnO, *Applied Physics Letters*, 2009, vol. 95, issue 14, art. no. 142106, 3 p. DOI: 10.1063/1.3243458.
13. Gulyaeva I.A., Ivanisheva A.P., Volkova M.G. et al. Investigation of electrophysical, photo- and gas-sensitive properties of ZnO–SnO_2 sol-gel films, *Journal of Advanced Dielectrics,* 2024, vol. 14, no. 1, art. no. 2245002, 9 p. DOI: 10.1142/S2010135X22450023.
14. Deng Q., Gao S., Lei T. et al. Temperature and light modulation to enhance the selectivity of Pt-modified zinc oxide gas sensor, *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2017, vol. 247, pp. 903-915. DOI: 10.1016/j.snb.2017.03.107.
15. Simakov V.V., Yakusheva O.V., Grebennikov A.I., Kisin V.V. Current-voltage characteristics of thin-film gas sensor structures based on tin dioxide, *Technical Physics Letters*, 2005, vol. 31, issue 4, pp. 339-340.
16. Smirnov A.V., Grebennikov A.I., Gribov A.N. et al. Otklik gazochuvstvitel`noj mikrosistemy` na zapax peregretoj izolyacii e`lektricheskogo kabelya [Response of a gas-sensitive microsystem to the smell of overheated electrical cable insulation], *Nano-i mikrosistemnaya tekhnika* [*Nano- and Microsystems Technology*], 2014, no. 2, pp. 53-56. (In Russian).
17. Sinev I.V., Klychkov N.A., Timoshenko D.A., Simakov V.V. Vliyanie osveshcheniya na raspoznavatelnuyu sposobnost multisensornikh mikrosistem na osnove nitevidnikh nanokristallov dioksida olova [Illumination effect on recognition ability of multisensor microsystems based on tin oxide nanowhiskers], *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniya klasterov, nanostruktur i nanomaterialov* [*Physical and chemical aspects of the study of clusters, nanostructures and nanomaterials*], 2020, issue 12, pp. 713-721. DOI: 10.26456/pcascnn/2020.12.713.
18. Danzer K. Selectivity and specificity in analytical chemistry. General considerations and attempt of a definition and quantification, *Fresenius' Journal of Analytical Chemistry*, 2001, vol. 369, issue 5, pp. 397-402. DOI: 10.1007/s002160000684.