

Нанокompозиты пористого кремния и оксида цинка для газовой сенсорики

© С.С. Налимова¹, А.Ю. Гагарина¹, Ю.М. Спивак¹, З.В. Шомахов²,
А.Д. Большаков^{3,4}, В.М. Кондратьев^{3,4}, В.А. Мошников¹

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ им. В.И. Ульянова (Ленина),
197022 Санкт-Петербург, Россия

² Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова,
360004 Нальчик, Россия

³ Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет им. Ж.И. Алфёрова
Российской академии наук,
194021 Санкт-Петербург, Россия

⁴ Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет),
141701 Долгопрудный, Московская обл., Россия

E-mail: sskarpova@list.ru

Поступила в Редакцию 26 октября 2025 г.

В окончательной редакции 26 февраля 2026 г.

Принята к публикации 1 июня 2026 г.

Композитные материалы представляют большой интерес для газовой сенсорики благодаря широким возможностям управления характеристиками сенсоров. В данной статье исследуются возможности повышения отклика газочувствительных слоев оксида цинка при использовании их в качестве компонента гибридной наноструктуры, которая также включает наностержни пористого кремния, полученные модифицированным металл-стимулированным химическим травлением. Гибридная наноструктура была проанализирована с помощью растровой электронной микроскопии, рентгеноспектрального микроанализа и рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии. Было показано, что гибридный газочувствительный слой проявлял отклик, который в 2 раза превышал отклик слоя оксида цинка при температуре 250 °С. Наблюдаемое увеличение отклика объясняется большой площадью поверхности, уникальной иерархической пористой структурой и увеличением содержания кислородных вакансий.

Ключевые слова: газовый сенсор, гибридная наноструктура, пористый кремний, оксид цинка, металл-стимулированное химическое травление, гидротермальный синтез.

DOI: 10.61011/FTP.2026.03.63588.8650

1. Введение

В настоящее время хеморезистивные газовые сенсоры широко используются для обнаружения широкого спектра газов [1]. Как правило, конструкция этих сенсоров включает керамическую подложку, газочувствительный слой, нагреватель и электроды. В качестве газочувствительных слоев обычно используются оксиды металлов, включая SnO_2 , ZnO , In_2O_3 , Fe_2O_3 и WO_3 [2,3]. Сигнал генерируется за счет изменения сопротивления активного слоя в результате его взаимодействия с регистрируемым газом. Когда молекулы восстанавливающего газа вступают в реакцию с адсорбированными ионами кислорода, образуются электроны, которые переходят в объем полупроводникового материала, приводя к уменьшению сопротивления. И наоборот, когда слой вступает в реакцию с окисляющим газом, электроны захватываются молекулами газа, адсорбирующегося на поверхности полупроводникового материала, что приводит к увеличению его сопротивления. Заключительной стадией этого процесса является десорбция продуктов реакции. Типичные рабочие температуры полупроводниковых газовых датчиков составляют от 300 до 400 °С [4], что может привести к высокому энергопотреблению и

проблемам безопасности при появлении горючих газов. Кроме того, длительная эксплуатация при повышенных температурах может привести к необратимым изменениям электрических свойств оксидов металлов и нестабильности сигнала сенсора.

Амплитуда сигнала сенсора зависит от удельной площади поверхности полупроводника, определяющей количество центров адсорбции молекул кислорода и целевого газа [5]. В связи с этим разработка чувствительных слоев с использованием наночастиц и наноструктур является важной областью исследований [6–8].

Помимо оксидов металлов исследуются также другие газочувствительные материалы, такие как графен и его производные, углеродные нанотрубки, дихалькогениды переходных металлов и т.д. [9–12].

Особый интерес представляют структуры на основе наноструктурированного кремния [13]. Пористые кремниевые наноструктуры, такие как слои, стержни и композиты на их основе, широко используются для различных целей, включая создание газовых сенсоров [14–18], биосенсоров [19–21], солнечных элементов [22,23], электродов топливных элементов и анодов литий-ионных батарей, псевдоконденсаторов [24–26], а также для адресной доставки лекарств [27–30] и энергосистем [31].

Уникальность наноструктур на основе пористого кремния главным образом заключается в возможности управления характеристиками пористой текстуры в широком диапазоне и, следовательно, ее свойствами путем изменения технологических параметров получения наноматериала или посредством функционализации пористой матрицы металлами, оксидами металлов или углеродными материалами. К перспективным с точки зрения сенсорики и нанoeлектроники наноструктурам пористого кремния относятся пористые кремниевые наностержни (ПКНС). Структура ПКНС характеризуется высокой удельной площадью поверхности, а также наличием строго упорядоченных вертикальных каналов, облегчающих функционализацию пористой матрицы. Существенным достоинством таких структур является то, что они формируются на кремниевой подложке, а значит, возможна их интеграция на одном чипе с кремниевыми интегральными микросхемами.

В ряде работ исследованы сенсорные свойства композитных материалов на основе наноструктурированных пористых стержней кремния. Например, показана эффективность детектирования CO_2 при комнатной температуре структурами Si-наностержней, покрытых оксидом цинка [32]. Было показано, что гибридные структуры, содержащие наностержни кремния, а также наностержни ZnO [33], наностержни WO_3 [34] или наноленты MoS_2 [35], эффективны для обнаружения NO_2 . Сочетание в одном слое материалов с различными свойствами и создание композитных и гибридных наноструктур также может способствовать улучшению сенсорных характеристик: отклика, быстродействия, а в некоторых случаях и селективности [36].

Цель данного исследования заключается в разработке газочувствительных гибридных наноструктур путем объединения наностержней пористого кремния с оксидом цинка. В качестве тестового газа для изучения газочувствительных свойств был использован изопропиловый спирт, типичный пример газа-восстановителя и представитель летучих органических соединений. Композиционная структура данного вида была выбрана по следующим соображениям. Недостатком многих газовых сенсоров адсорбционного типа является то, что в них область взаимодействия с газовыми молекулами является только внешняя часть поверхности. В нашей работе использование наностержней пористого кремния позволяет не только увеличить площадь поверхности, но и за счет их объемной пористой структуры и неупорядоченного расположения на диэлектрической подложке обеспечить работу всего сформированного слоя, а не только его внешней поверхности.

2. Эксперимент

2.1. Синтез

На кремниевой подложке был синтезирован слой, состоящий из наностержней пористого кремния. Для этого

было использовано двухэтапное модифицированное химическое травление монокристаллического кремния n -типа с ориентацией (111) [37]. Сначала проводили травление в водно-спиртовом растворе HF (45 %) и AgNO_3 (0.1 моль/л) с одновременным нанесением наночастиц серебра при плотности тока анодирования 15 мА/см^2 в течение 4.5 мин. Использование спирта улучшает смачивание кремния электролитом, в то время как AgNO_3 действует как источник ионов серебра. Этот метод осаждения серебра, известный как электрохимическое анодирование (первая стадия), позволяет осаждать наночастицы серебра на поверхность пористого материала [38]. Подобный способ осаждения серебра (электрохимическое анодирование, первый этап) позволяет получить наночастицы серебра на поверхности пористой матрицы, т.е. без проникновения серебра в глубину пористого слоя. Использование серебра для синтеза объясняется его высокой каталитической активностью.

На втором этапе осуществлялось электрохимическое травление композита на основе пористого кремния и наночастиц Ag в водно-спиртовом растворе HF при плотности тока анодирования 180 мА/см^2 в течение 20 мин. Состав электролита — $\text{C}_3\text{H}_8\text{O}:\text{HF}:\text{H}_2\text{O}$ (2:1:1) [37]. Осажденное на поверхность пластины серебро способствует интенсивному локальному окислению и последующему точечному травлению окисленного участка Si во фтороводородной кислоте. В завершение синтеза образцы подвергались постобработке в водном растворе HNO_3 , спирте и дистиллированной воде в течение 10 мин.

Затем на поверхности слоя пористых кремниевых наностержней были синтезированы наночастицы оксида цинка с помощью центрифугирования (3000 об/мин, 30 с) водного раствора ацетата цинка ($\text{Zn}(\text{CH}_3\text{COO})_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) с концентрацией 5 ммоль/л. Эксперимент выполняли с помощью лабораторной центрифуги Eppendorf MiniSpin, дополненной специальной насадкой для спин-коатинга. Эту процедуру повторяли 5 раз. Полученные образцы отжигали при температуре 500°C в течение 5 мин. После этого наностержни оксида цинка выращивали низкотемпературным гидротермальным методом [39]. Водные растворы $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (25 ммоль/л) и гексаметиленetetрамина (25 ммоль/л) смешивали и помещали в автоклав из нержавеющей стали с тефлоновой вставкой объемом 25 мл. Подложку с пористыми кремниевыми наностержнями и наночастицами оксида цинка погружали в раствор. Автоклав выдерживали при температуре 85°C в течение 1 ч. Затем готовые гибридные слои промывали дистиллированной водой, высушивали на воздухе и отжигали (500°C , 30 мин).

Для формирования чувствительного элемента гибридный слой был механически отделен от поверхности кремния. Полученный порошок диспергировали в изопропиловом спирте (1 ppm) с помощью ультразвуковой ванны и наносили на поверхность подложки с электродами с помощью центрифуги (1000 об/мин, 30 с), количество циклов нанесения — 10, до достижения одно-

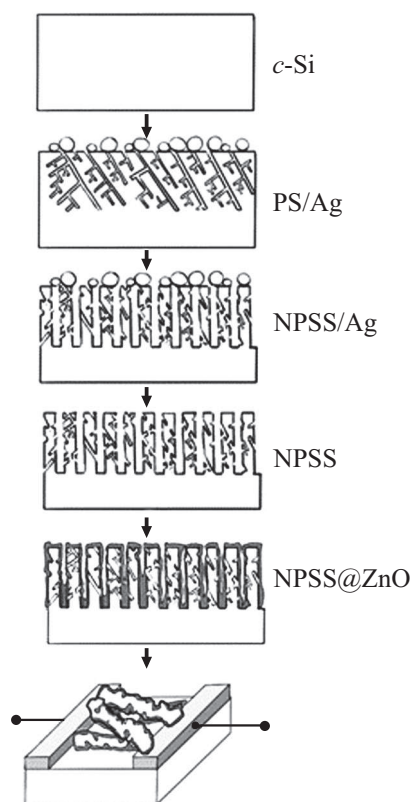


Рис. 1. Основные этапы получения газочувствительного слоя „пористый кремний/оксид цинка“.

родности газочувствительного слоя. Затем был проведен термический отжиг при температуре 500 °С в течение 30 мин. Общая схема формирования газочувствительного слоя „пористый кремний/оксид цинка“ представлена на рис. 1.

Для сравнения характеристик гибридной структуры с газочувствительными свойствами ZnO, синтезированного в тех же условиях, зародышевый слой наночастиц оксида цинка был нанесен непосредственно на изолирующую подложку с напыленными электродами. Этот слой был использован для последующего роста наностержней оксида цинка.

2.2. Характеризация

Морфология поверхности гибридных наноструктур была изучена с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ). В работе был использован микроскоп Zeiss Supra 25 (Zeiss, Германия). Элементный состав поверхности образца был определен с помощью рентгеноспектрального микроанализа (РСМА). Анализ с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) проводился на спектрометре K-Alpha (Thermo Scientific, США).

Для изучения газочувствительных свойств в работе использовали специальную измерительную ячейку. Об-

разец закрепляли внутри ячейки на поверхности терморезистора с помощью прижимных контактов. Для подачи газа была использована система, состоящая из двух ротаметров, регулирующих скорости потока воздуха и воздуха с парами исследуемого вещества, формируемого в результате прохождения потока через барботер с соответствующей жидкостью. Итоговая концентрация в выходной смеси определялась по формуле

$$C = P_{\text{gas}} \cdot F_{\text{gas}} / (P_{\text{atm}} \cdot (F_{\text{gas}} + F_{\text{air}})),$$

где P_{gas} , F_{gas} — давление насыщенных паров барботируемой жидкости, скорость потока воздуха через барботер, P_{atm} — атмосферное давление (принимается как 760 мм Hg), F_{air} — скорость потока воздуха разбавителя.

Давление насыщенных паров рассчитывается из уравнения Антуана:

$$P_{\text{gas}} = 10^{(A - B/(C + T))},$$

где A, B, C — табличные параметры аппроксимации, T — температура жидкости.

Ток, проходящий через образец, измеряли с помощью пикоамперметра 6485 (Keithley, США) при напряжении 5 В. Сигнал датчика рассчитывали по следующей формуле:

$$S = [(R_{\text{air}} - R_{\text{gas}})/R_{\text{air}}] \cdot 100\%,$$

где R_{air} — сопротивление образца в воздушной среде, R_{gas} — сопротивление образца в присутствии целевого газа. Время отклика определяется как интервал, в течение которого достигается 90 % установившегося сопротивления в присутствии газа. Время восстановления — это интервал, в течение которого достигается 90 % установившегося сопротивления в воздухе.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Электронная микроскопия

На рис. 2 показаны результаты исследования морфологии гибридных наноструктур. Полученные в результате

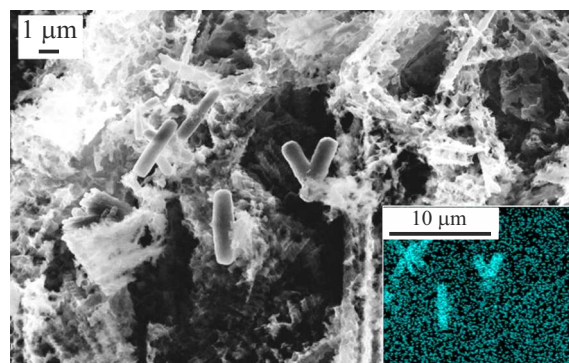


Рис. 2. РЭМ-изображение синтезированной гибридной наноструктуры.

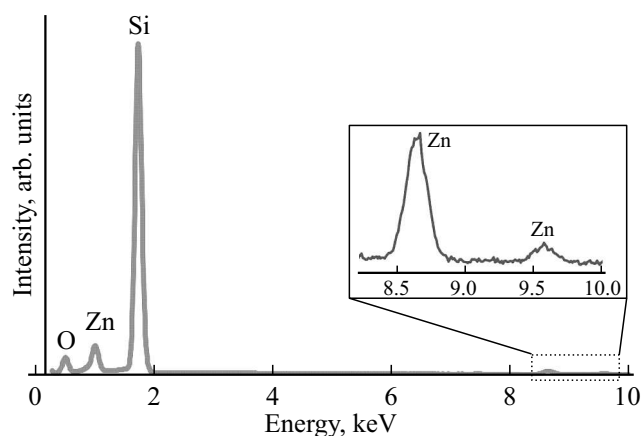


Рис. 3. РСА-спектр гибридной наноструктуры „пористый кремний/оксид цинка“.

гидротермального синтеза наностержни имеют диаметр от 500 нм до 1 мкм и длину ~ 3 мкм и состоят из оксида цинка. На вставке к рис. 2 показано распределение цинка по глубине синтезированного пористого слоя. РЭМ-изображения и данные о размерах стержней представлены в работе [37].

Типичный РСА-спектр гибридных наноструктур показан на рис. 3. Определено содержание кремния (84.3 мас.%), цинка (11.4 мас.%) и кислорода (4.3 мас.%). Наибольший вклад в спектр вносит кремний, что связано с условиями синтеза. Дополнительных элементов обнаружено не было, что подтверждает успешное формирование композитного образца.

3.2. Рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия

Анализ состава поверхности гибридных наноструктур был проведен с помощью РФЭС. Обзорный спектр представлен на рис. 4. Спектры основных уровней кремния, кислорода, цинка и серебра показаны на рис. 5. Для кремния наблюдается пик, соответствующий Si^0 , при энергии связи 98.6 эВ [40,41]. Второй пик (102.7 эВ)

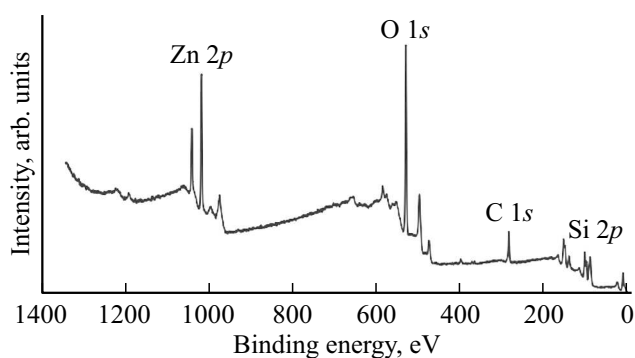


Рис. 4. Обзорный РФЭ-спектр гибридной наноструктуры.

связан с присутствием окисленного кремния и соответствует степени окисления 3^+ [40,41]. Максимум для $\text{O}1s$ имеет энергию связи 531.8 эВ и соответствует кислородным вакансиям в ZnO или SiO_x [42,43]. Энергия связи цинка соответствует ZnO (пики в спектре $\text{Zn}2p$ имеют энергии связи 1022.2 и 1045.3 эВ). Из-за спин-орбитального расщепления в спектре серебра $\text{Ag}3d$ появляются два пика, соответствующие подуровням $\text{Ag}3d_{5/2}$ и $\text{Ag}3d_{3/2}$. Серебро представлено в виде Ag^+ и соответствует соединению Ag_2O [44]. Пик подуровня $\text{Ag}3d_{5/2}$ наблюдается при 367 эВ.

3.3. Газочувствительные свойства

Поскольку в качестве подложки для создания гибридных наноструктур используется монокристаллический кремний, большая часть тока в них протекает через подложку из-за ее меньшего сопротивления по сравнению с пористым кремнием и оксидом цинка. Однако изменение сопротивления при воздействии газа происходит только при прохождении тока по поверхности, поэтому была разработана методика переноса сформированных гибридных наноструктур на изолирующую керамическую подложку с золотыми электродами.

На рис. 6 показано сравнение отклика газочувствительных слоев, сформированных на основе наностержней ZnO и гибридных наноструктур, при различных температурах в присутствии в измерительной ячейке паров изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm. Обнаружено, что при всех температурах отклик гибридного слоя выше, чем наностержней оксида цинка. Газочувствительный слой, сформированный на основе пористого кремния, не показал газоаналитического отклика в этих условиях.

На рис. 7 показана временная зависимость изменения отклика гибридного слоя при температуре 250 °C при воздействии паров изопропилового спирта с концентрациями от 600 до 1000 ppm с последующим продувом воздухом. При воздействии воздуха сопротивление образцов увеличивалось, в то время как при воздействии паров изопропилового спирта газа оно уменьшалось. Эта закономерность согласуется с процессами взаимодействия полупроводниковой структуры с электронным типом проводимости и восстанавливающего газа. Определены важные характеристики сенсора, такие как время отклика и восстановления. Обнаружено, что время отклика для гибридного образца составило 60 с, а время восстановления — 10 мин. Временные зависимости отклика ZnO при воздействии паров изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm и рабочей температуре 250 °C исследованы в нашей предыдущей работе [45]. Показано, что в этом случае время отклика составляет ~ 2 мин, а время восстановления — ~ 3.5 мин. Таким образом, для гибридной структуры наблюдается уменьшение времени отклика в 2 раза и увеличение времени восстановления в ~ 3 раза. Длительное восстановление

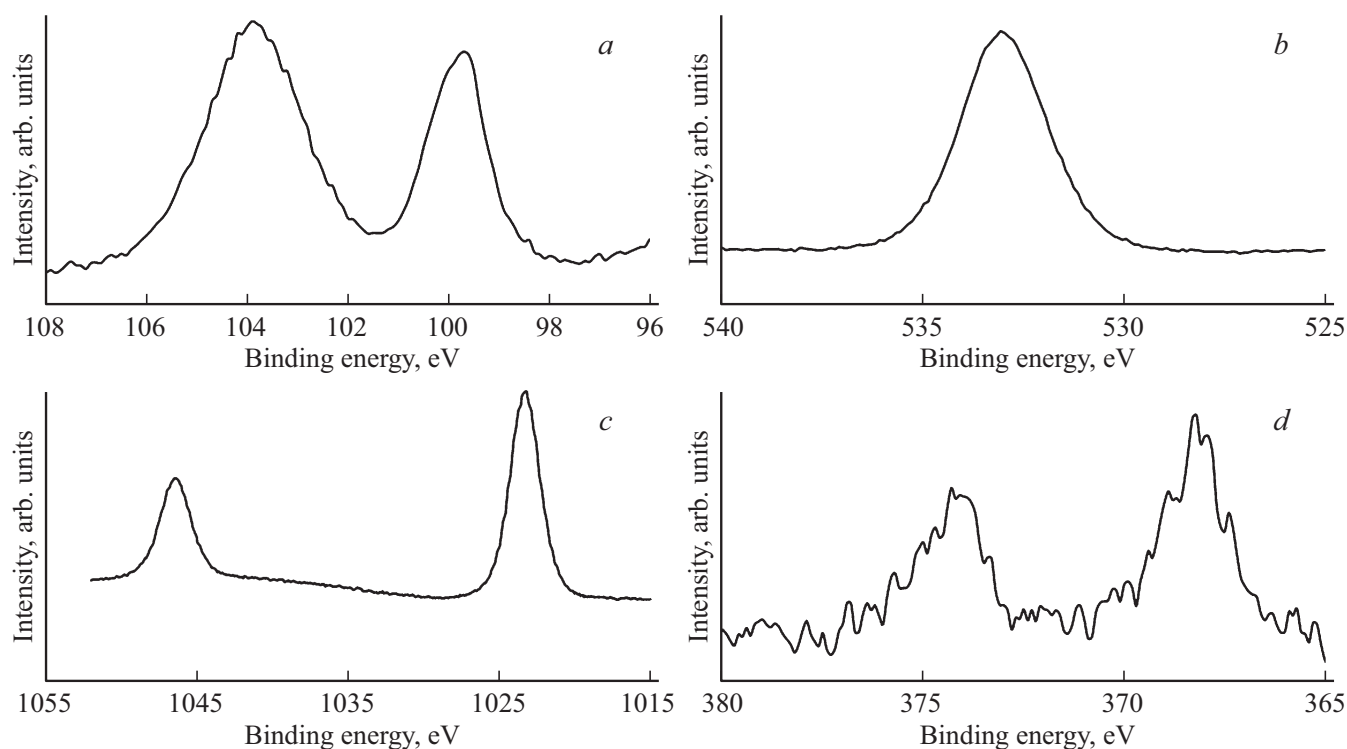


Рис. 5. РФЭ-спектры гибридной структуры: *a* — Si2*p*, *b* — O1*s*, *c* — Zn2*p*, *d* — Ag3*d*.

связано с затрудненной десорбцией газообразных молекул, которое может быть следствием пористой структуры кремниевых наностержней.

При нахождении оксидных наноструктур в воздушной атмосфере на их поверхности адсорбируются молекулы кислорода, которые заряжаются отрицательно при захвате электронов из зоны проводимости материала. Их заряженное состояние зависит от температуры [46]: O_2^- ($< 100^\circ C$), O^- (от 100 до $300^\circ C$), O^{2-} ($> 300^\circ C$).

При появлении изопропилового спирта его молекулы взаимодействуют с отрицательно заряженными ионами кислорода. Это приводит к возвращению электронов

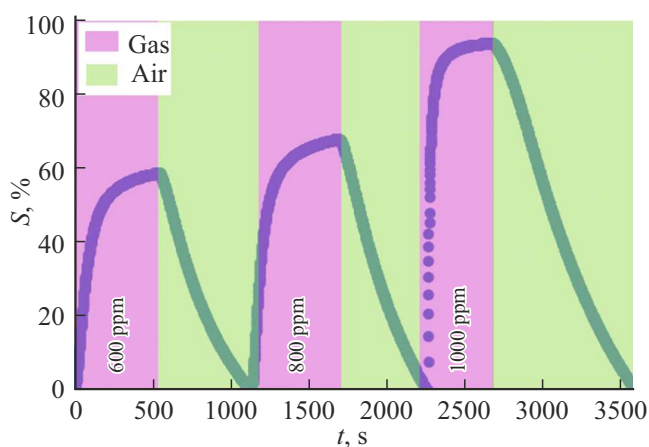
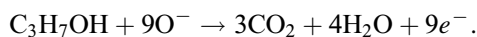


Рис. 7. Временная зависимость отклика гибридной наноструктуры при циклическом воздействии паров изопропилового спирта с различными концентрациями и воздуха.

в зону проводимости активного слоя, что приводит к снижению сопротивления сенсорного слоя.

При температурах от 100 до $300^\circ C$ протекает следующая реакция [47]:



В целом наблюдаемое повышение отклика гибридных структур по сравнению со слоями наностержней оксида цинка может быть вызвано несколькими факторами.

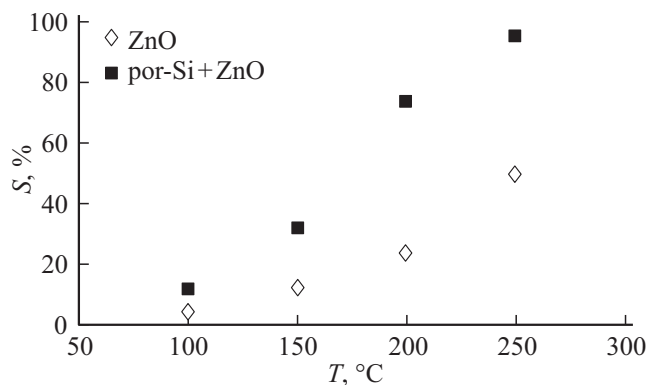


Рис. 6. Температурная зависимость отклика наностержней оксида цинка и гибридной наноструктуры к парам изопропилового спирта (1000 ppm).

Характеристики сенсоров изопропилового спирта

Газочувствительный слой	Концентрация изопропилового спирта, ppm	Рабочая температура, °C	Отклик, $[(R_a - R_g)/R_a] \cdot 100\%$	Времена отклика/восстановления, с	Источник
In ₂ O ₃ /Cu ₂ O	100	250	99 %	19/200	[56]
ZnO/Ag	100	Комнатная	67 %	57/53	[57]
ZnO/NiO	100	280	98 %	8/50	[58]
TiO ₂ -CdS	5000	Комнатная	63 %	65/195	[59]
WO ₃	500	250	92 %	> 120	[60]
PKHC+ZnO	1000	250	95 %	60/600	Данная работа

Основной причиной этого является высокая пористость материала, которая способствует адсорбции и десорбции большого количества молекул газа на поверхности ZnO за счет увеличения отношения поверхности к объему. Как следствие, повышается поверхностная активность и снижается энергия активации хемосорбции кислорода на поверхности. Это приводит к усилению адсорбции O₂, тем самым улучшая чувствительность к различным газам [48]. Еще одним фактором является иерархическая структура пор, которая, вероятно, обуславливает наличие участков адсорбции газа с повышенной активностью. Следовательно, значения сенсорного отклика и характеристики детектирования улучшаются [49–51]. Третьим фактором является высокая концентрация кислородных вакансий. На границе раздела фаз наличие кислородных вакансий будет способствовать адсорбции молекул O₂ и увеличению содержания хемосорбированных форм кислорода на поверхности. Кроме того, кислородные вакансии могут быть активными центрами адсорбции молекул детектируемого газа. Это приводит к повышению отклика из-за увеличения вероятности взаимодействия молекул газа с этими центрами [52–54].

Сравнение характеристик разработанного газочувствительного слоя с коммерческим датчиком этанола TGS-822 (Figaro, Япония) [55] показало, что разработанный сенсор имеет преимущества по рабочей температуре (250 °C, в то время как коммерческий сенсор работает при 300 °C), имеет близкое время отклика (~ 60 с), но показывает более быстрое восстановление и чуть более высокий отклик.

Характеристики сенсора сравнивали также с работами других исследователей по разработке сенсоров изопропилового спирта, результаты представлены в таблице.

В работе [57] были синтезированы композитные наностержни ZnO–Ag и продемонстрирован отклик к изопропиловому спирту при комнатной температуре. Использование благородных металлов для снижения рабочих температур является известным приемом в газовой сенсорики, но при этом характеристики таких газочувствительных слоев подвержены быстрой деградации. Разработанный газочувствительный слой имеет преимущества по величине отклика, но уступает по быстродействию.

4. Заключение

Таким образом, была разработана методика создания уникальной иерархической гибридной наноструктуры, состоящей из пористого кремния и наностержней оксида цинка. Электронная микроскопия показала интеграцию ZnO в поры кремниевых наностержней. С помощью РФЭС было обнаружено, что гибридная наноструктура содержит значительное количество кислородных вакансий на своей поверхности. Разработанные газочувствительные гибридные слои при температуре 250 °C демонстрируют более высокий отклик, чем наностержни оксида цинка. Это может быть связано с большой площадью активной поверхности, иерархической структурой пор и высоким содержанием кислородных вакансий в гибридной наноструктуре.

Финансирование работы

Исследование проводилось при финансовой поддержке внутреннего гранта КБГУ (соглашение № 33) в рамках программы „Приоритет-2030“.

Благодарности

Авторы выражают благодарность Министерству науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение 075-03-2023-106, проект FSMG-2021-0005).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] A. Mirzaei, H.R. Ansari, M. Shahbaz, J.-Y. Kim, H.W. Kim, S.S. Kim. Chemosensors, **10**, 289 (2022). DOI: 10.3390/chemosensors10070289
- [2] С.С. Карпова, В.А. Мошников, С.В. Мякин, Е.С. Коловангина. ФТП, **47**, 369 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613030123
- [3] С.С. Карпова, В.А. Мошников, А.И. Максимов, С.В. Мякин, Н.Е. Казанцева. ФТП, **47**, 1022 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613080095

- [4] В.А. Мошников, С.С. Налимова, Б.И. Селезнев. ФТП, **48**, 1535 (2014). DOI: 10.1134/S1063782614110177
- [5] G. Korotcenkov. Mater. Sci. Eng. B, **139**, 1 (2007). DOI: 10.1016/j.mseb.2007.01.044
- [6] Y. Zhang, Z. Dong, H. Jia. Bull. Mater. Sci., **46**, 180 (2023). DOI: 10.1007/s12034-023-03024-z
- [7] S.S. Nalimova, Z.V. Shomakhov, D.A. Kozodaev, A.A. Rybina, S.S. Buzovkin, C.D. Bui, I.A. Novikov, V.A. Moshnikov. Nanomaterials, **14**, 1993 (2024). DOI: 10.3390/nano14241993
- [8] V.M. Kondratev, E.A. Vyacheslavova, T. Shugabaev, D.A. Kirilenko, A. Kuznetsov, S.A. Kadinskaya, Z.V. Shomakhov, A.I. Baranov, S.S. Nalimova, V.A. Moshnikov, A.S. Gudovskikh, A.D. Bolshakov. ACS Appl. Nano Materials, **6**, 11513 (2023). DOI: 10.1021/acsanm.3c01545
- [9] R. Sakthivel, A. Geetha, J. Dineshkumar. J. Mater. Sci.: Mater. Electron., **34**, 1495 (2023). DOI: 10.1007/s10854-023-10807-x
- [10] N.S. Struchkov, A.V. Romashkin, M.K. Rabchinskii, S.D. Saveliev, P.D. Cherviakova, R.G. Chumakov, V.K. Nevolin, A.S. Varezchnikov, A.V. Emelianov. Sensors Actuators B, **41**, 136088 (2024). DOI: 10.1016/j.snb.2024.136088
- [11] J. Ding, J. Qiao, Z. Zheng, Z. Song, S. Ding, J. Luo, F. Wang, F. Li, H. Li. Talanta, **285**, 127444 (2025). DOI: 10.1016/j.talanta.2024.127444
- [12] A. Kumar, A. Mirzaei, M.H. Lee, Z. Ghahremani, T.-U. Kim, J.-Y. Kim, M. Kwoka, M. Kumar, S.S. Kim, H.W. Kim. J. Mater. Chem. A, **12**, 3771 (2024). DOI: 10.1021/acssensors.3c00133
- [13] V.M. Kondratev, I.A. Morozov, E.A. Vyacheslavova, D.A. Kirilenko, A. Kuznetsov, S.A. Kadinskaya, S.S. Nalimova, V.A. Moshnikov, A.S. Gudovskikh, A.D. Bolshakov. ACS Appl. Nano Mater., **5**, 9940 (2022). DOI: 10.1021/acsanm.2c02178
- [14] A. Miranda, F. de Santiago, L.A. Pérez, M. Cruz-Irisson. Sensors Actuators B, **242**, 1246 (2017). DOI: 10.1016/j.snb.2016.09.085
- [15] S. Sreejith, J. Ajayan, N.V. Uma Reddy, M. Manikandan. Silicon, **16**, 485 (2024). DOI: 10.1007/s12633-024-03170-x
- [16] M.S. Choi, A. Mirzaei, J.H. Bang, W. Oum, Y.J. Kwon, J.-H. Kim, S.-W. Choi, S.S. Kim, H.W. Kim. Sensors Actuators B, **289**, 1 (2019). DOI: 10.1016/j.snb.2019.03.047
- [17] A. Bobkov, V. Luchinin, V. Moshnikov, S. Nalimova, Y. Spivak. Sensors, **22**, 1530 (2022). DOI: 10.3390/s22041530
- [18] D. Murzalinov, A. Kemelbekova, T. Seredavina, Y. Spivak, A. Serikkanov, A. Shongalova, S. Zhantuarov, V. Moshnikov, D. Mukhamedshina. Materials, **16**, 838 (2023). DOI: 10.3390/ma16020838
- [19] L.A. Osminkina, S.N. Agafilushkina, E.A. Kropotkina, N.Y. Saushkin, I.V. Bozhev, S.S. Abramchuk, J.V. Samsonova, A.S. Gambaryan. Bioactive Mater., **7**, 39 (2022). DOI: 10.1016/j.bioactmat.2021.06.001
- [20] M.B. Gongalsky, U.A. Tsurikova, J.V. Samsonova, G.Z. Gvindzhiliiia, K.A. Gonchar, N.Yu. Saushkin, A.A. Kudryavtsev, E.A. Kropotkina, A.S. Gambaryan, L.A. Osminkina. Results Mater., **6**, 100084 (2020). DOI: 10.1016/j.rinma.2020.100084
- [21] J.E. Santana, K.J. García, F. de Santiago, Á. Miranda, S.E. Pérez-Figueroa, J.E. González, L.A. Pérez, M. Cruz-Irisson. Surf. Interfaces, **36**, 102529 (2023). DOI: 10.1021/acsomega.3c04945
- [22] M.A. Almeshaal, B. Abdouli, K. Choubani, L. Khezami, M.B. Rabha. Silicon, **15**, 6025 (2023). DOI: 10.1007/s12633-023-02482-8
- [23] V.V. Starkov, V.A. Gusev, N.O. Kulakovskaya, E.A. Gosteva, Yu.N. Parkhomenko. Russ. Microelectron., **47**, 608 (2018). DOI: 10.1134/S1063739718080115
- [24] D.M. Sedlovets, A.P. Naumov, V.I. Korotitsky, V.V. Starkov. Nanomaterials, **12**, 2191 (2022). DOI: 10.3390/nano12132191
- [25] Е.В. Астрова, А.В. Парфеньева, А.М. Румянцев, В.П. Улин, М.В. Байдакова, В.Н. Неведомский, А.В. Нашекин. Письма ЖТФ, **46**, 14 (2020). DOI: 10.21883/PJTF.2020.03.48985.18067
- [26] Г.В. Ли, Е.В. Астрова, Н.Е. Преображенский, А.М. Румянцев, С.И. Павлов, Е.В. Берегулин. ЖТФ, **89**, 711 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2019.05.47473.193-18
- [27] S.G. Zhuravskii, G.Yu. Yukina, E.G. Sukhorukova, E.A. Kryzhanovskaya, I.V. Polovnikov, A.O. Belorus, Yu.M. Spivak, M.M. Galagudza. Bull. Exper. Biol. Med., **176**, 399 (2024). DOI: 10.1007/s10517-024-06032-z
- [28] J. Kim, Um H, N.H. Kim, D. Kim. Bioact. Mater., **24**, 497 (2023). DOI: 10.1016/j.bioactmat.2023.01.006
- [29] W. Zhang, D. Zhu, Z. Tong, B. Peng, X. Cheng, L. Esser, N.H. Voelcker. Pharmaceutics, **15**, 2271 (2023). DOI: 10.3390/pharmaceutics15092271
- [30] Ю.М. Спивак, А.О. Белорус, А.А. Паневин, С.Г. Журавский, В.А. Мошников, К. Беспалова, П.А. Сомов, Ю.М. Жуков, А.С. Комолов, Л.В. Чистякова, Н.Ю. Григорьева. ЖТФ, **88**, 1394 (2018). DOI: 10.21883/JTF.2018.09.46427.57-18
- [31] R.S. Smerdov, A.S. Mustafae, Yu.M. Spivak, V.A. Moshnikov. Proc. XV Int. Forum-Contest of Students and Young Researchers under the auspices of UNESCO (St. Petersburg, Russia, 2020) v. 1, p. 434.
- [32] Y.S. Ocak, M.L. Zeggar, M.F. Genişel, N.U. Uzun, M.S. Aida. Mater. Sci. Semicond. Process., **134**, 106028 (2021). DOI: 10.1016/j.mssp.2021.106028
- [33] J. Liao, Z. Li, G. Wang, C. Chen, S. Lv, M. Li. Phys. Chem. Chem. Phys., **18**, 4835 (2016). DOI: 10.1039/C5CP07036H
- [34] W. Zhang, M. Hu, X. Liu, Y. Wei, N. Li, Y. Qin. J. Alloys Compd., **679**, 391 (2016). DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.03.287
- [35] S. Zhao, Z. Li, Wang G, J. Liao, S. Lv, Z. Zhuc. RSC Adv., **8**, 11077 (2018). DOI: 10.1039/C7RA13484C
- [36] G. Korotcenkov, B.K. Cho. Sensors Actuators B, **244**, 182 (2017). DOI: 10.1016/j.snb.2016.12.117
- [37] А.Ю. Гагарина, Л.С. Богословская, Ю.М. Спивак, К.Н. Новикова, А. Кузнецов, В.А. Мошников. ЖТФ, **93**, 271 (2023). DOI: 10.21883/JTF.2023.02.54503.109-22
- [38] Y.M. Spivak, A.Y. Gagarina, M.O. Portnova, A.V. Zaikina, V.A. Moshnikov. J. Phys.: Conf. Ser., **1697**, 012126 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012126
- [39] А.А. Бобков, Н.А. Лашкова, А.И. Максимов, В.А. Мошников, С.С. Налимова. ФТП, **51**, 63 (2017). DOI: 10.21883/FTP.2017.01.43997.8356
- [40] A. Lion, N. Laidani, P. Bettotti, C. Piotta, G. Pepponi, M. Barozzi, M. Scarpa. Appl. Surf. Sci., **406**, 144 (2017). DOI: 10.1016/j.apsusc.2017.02.099
- [41] T. Maruyama, S. Ohtani. Appl. Phys. Lett., **65**, 1346 (1994). DOI: 10.1063/1.112047
- [42] Z.V. Shomakhov, S.S. Nalimova, A.A. Bobkov, V.A. Moshnikov. Semiconductor, **56**, 450 (2022). DOI: 10.1134/S1063782622130097
- [43] A.S. Lenshin, V.M. Kashkarov, E.P. Domashevskaya, A.N. Bel'tyukov, F.Z. Gil'mutdinov. Appl. Surf. Sci., **359**, 550 (2015). DOI: 10.1016/j.apsusc.2015.10.140

- [44] H. Li, X. Duan, G. Liu, X. Liu. *J. Mater. Sci.*, **43**, 1669 (2008). DOI: 10.1007/s10853-007-2387-y
- [45] S.S. Nalimova, Z.V. Shomakhov, V.M. Kondratev, V.A. Moshnikov, A.M. Karmokov. *J. Surf. Investig.*, **17** (Suppl. 1), S416 (2023). DOI: 10.1134/s1027451023070376
- [46] D.Y. Nadargi, A. Umar, J.D. Nadargi, S.A. Lokare, S. Akbar, I.S. Mulla, S.S. Suryavanshi, N.L. Bhandari, M.G. Chaskar. *J. Mater. Sci.*, **58**, 559 (2023). DOI: 10.1007/s10853-022-08072-0
- [47] Y. Luo, A. Ly, D. Lahem, C. Zhang, M. Debliquy. *J. Mater. Sci.*, **56**, 3230 (2021). DOI: 10.1007/s10853-020-05453-1
- [48] A. Sharma, S.B. Eadi, H. Noothalapati, M. Otyepka, H.-D. Lee, K. Jayaramulu. *Chem. Soc. Rev.*, **53**, 2530 (2024). DOI: 10.1039/D2CS00761D
- [49] Y. Liu, X. Li, X. Li, C. Shao, C. Han, J. Xin, D. Lu, L. Niu, Y. Tang, Y. Liu. *Sensors Actuators B*, **365**, 131926 (2022). DOI: 10.1016/j.snb.2022.131926
- [50] H. Yu, C. Guo, X. Zhang, Y.M. Xu, X.L. Cheng, S. Gao, L.H. Huo. *Adv. Sustainable Syst.*, **6**, 2100370 (2022). DOI: 10.1002/adsu.202100370
- [51] V.A. Moshnikov, I.E. Gracheva, V.V. Kuznezov, A.I. Maximov, S.S. Karpova, A.A. Ponomareva. *J. Non-Cryst. Sol.*, **356**, 2020 (2010). DOI: 10.1016/j.jnoncrysol.2010.06.030
- [52] E. Ciftiyurek, Z. Li, K. Schierbaum. *Sensors*, **23**, 29 (2023). DOI: 10.3390/s23010029
- [53] F. Meng, G. Li, H. Ji, Z. Yuan. *Sensors Actuators B*, **423**, 136747 (2025). DOI: 10.1016/j.snb.2024.136747
- [54] H. Cai, H. Luo, F. Hu, J. Wang, J. Zhou, D. An. *J. Alloys Compd.*, **1010**, 177274 (2025). DOI: 10.1016/j.jallcom.2024.177274
- [55] J.-J. Ho, Y.K. Fang, K.H. Wu, W.T. Hsieh, C.H. Chen, G.S. Chen, M.S. Ju, J.-J. Lin, S.B. Hwang. *Sensors Actuators B*, **50**, 227 (1998). DOI: 10.1016/S0925-4005(98)00240-8
- [56] S. Uma, M.K. Shobana. *Talanta*, **295**, 128355 (2025). DOI: 10.1016/j.talanta.2025.128355
- [57] D. Srinivasan, A. Premkumar, S. Madanagurusamy, G.S. Natarajamani. *Ceram. Int.*, **50**, 39666 (2024). DOI: 10.1016/j.ceramint.2024.07.346
- [58] S.-C. Wang, X.-H. Wang, G.-Q. Qiao, X.-Y. Chen, X.-Z. Wang, N.-N. Wu, J. Tian, H.-Z. Cui. *Rare Metals*, **41**, 960 (2022). DOI: 10.1007/s12598-021-01846-6
- [59] A.K. Vishwakarma, A.K. Sharma, A.K. Mishra, L. Yadava. *Mater. Lett.: X*, **17**, 100184 (2023). DOI: 10.1016/j.mblux.2023.100184
- [60] B. Mahata, S. Acharyya, K. Dixit, S. Giri, P. Banerji, P.K. Guha. *IEEE Sens. J.*, **24**, 33970 (2024). DOI: 10.1109/JSEN.2024.3438073

Редактор Г.А. Оганесян

Nanocomposites of porous silicon and zinc oxide for gas sensors

S.S. Nalimova¹, A.Yu. Gagarina¹, Yu.M. Spivak¹,
Z.V. Shomakhov², A.D. Bolshakov^{3,4},
V.M. Kondratev^{3,4}, V.A. Moshnikov¹

¹ St. Petersburg Electrotechnical University „LETI“,
197022 St. Petersburg, Russia

² Kabardino-Balkarian State University,
360004 Nalchik, Russia

³ Alferov University,
194021 St. Petersburg, Russia

⁴ Moscow Institute of Physics and Technology,
141701 Dolgoprudny, Moscow region, Russia

Abstract Composite materials are of great interest for gas sensors due to the wide range of sensor performance control capabilities. This article explores the possibilities of increasing the response of gas-sensitive zinc oxide layers when used as an integral part of a hybrid nanostructure, which also includes porous silicon nanowires produced by modified metal-assisted chemical etching. The hybrid nanostructure was analyzed using scanning electron microscopy, energy dispersive X-ray spectroscopy, and X-ray photoelectron spectroscopy. It was shown that the hybrid gas-sensitive layer exhibited a response that was approximately twice that of the zinc oxide layer at a temperature of 250 °C. The increase in response is attributed to the large surface area, unique hierarchical porous structure, and increased oxygen vacancy content.