



УДК 504.064.38+54-165+544.014

DOI 10.17073/0368-0797-2025-4-342-348



Оригинальная статья

Original article

ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ГАЗОАНАЛИЗАТОРОВ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИИ

М. В. Васина¹, Л. П. Башенко²

¹ Омский государственный технический университет (Россия, 644050, Омск, пр. Мира, 11)

² Сибирский государственный индустриальный университет (Россия, 654007, Кемеровская обл. – Кузбасс, Новокузнецк, ул. Кирова, 42)

✉ 89609949132@mail.ru

Аннотация. Газовый анализ – один из ключевых методов оценки качества атмосферного воздуха в населенных пунктах, а также в рабочей зоне производств. Особенно необходим мониторинг атмосферного воздуха на объектах, оказывающих значительное негативное воздействие на окружающую среду, в частности, на предприятиях черной металлургии. Особенность газоанализаторов, используемых для системы наблюдения за качеством воздуха, заключается в их чувствительности и селективности. Для достижения данных показателей необходим правильно подобранный чувствительный элемент: преобразователь газоанализатора. В качестве материалов для изготовления преобразователей предлагаются синтезированные твердые растворы полупроводниковых бинарных компонентов, которые зарекомендовали себя как хорошие адсорбенты. В настоящей работе авторы рассмотрели полупроводниковые системы, состоящие из ZnTe и CdSe, условия синтеза твердых растворов на их основе, способы их идентификации, которые позволили аттестовать полученные материалы как твердые растворы замещения с кубической структурой (сфалерита) и гексагональной структурой (вюрцита) (в зависимости от состава). Выполненные рентгенографические, микро-, электронно-микроскопические, ИК-спектроскопические исследования твердых растворов позволили понять структуру поверхности адсорбентов. Результаты исследований химического состава поверхности, кислотно-основных свойств твердых растворов и бинарных компонентов систем позволяют сделать вывод о присутствии на поверхности льюисовских и брэнстедовских кислотных центров, отвечающих за адсорбцию CO на поверхности. В системах ZnTe–CdSe наблюдается тенденция перехода от слабокислой области к относительно повышению основности поверхности с увеличением содержания ZnTe. При помещении материалов в атмосферу CO в такой же зависимости происходит адсорбция газа на поверхности твердых растворов, что подтвердили прямые каталитические исследования. Установленные закономерности изменений с составом объемных и поверхностных свойств позволяют рекомендовать новые полученные материалы в качестве первичных преобразователей сенсоров-датчиков.

Ключевые слова: газоанализатор, угарный газ, полупроводник, новые материалы, твердые растворы, химический состав, поверхностные и объемные свойства, закономерности

Для цитирования: Васина М.В., Башенко Л.П. Перспективные конструкции газоанализаторов для металлургии. *Известия вузов. Черная металлургия.* 2025;68(4):342–348. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-342-348>

PROMISING DESIGNS OF GAS ANALYZERS FOR METALLURGY

M. V. Vasina¹, L. P. Bashchenko²

¹ Omsk State Technical University (11 Mira Str., Omsk 644050, Russian Federation)

² Siberian State Industrial University (42 Kirova Str., Novokuznetsk, Kemerovo Region – Kuzbass 654007, Russian Federation)

✉ 89609949132@mail.ru

Abstract. Gas analysis is one of the key methods for assessing the quality of atmospheric air in populated areas, as well as in the work area of production facilities. Atmospheric air monitoring is especially necessary at facilities that have a significant negative impact on the environment, in particular, at ferrous metallurgy enterprises. The peculiarities of the gas analyzers used for air quality monitoring system are their sensitivity and selectivity. To achieve these indicators, a properly selected sensing element is needed: a gas analyzer converter. Synthesized solid solutions of semiconductor binary components, which proved themselves to be good adsorbents, are proposed as materials for the manufacture of converters. In this paper, the authors examined semiconductor systems consisting of ZnTe and CdSe, conditions for synthesis of the solid solutions based on them, and methods for their identification, which allowed the obtained materials to be certified as solid substitution solutions with cubic sphalerite and hexagonal wurtzite structures (depending on the composition). X-ray, micro-, electron-microscopic, and IR spectroscopic studies of solid solutions made it possible to understand the surface structure of adsorbents. Results of the studies of the surface chemical composition, acid-base properties of solid solutions and binary components of the system allow us to conclude that the Lewis and Brønsted acid centers responsible for CO

adsorption on the surface are present on the surface. In the ZnTe–CdSe systems, there is a tendency to move from a slightly acidic region to a relative increase in the surface basicity with an increase in ZnTe content. When materials are placed in a CO atmosphere, gas adsorption on the surface of solid solutions occurs in the same dependence, which was confirmed by the direct catalytic studies. The established patterns of changes with the composition of bulk and surface properties allow us to recommend new obtained materials as primary converters of sensors.

Keywords: gas analyzer, carbon monoxide, semiconductor, new materials, solid solution, chemical composition, surface and bulk properties, regularities

For citation: Vasina M.V., Bashchenko L.P. Promising designs of gas analyzers for metallurgy. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2025;68(4):342–348. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2025-4-342-348>

ВВЕДЕНИЕ

Содержание угарного газа в атмосферном воздухе промышленной зоны металлургических предприятий зачастую превышает установленные допустимые нормы, что создает угрозу для здоровья сотрудников предприятий и для окружающей среды в целом. Для контроля качества воздуха используют газоанализаторы, которые за счет объемных и поверхностных свойств чувствительных элементов обладают высокими чувствительностью, оперативностью и избирательностью. Своевременное обнаружение угарного газа на производственной площадке способствует предотвращению аварийных ситуаций, уменьшению ущерба окружающей среде и здоровью персонала.

В качестве чувствительных элементов газоанализаторов используют полупроводниковые материалы, которые зарекомендовали себя как хорошие адсорбенты [1]. Чувствительность таких материалов основана на адсорбции молекул газа на поверхности, образовании областей пространственного заряда и изменении концентрации носителей заряда в приповерхностном слое. На величину адсорбции влияют структурный тип полупроводника, природа и концентрация активных центров на его поверхности и величина удельной поверхности [2]. Фиксация газоанализатором угарного газа из воздушных сред происходит за счет изменения электропроводности чувствительного элемента (сенсорный сигнал) при попадании на него определяемого вещества [3], поэтому выбор материала, используемого в качестве чувствительного элемента, является актуальным. Улучшить адсорбционные способности бинарных компонентов и использовать их в качестве чувствительного элемента (первичного преобразователя) позволяет синтез алмазоподобных полупроводников с получением новых многокомпонентных перспективных материалов (твердых растворов).

Научный и практический интерес представляет исследование ранее не изученных физико-химических свойств твердых растворов на основе ZnTe и CdSe, которые обладают хорошими характеристиками при маленькой стоимости, что дает основание сделать вывод о перспективности применения этих материалов [4]. При определенном соотношении компонентов системы ZnTe–CdSe получаются твердые растворы с различными свойствами, и, соответственно, возможно их разнообразное использование.

Целью настоящей работы являются получение и идентификация твердых растворов системы ZnTe–CdSe, определение областей практического применения полученных материалов на основе изученных их физико-химических свойств.

Исходя из актуальности и цели работы, были поставлены следующие задачи:

- получить и аттестовать твердые растворы систем ZnTe–CdSe;
- исследовать физико-химические свойства поверхностностей компонентов систем;
- оценить области практического применения полученных материалов для сенсорной техники как менее дорогостоящих.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемыми объектами являлись тонкодисперсные порошки ($S_{уд} = 0,3 \div 0,91 \text{ м}^2/\text{г}$ – удельная площадь поверхности) бинарных соединений ZnTe, CdSe и твердого раствора на их основе $(\text{ZnTe})_x(\text{CdSe})_{1-x}$, полученного по специально разработанной методике применительно к указанной системе [5]. Заключение о завершении синтеза, получении твердых растворов и их структуре делали по результатам рентгенографических, микро- и электронно-микроскопических, ИК-спектроскопических исследований. Мольные составы полученных твердых растворов сверяли с элементными, найденными на основе SEM-изображений.

Рентгенографические исследования осуществляли на приборе D8 Advance Powder X-Ray фирмы «Bruker» AXS (Германия) в CuK_α -излучении ($\lambda = 0,15406 \text{ нм}$ – длина волны, $T = 293 \text{ К}$ – температура исследований) по методике большеугловых съемок [6; 7] с использованием позиционно-чувствительного детектора Лунхеуе, а также базы данных по порошковой дифракции ICDDIPDF-2 и программы TOPAS 3,0 (Bruker) для расшифровки рентгенограмм (дифрактограмм) и уточнения параметров кристаллических решеток [8] соответственно.

Микроскопические исследования проводили на приборах КН 8700 (Компания Hilox, Япония) и Микромед «Полар-3» с разрешающей способностью до 7000 [9]; электронно-микроскопические – на сканирующем электронном микроскопе JCM–5700, оборудованном приставкой для энергодисперсионного анализа JED-2300 [10].

Кислотно-основные свойства поверхности изучали методами гидролитической адсорбции (определение pH -изоэлектрического состояния) и неводного кондуктометрического титрования [11]. Каталитические исследования проводили безградиентным проточно-циркуляционным методом (в условиях, исключающих влияние процессов массо- и теплопередачи: $T = 298 \div 423$ К; $p = 101,3$ кПа – давление; скорость циркуляции газа-носителя 22 мл/мин; объем импульса 5 мл) с последующим хроматографическим анализом. В качестве газа-носителя применяли аргон.

При использовании метода гидролитической адсорбции находили pH среды, в которой адсорбенты-амфолиты (амфотерные соединения) отщепляют равные (незначительные) количества ионов H^+ и OH^- . В роли таковых выступали $ZnTe$, $CdSe$ и твердые растворы $(ZnTe)_x(CdSe)_{1-x}$ с характерными изоэлектрическими точками, отвечающими минимуму растворимости. По значениям $pH_{изо}$ судили о средней силе и соотношении кислотных и основных центров.

Воспроизводимость и точность экспериментальных данных проверяли по результатам параллельных измерений с использованием методов математической статистики и обработки результатов количественного анализа. Статистическую обработку полученных числовых значений, расчет погрешностей измерений, построение и обработку графических зависимостей проводили с использованием компьютерных программ Stat-2, Microsoft Excel и Origin.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Синтез твердых растворов осуществляли в два этапа: нагрев ампул от 573 до 1273 К и их охлаждение до 725 К [12; 13]. Режим получения твердых растворов представлен в табл. 1.

Результаты рентгенографических исследований свидетельствуют об образовании в полученной системе твердых растворов замещения. Линии на штрих-рентгенограммах твердых растворов сдвинуты относительно линий бинарных компонентов [14]. Теллурид цинка и твердые растворы с его избытком имеют кубическую структуру (сфалерита), селенид кадмия и твердые растворы с избытком $CdSe$ – гексагональную структуру (вюрцита) [15].

Зависимости значений параметров (a , c), объема элементарной ячейки (V_p) кристаллической решетки, межплоскостного расстояния (d_{hkl}), рентгеновской плотности (ρ_r) от состава имеют плавный или линейный характер [16]. По уравнению Шеррера рассчитана область когерентного рассеяния.

Информация о взаимном распределении компонентов получена методом электронной микроскопии на сканирующем электронном микроскопе JCM-5700, снабженном безазотным рентгеновским энергодисперсионным спектрометром.

Таблица 1. Режим получения твердых растворов на основе компонентов системы $ZnTe$ – $CdSe$

Table 1. Mode of obtaining solid solutions based on the $ZnTe$ – $CdSe$ system components

Режим	Температура выдержки, °С	Время выдержки, ч
Нагрев	300	21,0
	500	19,0
	600	10,0
	700	37,0
	800	29,0
	900	20,5
Охлаждение	1000	29,0
	900	50,0
	700	25,0
Итого	500	111,0
		351,5

На рис. 1 представлены SEM изображения порошков бинарных компонентов и твердых растворов изучаемой системы.

На SEM изображениях твердых растворов системы $ZnTe$ – $CdSe$ в режиме фазового контраста на однородном фоне поверхности зерен $ZnTe$ наблюдаются светлые вкрапления $CdSe$ размером менее 5 мкм. Для бинарного компонента $ZnTe$ характерны крупнодисперсные зерна, что наблюдается и в твердых растворах при большем содержании $ZnTe$ (табл. 2).

Величину геометрической удельной поверхности, среднеповерхностный, среднечисленный и средневесовой диаметры частиц, коэффициент полидисперсности (табл. 3) систем рассчитывали по формулам:

$$S = \frac{6 \sum n_i d_i^2}{\rho \sum n_i d_i} = \frac{6}{\rho d_s};$$

$$K = \frac{d_n}{d_q},$$

где S – удельная геометрическая поверхность, m^2/kg ; d_i – средний диаметр частиц фракций; n – число частиц в системе; ρ – рентгеновская плотность частиц; d_s , d_n , d_q – среднеповерхностный, среднечисленный и средневесовой диаметры частиц соответственно; K – коэффициент полидисперсности.

Изучение химического состава методом кондуктометрического титрования позволило сделать вывод о природе кислотных центров, ответственных за адсорбцию газов на поверхность [17], и определить концентрацию кислотных центров на поверхности компонентов системы $ZnTe$ – $CdSe$. Ответственными за кислотные центры выступают: поверхностные атомы с различ-

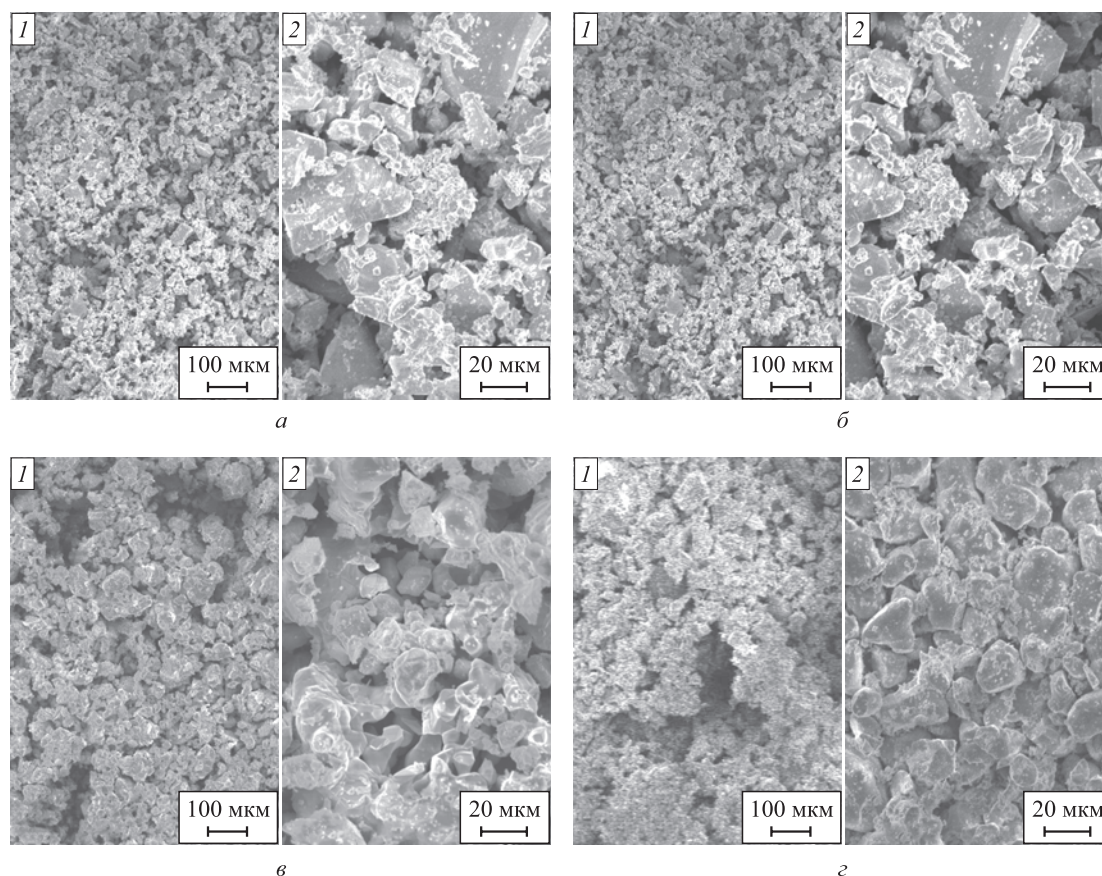


Рис. 1. SEM изображения порошков CdSe (а), $(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$ (б), $(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$ (в) и ZnTe (г), полученных при разном увеличении (1 – 2)

Fig. 1. SEM images of powders CdSe (a), $(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$ (б), $(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$ (в) and ZnTe (г) obtained at different magnifications (1 – 2)

ной координационной ненасыщенностью – атомы Cd, Zn (льфовские кислотные центры), а также адсорбированные молекулы воды и группы OH^- (бренстедовские центры) [18]. Подтверждением этого являются результаты измерения pH изоэлектрического состояния и ИК-спектры поверхности [19].

Зависимость общей концентрации кислотных центров имеет экстремальный характер с максимумом при составах $(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$ и $(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$ (рис. 2). Таким образом, твердые растворы указан-

ных составов обладают наибольшей кислотностью в первом случае, что говорит о высокой адсорбционной способности поверхности $(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$ и $(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$ по отношению к основным газам.

Повышенную активность поверхности твердых растворов $(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$ и $(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$ к основным газам подтверждает и изучение кислотно-основных свойств. Значения $pH_{\text{изо}}$ исследуемых полупроводников (табл. 4), экспонированных на воздухе, плавно возрастают с увеличением содержания

Таблица 2. Результаты подсчета частиц микроскопическим анализом

Table 2. Results of particle counting by microscopic analysis

Состав	Количество частиц размерами, мкм										
	5 – 7	10 – 14,5	15 – 17,5	18 – 20	21 – 24	25 – 31	32 – 35	37 – 40	41 – 43	50 – 53	57 – 60
CdSe	2	2	4	3	2	5	–	–	–	–	–
$(\text{ZnTe})_{0.12}(\text{CdSe})_{0.88}$	–	5	2	5	3	6	1	–	–	–	–
$(\text{ZnTe})_{0.26}(\text{CdSe})_{0.74}$	–	4	9	6	4	3	–	–	–	–	–
$(\text{ZnTe})_{0.68}(\text{CdSe})_{0.32}$	–	5	4	2	4	4	–	–	–	–	–
$(\text{ZnTe})_{0.75}(\text{CdSe})_{0.25}$	–	3	2	4	6	4	2	–	–	–	–
ZnTe	–	1	–	–	2	4	–	4	3	1	3

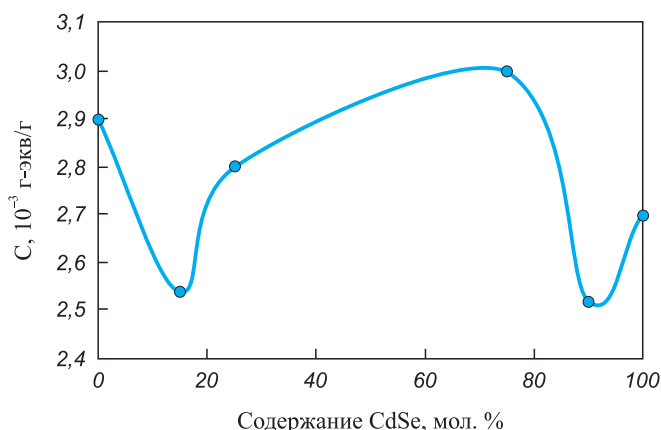


Рис. 2. Зависимость общей концентрации кислотных центров компонентов системы ZnTe–CdSe, экспонированных на воздухе

Fig. 2. Dependence of the total concentration of acidic centers of the ZnTe–CdSe system components exposed to air

ZnTe. При воздействии CO на компоненты системы ZnTe–CdSe появляются экстремумы, отвечающие составам $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$ и $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$, а в целом отмечается смещение значений $pH_{\text{изо}}$ в щелочную область. Это объясняется избыточной электронной плотностью атомов углерода и кислорода и прочной двойной связью между ними. Неподеленные электронные пары CO и свободные орбитали частично гасят на

Таблица 3. Результаты дисперсионного анализа

Table 3. Results of variance analysis

Состав	d_n , мкм	S , м ² /кг	K
CdSe	19,0	47,3	0,76
$(\text{ZnTe})_{0,12}(\text{CdSe})_{0,88}$	14,3	44,4	0,56
$(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$	18,3	50,6	0,82
$(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$	19,4	46,6	0,81
$(\text{ZnTe})_{0,75}(\text{CdSe})_{0,25}$	17,5	42,6	0,66
ZnTe	38,5	22,9	0,78

Таблица 4. Значения pH изоэлектрического состояния поверхности твердых растворов ZnTe–CdSe (x – мол. доли ZnTe) при экспонировании на воздухе (I) и в атмосфере CO (II)

Table 4. pH values of isoelectric state of the surface of the ZnTe–CdSe solid solutions (x – ZnTe mole fraction) exposed to air (I) and in the CO atmosphere (II)

Условия экспонирования	pH изоэлектрического состояния поверхности твердых растворов ZnTe – CdSe при x					
	0	12	26	68	75	100
I	7,87	7,21	7,15	7,12	7,01	6,84
II	8,35	7,37	7,82	7,75	7,32	7,80

поверхности координационно-ненасыщенные атомы (Zn, Cd), за счет этого и происходит взаимодействие. Подтверждается донорно-акцепторный механизм [20].

Наибольшая разница значений $pH_{\text{изо}}$ у CdSe и твердых растворов, содержащих 26 % ZnTe в CdSe и 68 % ZnTe в CdSe. Эти объекты исследований и рассматривали в качестве чувствительного элемента газоанализатора на угарный газ.

Поведение $pH_{\text{изо}}$ в CO, а также вытекающий из анализа ИК-спектров вывод о повышенной адсорбируемости CO в смеси CO + O₂ [19] позволяют предварительно (до проведения прямых адсорбционных исследований) прогнозировать высокую каталитическую активность твердых растворов $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ и $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$, что было подтверждено прямыми каталитическими исследованиями, проведенными при одинаковых условиях (рис. 3).

Анализ представленных результатов позволяет говорить о заметном каталитическом превращении CO (χ_{CO}) уже при комнатной температуре: степень превращения CO на компонентах системах состава $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ составляет 79 %. С повышением температуры значения χ_{CO} преимущественно возрастают, максимальные значения наблюдаются при 373 К.

Сравнение данных о степени превращения каталитического окисления и величины адсорбции CO на полупроводниках показало, что CdSe и твердый раствор $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ проявляют более высокую каталитическую активность, что согласуется с исследованиями кислотно-основных свойств поверхности, а ZnTe проявляет меньшую каталитическую активность и адсорбционную способность.

Таким образом, из бинарных компонентов ZnTe и CdSe синтезированы твердые растворы замещения.

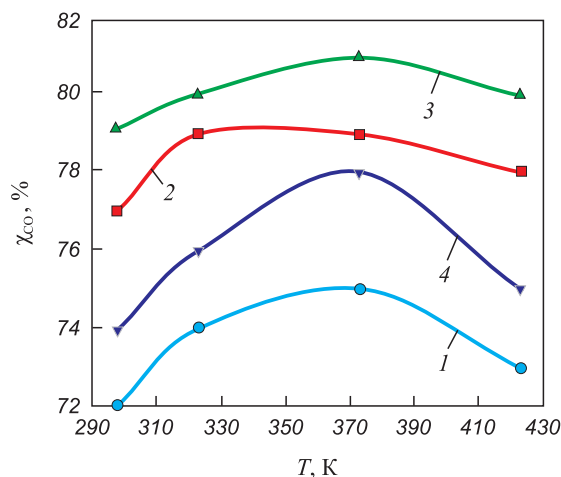


Рис. 3. Зависимости степени превращения (χ_{CO}) от температуры (T) компонентов системы ZnTe–CdSe: ZnTe (1), $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$ (2), $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ (3), CdSe (4)

Fig. 3. Dependence of transformation degree (χ_{CO}) on temperature (T) of the ZnTe–CdSe system components: ZnTe (1), $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$ (2), $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ (3), CdSe (4)

Полученные твердые растворы имеют кубическую структуру с избытком теллурида цинка и гексагональную структуру с избытком селенида кадмия. Исследования твердых растворов методом электронной микроскопии подтвердили мольный и элементный состав образцов.

Для образцов $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ и $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$ удельная поверхность наибольшая. Такая же закономерность по данным образцам прослеживается при изучении природы активных центров поверхности твердых растворов при экспонировании на воздухе и в атмосфере СО методом гидролитической адсорбции, неводного кондуктометрического титрования, что говорит об активной поверхности этих растворов по отношению к угарному газу. Повышенную адсорбируемость в СО и смеси СО + О₂ подтверждают и ИК-спектры.

Выводы

Изучение реакции каталитического окисления СО на образцах системы ZnTe–CdSe предварительно помогло установить температурные области протекания реакции и наиболее каталитически активные компоненты изучаемой системы. Каталитические исследования подтвердили активность твердых растворов $(\text{ZnTe})_{0,26}(\text{CdSe})_{0,74}$ и $(\text{ZnTe})_{0,68}(\text{CdSe})_{0,32}$, что позволяет рекомендовать их к использованию в диагностике окружающей среды для определения угарного газа в рабочей зоне металлургических предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Fang X., Zhai T., Gautam U.K., Li L., Wu L., Bando Y., Golberg D. ZnS nanostructures: From synthesis to applications. *Progress in Materials Science*. 2011;56(2):175–287. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2010.10.001>
- Kirovskaya I.A., Nor P.E., Ekkert A.O., Ekkert R.V., Chernous N.V. New materials based on the systems InP–CdTe and CdS–CdTe; Their comparative properties. *Inorganic Materials: Applied Research*. 2023;14(4):1075–1081. <https://doi.org/10.1134/s2075113323040214>
- Peter Y.Yu., Cardona M. Fundamentals of Semiconductors. Physics and Material Properties. Springer; 2010:775. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-00710-1>
- Kirovskaya I.A., Nor P.E., Bukashkina T.L., Mironova E.V. Surface properties of semiconductor analogs of CdBi^{VI} and their solid substitution solutions. *Russian Journal of Physical Chemistry A*. 2016;90(3):522–529. <https://doi.org/10.1134/S0036024416030213>
- Кировская И.А. Физико-химические свойства бинарных и многокомпонентных алмазоподобных полупроводников. Новосибирск: Изд-во СО РАН; 2015:368.
- Смыслов Е.Ф. Экспрессный рентгеновский метод определения периода решетки нанокристаллических материалов. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2006;72(5):33–34.
- Smyslov E.F. Express X-ray method for determining the lattice period of nanocrystalline materials. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*. 2006;72(5):33–34. (In Russ.).
- Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А. Рентгенографический и электроннооптический анализ. Москва: Металлургия; 1970:366.
- Федяева О.А., Васина М.В., Пошелюжная Е.Г. Рентгеновские и электронно-микроскопические исследования системы ZnTe–CdSe. *Журнал неорганической химии*. 2014;59(2):172–175. <https://doi.org/10.7868/S0044457X14020068>
- Fedyeva O.A., Vasina M.V., Poshelyuzhnaya E.G. X-ray powder diffraction and electron microscopic studies of the ZnTe–CdSe system. *Russian Journal of Inorganic Chemistry*. 2014;59(2):172–175. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0044457X14020068>
- Кларк Э.Р., Эберхардт К.Н. Микроскопические методы исследования материалов. Москва: Техносфера; 2007:375.
- Сканирующая электронная микроскопия и рентгено-спектральный микроанализ в примерах практического применения / М.М. Криштал, И.С. Ясников, В.И. Полунин. Москва: Техносфера; 2009:206.
- Кировская И.А. Катализ. Полупроводниковые катализаторы. Омск: Изд-во ОмГТУ; 2004:272.
- Charbonnier M., Murat M. Sur la détermination des diagrammes de phases à température ambiante des sulfures mixtes appartenant aux systèmes Zn–Cd–S, Zn–Hg–S, Cd–Hg–S. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*. 1974;278(4):259–261. (In French).
- Cherin P., Lind E.L., Davis E.A. The preparation and crystallography of cadmium zinc sulfide solid solutions. *Journal of the Electrochemical Society*. 1970;117(2):233–236.
- Кировская И.А., Васина М.В. Структура и кислотно-основные свойства поверхности полупроводников системы ZnTe–CdSe. *Журнал физической химии*. 2014;88(10):1569–1576. <https://doi.org/10.7868/S0044453714100227>
- Kirovskaya I.A., Vasina M.V. Structure and acid-base properties of the surface of semiconductors of the ZnTe–CdSe system. *Zhurnal fizicheskoi khimii*. 2014;88(10):1569–1576. (In Russ.). <https://doi.org/10.7868/S0044453714100227>
- Čapek R.K., Moreels I., Lambert K., De Muynck D., Zhao Q., Tomme A.V., Vanhaecke F., Hens Z. Optical properties of zincblende cadmium selenide quantum dots. *Journal of Physical Chemistry C*. 2010;114(14):6371–6376. <https://doi.org/10.1021/jp1001989>
- Goldstein J.I., Newbury D.E., Echlin P., Joy D.C., Lyman C.E., Lifshin E., Sawyer L., Michael J.R. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. New York: Plenum Press; 2003:708. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-0215-9>
- Kirovskaya I.A., Ekkert R.V., Umansky I.Yu., Ekkert A.O., Kropotin O.V. Comparison of the bulk and surface properties of InB^V–ZnS semiconductor solid solutions. *Semiconductors*. 2020;54(11):1459–1466. <https://doi.org/10.1134/S1063782620110147>
- Кировская И.А., Васина М.В., Миронова Е.В., Бруева О.Ю., Эккерт А.О., Жигарова О.Ю. Относительное влияние бинарных компонентов на объемные и поверхностные свойства твердых растворов систем GaAs–CdSe и ZnTe–CdSe. *Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования*. 2021;(4):12–18. <https://doi.org/10.31857/S1028096021040051>

Kirovskaya I.A., Vasina M.V., Mironova E.V., Brueva O.Yu., Ekkert A.O., Zhigarova O.Yu. Relative influence of binary components on the bulk and surface properties of GaAs–CdSe and ZnTe–CdSe solid solutions. *Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques*. 2021;15(2): 321–326. (In Russ.).

<https://doi.org/10.1134/S1027451021020233>

19. Кировская И.А., Васина М.В., Юрьева А.В., Шалаева М.Е., Еремин Е.Н., Матяш Ю.И., Корнеев С.А. Химический состав и кислотно-основные свойства поверх-

ности твердых растворов $(\text{ZnTe})_x(\text{CdSe})_{1-x}$. *Омский научный вестник*. 2014;(1(127)):32–37.

Kirovskaya I.A., Vasina M.V., Yuryeva A.V., Shalaeva M.E., Eremin E.N., Matyash Yu.I., Korneev S.A. Chemical composition and acid-base surface properties of solid solutions $(\text{ZnTe})_x(\text{CdSe})_{1-x}$. *Omsk Scientific Bulletin*. 2014;(1(127)):32–37. (In Russ.).

20. Aven M. Mobility of holes and interaction between acceptor defects in ZnTe. *Journal of Applied Physics*. 1967; 38(11):4421–4430. <https://doi.org/10.1063/1.1709141>

Сведения об авторах

Information about the Authors

Марина Владимировна Васина, к.х.н., доцент кафедры «Промышленная экология и безопасность», Омский государственный технический университет

ORCID: 0000-0003-0236-8151

E-mail: 896099949132@mail.ru

Людмила Петровна Бащенко, к.т.н., доцент кафедры теплоэнергетики и экологии, Сибирский государственный индустриальный университет

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Marina V. Vasina, Cand. Sci. (Chem.), Assist. Prof. of the Chair of Industrial Ecology and Safety, Omsk State Technical University

ORCID: 0000-0003-0236-8151

E-mail: 896099949132@mail.ru

Lyudmila P. Bashchenko, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair "Thermal Power and Ecology", Siberian State Industrial University

ORCID: 0000-0003-1878-909X

E-mail: luda.baschenko@gmail.com

Поступила в редакцию 18.04.2025

После доработки 16.05.2025

Принята к публикации 21.05.2025

Received 18.04.2025

Revised 16.05.2025

Accepted 21.05.2025