

Газочувствительность наноструктурированных покрытий на основе наностержней оксида цинка при комбинированной активации

© А.А. Рябко,¹ А.А. Бобков,¹ С.С. Налимова,¹ А.И. Максимов,¹ В.С. Левицкий,²
В.А. Мошников,¹ Е.И. Теруков^{1,2}

¹ Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“,
197376 Санкт-Петербург, Россия

² Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: a.a.ryabko93@yandex.ru

Поступило в Редакцию 14 декабря 2021 г.

В окончательной редакции 25 января 2022 г.

Принято к публикации 28 января 2022 г.

Представлено исследование газочувствительности наноструктурированного покрытия оксида цинка к парам изопропилового спирта в условиях ультрафиолетового облучения, нагрева, а также одновременного нагрева и облучения сенсорного слоя. Показано, что одновременный нагрев до 150°C и ультрафиолетовое облучение обеспечивает увеличение отклика сенсорного покрытия оксида цинка к парам изопропилового спирта. Снижение потребляемой мощности ультрафиолетового светодиода путем увеличения скважности импульсов в 10 раз приводит к незначительному уменьшению отклика сенсорного покрытия в 1.2 раза. Снижение рабочей температуры газовых сенсоров улучшает встраиваемость адсорбционных сенсоров в портативные устройства для контроля качества окружающей атмосферы.

Ключевые слова: оксид цинка, наностержни, газовый сенсор, изопропиловый спирт, УФ облучение, комбинированная активация.

DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52382.314-21

Введение

Газовые датчики служат для обнаружения токсичных и взрывоопасных газов, контроля качества окружающего воздуха, в медицинских приложениях, для контроля производственных процессов. Среди различных типов газовых датчиков полупроводниковые адсорбционные сенсоры обычно отличаются невысокой себестоимостью, простой конструкцией и высоким газоаналитическим откликом. Благодаря перечисленным преимуществам все чаще рассматривается использование полупроводниковых адсорбционных газовых сенсоров в портативных устройствах для контроля качества окружающего воздуха, а именно детектирования оксидов азота [1], угарного газа [2,3] и других токсичных соединений [4], а также медицинского контроля состояния человека при заболеваниях путем детектирования маркерных летучих органических соединений в выдыхаемом воздухе [5-7].

Отклик традиционных полупроводниковых адсорбционных сенсоров основан на изменении сопротивления чувствительного слоя, которое обусловлено изменением ширины обедненной области вблизи поверхности его кристаллитов при взаимодействии с газами [8-10]. В качестве чувствительного материала, как правило, используются различные оксиды металлов [11,12], их соединения и композиции [13,14], оксиды металлов, легированные примесями [15,16]. При этом морфология

чувствительных слоев может быть очень разнообразна. Чувствительные слои могут состоять из наночастиц [17-19], наностержней [20,21], нановолокон [22], нанотрубок [23], нанопластин [24], различных иерархических структур [25]. Отдельно следует отметить интенсивные многообещающие исследования, направленные на использование 2D-материалов в качестве адсорбционных газовых сенсоров [26].

Работа традиционных полупроводниковых адсорбционных газовых сенсоров обеспечивается нагревом чувствительного слоя до достаточно высоких температур 200–400°C [27-30], что повышает энергопотребление датчиков и ограничивает их использование в портативных устройствах, снижает безопасность их использования для взрывоопасных газов. Снижение рабочей температуры сенсоров приводит к резкому уменьшению газочувствительности. Поэтому в последнее время широко изучается возможность замены нагрева чувствительного слоя облучением. Для оксидных полупроводников исследуется возможность как ультрафиолетового облучения с энергией, превышающей ширину запрещенной зоны [31,32], так и облучения в видимой области спектра [33-35]. Для использования видимого излучения оксиды металлов сенсibiliзируют путем легирования, декорирования более узкозонными полупроводниками или плазмонными наночастицами. Хотя замена нагрева облучением обеспечивает отклик сенсорных слоев на анализируемые газы, облучение в

отличие от нагрева не обеспечивает десорбцию молекул воды, а большинство исследований проводятся с использованием синтетического или предварительно осушенного воздуха. Адсорбция сенсорным слоем молекул воды приводит к снижению и затем полному отсутствию отклика на анализируемые газы [36,37]. Поэтому на данный момент использование адсорбционных полупроводниковых сенсоров без нагрева для практического использования в воздушной атмосфере затруднительно.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности совместного использования нагрева и ультрафиолетового (УФ) облучения наноструктурированного слоя оксида цинка для снижения рабочей температуры сенсора при обеспечении высокой газочувствительности. Снижение рабочей температуры должно улучшить возможность встраивания адсорбционных сенсоров в портативные устройства для детектирования целевых газов в окружающей атмосфере.

1. Эксперимент

Формирование газочувствительного наноструктурированного слоя оксида цинка (рис. 1) производилось по легко масштабируемой двухэтапной методике на основе ультразвукового спрей-пиролиза и низкотемпературного гидротермального синтеза [38]. В качестве прекурсоров для гидротермального синтеза наностержней оксида цинка использовались гексаметилентетрамин и нитрат цинка эквивалентной концентрации 25 мМ/л. После синтеза образец отжигался при температуре 500°C в течение 5 min для удаления органических соединений с поверхности наноструктурированного слоя ZnO.

Для подтверждения кристаллической структуры образец исследовался с помощью рамановской спектроско-

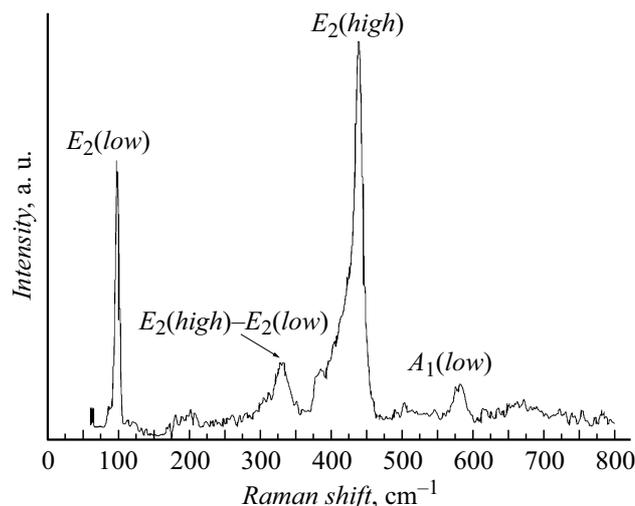


Рис. 2. Спектр рамановского рассеяния наноструктурированного слоя оксида цинка на основе наностержней.

пии (LabRam HR800, Horiba Jobin Yvon) с облучением образцов твердотельным Nd:YAG-лазером (Torus SLM) с длиной волны 532 nm (рис. 2).

Для оксида цинка со структурой вюрцита активными модами являются $E_2(\text{high})$ (438 cm^{-1}), $E_2(\text{low})$ (99 cm^{-1}), $E_2(\text{high})-E_2(\text{low})$ (333 cm^{-1}), $A_1(\text{LO})$ (574 cm^{-1}), $A_1(\text{TO})$ (378 cm^{-1}), а также $E_1(\text{LO})$ (590 cm^{-1}) и $E_1(\text{TO})$ (410 cm^{-1}) [39]. На рис. 2 наблюдаются наиболее интенсивные пики, соответствующие модам $E_2(\text{low})$ и $E_2(\text{high})$, а также пики, соответствующие модам $E_2(\text{high})-E_2(\text{low})$ и $A_1(\text{LO})$, интенсивность которых ниже. Небольшая ширина и большая интенсивность пиков $E_2(\text{low})$ и $E_2(\text{high})$ указывают на хорошую кристалличность наностержней.

Для сенсорного слоя использовались керамические подложки с встречно-штыревыми электродами (Sensor Platform, Tesla Blatna) (рис. 3). Ширина электродов NiCr/Ni/Au на подложке и расстояние между ними составляло около $25 \mu\text{m}$. В качестве источника облучения использовался УФ светодиод с пиковой длиной волны $\sim 370 \text{ nm}$, которая соответствует краю поглощения наноструктурированного слоя ZnO (рис. 4), мощностью 1 W. Потребляемая мощность УФ светодиода контролировалась путем изменения коэффициента заполнения импульсов подаваемого на УФ светодиод напряжения ($D = \tau/T$, где τ — длительность T — период импульсов) со значением периода импульсов около 2 ms, что значительно меньше времени отклика сенсорного слоя на УФ облучение.

В качестве анализируемого газа использовались пары изопропилового спирта, которые действуют как газ-восстановитель, т.е. приводят к уменьшению сопротивления сенсорного слоя на основе наноструктурированного ZnO. В качестве газа-носителя использовался неподготовленный воздух при относительной влажности 30–40%. Концентрация паров изопропило-

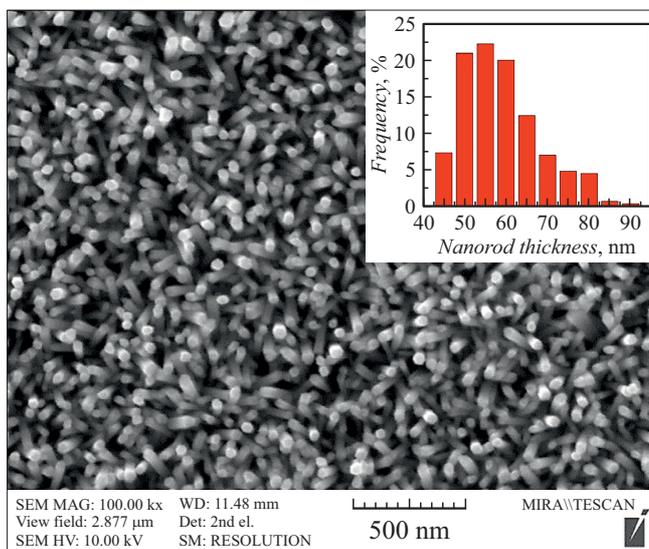


Рис. 1. РЭМ изображение наноструктурированного слоя оксида цинка на основе наностержней.

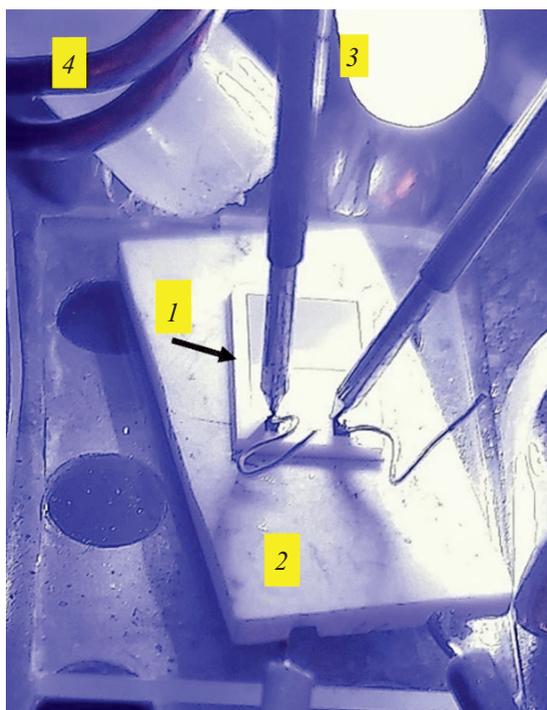


Рис. 3. Фотография образца в измерительной ячейке: 1 — керамическая подложка с встречно-штыревыми электродами и наноструктурированным сенсорным слоем ZnO, 2 — нагреватель, 3 — УФ светодиода, 4 — фторполимерная трубка.

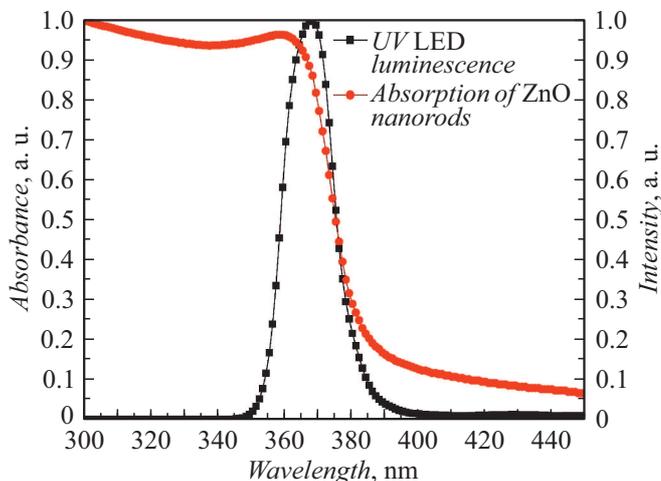


Рис. 4. Спектр поглощения наноструктурированного слоя ZnO и спектр люминесценции УФ светодиода.

вого спирта задавалась с помощью смешивания потока воздуха-разбавителя и потока с парами изопропилового спирта, полученного в результате пропускания потока воздуха через барботер. Воздушная смесь с парами изопропилового спирта направлялась напрямую к поверхности образца через ПФА (перфторакоксидный полимер) трубку (рис. 3). Итоговая концентрация в выходной

смеси определялась по формуле

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

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

Давление насыщенных паров рассчитывается из уравнения Антуана

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

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

Таким образом, концентрация паров изопропилового спирта варьировалась путем изменения потока воздуха через барботер с изопропиловым спиртом при поддержании потока воздуха-разбавителя.

Отклик образцов к парам изопропилового спирта оценивался по формуле

$$r = \frac{I_{\text{gas}}}{I_{\text{air}}},$$

где I_{gas} — ток через образец при воздействии газовой смеси, I_{air} — ток через образец при воздействии воздуха без целевого газа.

Температура нагрева керамической подложки с встречно-штыревыми электродами и сенсорным слоем ZnO в данном исследовании поддерживалась равной 150°C, что приблизительно в два раза ниже стандартных температур нагрева сенсорных слоев. Подаваемое напряжение на встречно-штыревые электроды составляло 5 V. Ток через образец измерялся с помощью пикоамперметра Keithley 6485.

2. Результаты и обсуждение

Газоаналитический отклик наноструктурированного слоя оксида цинка в условиях УФ облучения (370 nm), нагрева (150°C), а также комбинированного нагрева и УФ облучения на пары изопропилового спирта с концентрацией 1000 ppm представлены на рис. 5, *a*. При этом значения отклика наноструктурированного слоя ZnO составили 1.5, 3.5, 5.5 соответственно. Таким образом, ультрафиолетовое облучение обеспечивает наименьший отклик образца на целевой газ, а комбинированное воздействие нагрева и облучения обеспечивает наибольший отклик. Исследование газоаналитического отклика наноструктурированного слоя ZnO при вариации концентрации паров изопропилового спирта (рис. 5, *b*) показало, что увеличение газоаналитического отклика сенсорного слоя ZnO за счет дополнительного УФ облучения при нагреве сохраняется при воздействии паров спирта различной концентрации.

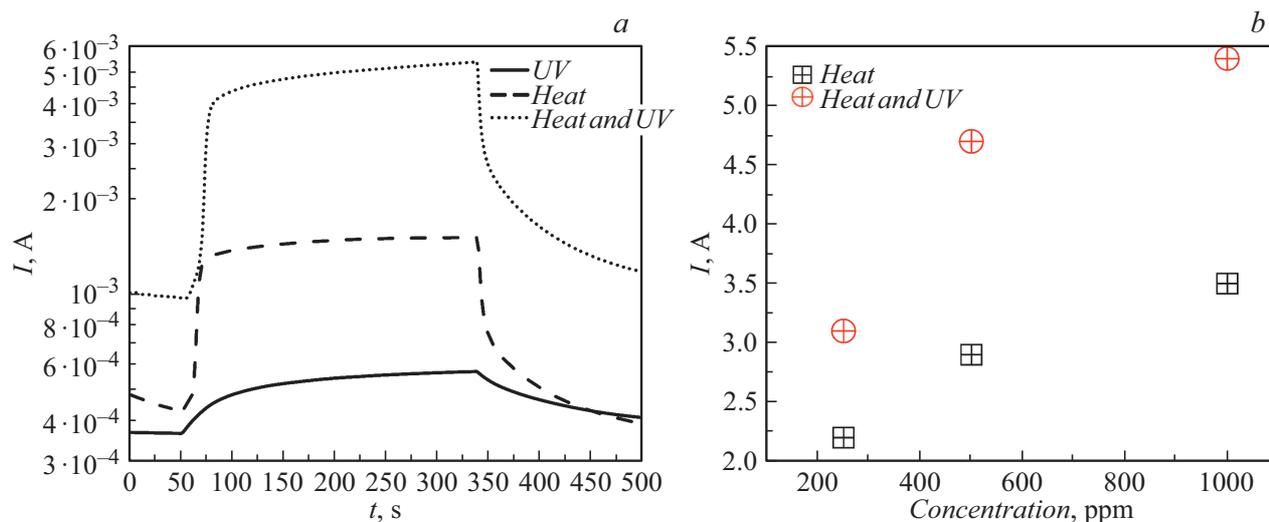


Рис. 5. Исследование газоаналитического отклика наноструктурированного слоя на основе наностержней ZnO: *a* — отклик слоя ZnO на 1000 ppm паров изопропилового спирта в условиях УФ облучения (при комнатной температуре) в условиях нагрева 150°C и при комбинированном воздействии УФ облучения и нагрева; *b* — значения откликов в условиях нагрева 150°C и при комбинированном воздействии УФ облучения и нагрева на различные концентрации паров изопропилового спирта.

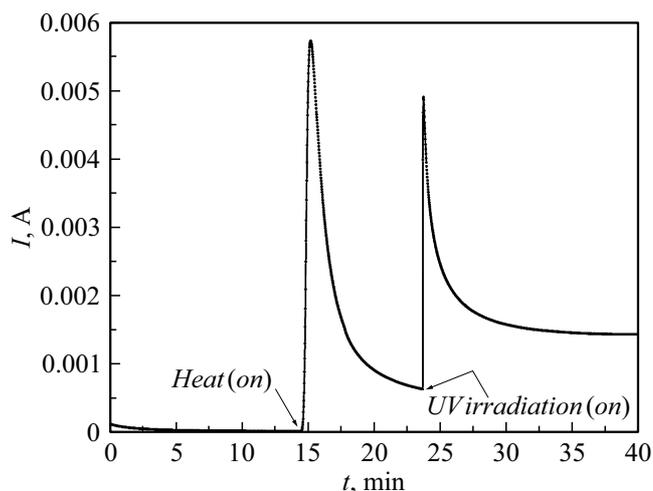


Рис. 6. Изменение тока через образец наноструктурированного слоя ZnO при последовательном включении нагрева и УФ облучения. Подаваемое напряжение на образец — 5 V.

На рис. 6 представлено изменение тока через образец при последовательном включении нагрева и дополнительного УФ облучения. Образец перед измерением хранился в воздушной атмосфере при комнатной температуре.

Как видно из рис. 6, при включении нагрева (на 14 min) наблюдается резкое увеличение тока, который затем уменьшается, приближаясь к равновесному значению. Высота и ширина данного пика будет зависеть от скорости и температуры нагрева образца, температуры и влажности воздуха, в котором хранился и находится образец. В процессе нагрева полупро-

водникового сенсорного слоя происходит увеличение концентрации носителей заряда, которое определяет резкий рост тока. Однако увеличение температуры также приводит к десорбции молекул воды, а также адсорбции кислорода в виде заряженных ионов O^- , что приводит к увеличению толщины обедненного слоя приповерхностной области нанокристаллов и соответственно увеличению сопротивления наноструктурированного сенсорного покрытия. Последующее дополнительное УФ облучение приводит ко второму пику $I(t)$. Увеличение тока связано с дополнительными фотогенерированными носителями заряда, что также должно приводить к адсорбции дополнительных ионов кислорода. Кроме того, может происходить смена преимущественной формы адсорбированных ионов с O^- на O^{2-} . Таким образом, проводимость образца уменьшается и стремится к новому стационарному значению. Следует отметить, что без нагрева пика $I(t)$ при УФ облучении не наблюдается, что объясняется наличием адсорбированной влаги на поверхности сенсорного слоя ZnO [35].

Таким образом, дополнительное УФ облучение (370 nm) наноструктурированного ZnO-слоя приводит к увеличению газоаналитического отклика при сниженных (до 150°C) рабочих температурах. Нагрев газочувствительного слоя, кроме генерации носителей заряда, обеспечивает десорбцию молекул воды, а УФ облучение — генерацию дополнительных носителей заряда. Снижение рабочей температуры увеличивает безопасность адсорбционных сенсоров для взрывоопасных газов, а также может упростить установку адсорбционных сенсоров внутри устройств благодаря меньшей мощности отводимого тепла. Тем не менее использование дополнительного УФ

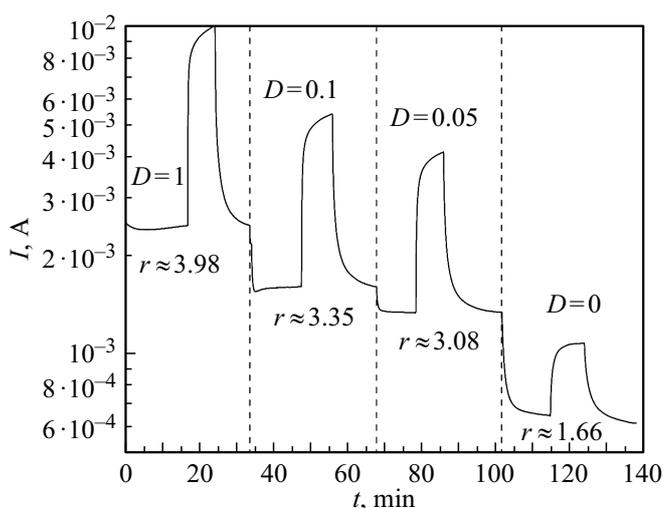


Рис. 7. Газочувствительный отклик наноструктурированного покрытия ZnO при совместном воздействии нагрева (150°C) и УФ облучении (370 nm) при уменьшении коэффициента заполнения облучения напряжения питания светодиода с 1 до 0.

светодиода увеличивает суммарное энергопотребление сенсора.

В настоящей работе была исследована газочувствительность наноструктурированного слоя оксида цинка при комбинированном нагреве и УФ облучении сенсорного слоя при вариации потребляемой мощности светодиода, которая снижалась путем изменения коэффициента заполнения импульсов напряжения с 1 до 0.

Газочувствительный отклик сенсорного покрытия в условиях совместного нагрева и УФ облучения при вариации потребляемой мощности светодиода представлен на рис. 7.

Как видно из рис. 7, снижение коэффициента заполнения импульсов напряжения питания УФ светодиода в 10 раз, что соответствует потребляемой мощности 100 mW вместо 1 W , приводит к снижению отклика на пары изопропилового спирта всего в 1.2 раза, а снижение потребляемой мощности в 20 раз (до 50 mW) приводит к снижению отклика в 1.3 раза. Таким образом, при использовании наноструктурированных слоев ZnO возможно использование ультрафиолетового облучения малой мощности для работы сенсора в комбинированном режиме активации газочувствительности. Следовательно, дополнительное облучение УФ светодиодом может не приводить к значительному увеличению суммарного энергопотребления газового сенсора. Кроме того, суммарное энергопотребление сенсора при сниженных температурах может быть даже ниже энергопотребления многих традиционных адсорбционных полупроводниковых газовых сенсоров ($\sim 200\text{ mW}$). Можно ожидать, что дальнейшая оптимизация физических и морфологических параметров наноструктурированных слоев ZnO, температуры и интенсивности УФ облучения

может привести к существенному снижению итоговой потребляемой мощности при обеспечении необходимой газочувствительности.

Заключение

В работе представлено исследование газочувствительности наноструктурированных слоев ZnO к парам изопропилового спирта в условиях нагрева, УФ облучения, а также в условиях совместного нагрева и УФ облучения. Показано, что одновременный нагрев и УФ облучение обеспечивает увеличение чувствительности сенсорного покрытия при сниженных рабочих температурах. Обнаружено, что снижение потребляемой мощности УФ облучения путем снижения коэффициента заполнения напряжения питания светодиода в 10 раз приводит к уменьшению газочувствительного отклика в 1.2 раза, снижение потребляемой мощности в 20 раз к уменьшению отклика всего в 1.3 раза. Возможность использования низкоинтенсивного УФ облучения и невысоких температур нагрева при достижении необходимой чувствительности делает возможным снижение потребляемой мощности адсорбционных сенсоров на основе наноструктурированных слоев ZnO. Это в совокупности со снижением мощности теплоотвода улучшает встраиваемость адсорбционных газовых сенсоров в портативные устройства для контроля качества окружающей атмосферы.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] Е.А. Форш, Е.А. Гусева. ФТП, **54** (2), 165 (2020). DOI: 10.21883/FTP.2020.02.48912.9159 [E.A. Forsh, E.A. Guseva. Semiconductors, **54** (2), 217 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620020098]
- [2] S. Mahajan, S. Jagtap. Appl. Mater. Today, **18**, 100483 (2020). DOI: 10.1016/j.apmt.2019.100483
- [3] V.M. Kondratev, A.D. Bolshakov, S.S. Nalimova. Proceed. 2021 IEEE Conf. Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 1163 (2021). DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396573
- [4] D. Burman, R. Ghosh, S. Santra, S.K. Ray, P. Kumar Guha. Nanotechnology, **28**, 435502 (2017). DOI: 10.1088/1361-6528/aa87cd
- [5] N.H. Hanh, L.V. Duy, C.M. Hung, N.V. Duy, Y.-W. Heo, N.V. Hieu, N.D. Hoa. Sensors and Actuators A, **302**, 111834 (2020). DOI: 10.1016/j.sna.2020.111834
- [6] G. Katwal, M. Paulose, I.A. Rusakova, J.E. Martinez, O.K. Varghese. Nano Lett., **16**, 3014 (2016). DOI: 10.1021/acs.nanolett.5b05280
- [7] S.J. Kim, S.J. Choi, J.S. Jang, N.H. Kim, M. Hakim, H.L. Tuller, I.D. Kim. ACS Nano, **10**, 5891 (2016). DOI: 10.1021/acs.nano.6b01196

- [8] С.С. Карпова, В.А. Мошников, С.В. Мякин, Е.С. Коловангина. *ФТП*, **47** (3), 369 (2013). [S.S. Karpova, V.A. Moshnikov, S.V. Mjakin, E.S. Kolovangina. *Semiconductors*, **47** (3), 392 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613030123]
- [9] С.С. Налимова, В.А. Мошников, А.И. Максимов, С.В. Мякин, Н.Е. Казанцева. *ФТП*, **47** (8), 1022 (2013). [S.S. Karpova, V.A. Moshnikov, A.I. Maksimov, S.V. Mjakin, N.E. Kazantseva. *Semiconductors*, **47** (8), 1026 (2013). DOI: 10.1134/S1063782613080095]
- [10] В.А. Мошников, С.С. Налимова, Б.И. Селезнев. *ФТП*, **48** (11), 1535 (2014). [V.A. Moshnikov, S.S. Nalimova, B.I. Seleznev. *Semiconductors*, **48** (11), 1499 (2014). DOI: 10.1134/S1063782614110177]
- [11] D. Degler, U. Weimar, N. Barsan. *ACS Sens.*, **4** (9), 2228 (2019). DOI: 10.1021/acssensors.9b00975
- [12] A. Mirzaei, J.-H. Lee, S.M. Majhi, M. Weber, M. Bechelany, H.W. Kim, S.S. Kim. *J. Appl. Phys.*, **126**, 241102 (2019). DOI: 10.1063/1.5118805
- [13] Х.А. Абдуллин, С.К. Жумагулов, Г.А. Исмаилова, Ж.К. Калкозова, В.В. Кудряшов, А.С. Серикканов. *ЖТФ*, **90** (7), 1184 (2020). DOI: 10.21883/JTF.2020.07.49454.317-19 [Kh.A. Abdullin, S.K. Zhumagulov, G.A. Ismailova, Zh.K. Kalkozova, V.V. Kudryashov, A.S. Serikkanov. *Tech. Phys.*, **65** (7), 1139 (2020). DOI: 10.1134/S1063784220070026]
- [14] C.P. Goyal, D. Goyal, N.S. Ramgir, M. Navaneethan, Y. Hayakawa, C. Muthamizhchelvan, H. Ikeda, S. Ponnusamy. *Phys. Solid State*, **63**, 460 (2021). DOI: 10.1134/S1063783421030070
- [15] R.L. Fomekong, H.M. Tedjiekeng Kamta, J. Ngolui Lambi, D. Lahem, P. Eloy, M. Debliquy, A. Delcorte. *J. Alloys Compounds*, **731**, 1188 (2018). DOI: 10.1016/j.jallcom.2017.10.089
- [16] X. Wang, T. Wang, G. Si, Y. Li, S. Zhang, X. Deng, X. Xu. *Sens. Act. B*, **302**, 127165 (2020). DOI: 10.1016/j.snb.2019.127165
- [17] М.А. Наїжа, А.Ф.С. Абу-Хани, Н. Хамдан, С. Стефен, А.И. Аюеш. *J. Alloys Compounds*, **690**, 461 (2017). DOI: 10.1016/j.jallcom.2016.08.174
- [18] И.А. Пронин, Н.Д. Якушова, И.А. Аверин, А.А. Карманов, А.С. Комолов, М.М. Сычев, В.А. Мошников, Е.И. Теруков. *Неорганические материалы*, **57** (11), 1207 (2021). DOI: 10.31857/S0002337X21110105 [I.A. Pronin, N.D. Yakushova, I.A. Averin, A.A. Karmanov, A.S. Komolov, M.M. Sychev, V.A. Moshnikov, E.I. Terukov. *Inorg. Mater.*, **57** (11), 1140 (2021). DOI: 10.1134/S0020168521110108]
- [19] И.А. Пронин, Н.Д. Якушова, М.М. Сычев, А.С. Комолов, С.В. Мякин, А.А. Карманов, И.А. Аверин, В.А. Мошников. *ФХС*, **45** (3), 274 (2019). DOI: 10.1134/S0132665119010153 [I.A. Pronin, N.D. Yakushova, M.M. Sychev, A.S. Komolov, S.V. Myakin, A.A. Karmanov, I.A. Averin, V.A. Moshnikov. *Glass Phys. Chem.*, **44** (5), 464 (2018). DOI: 10.1134/S1087659618050140]
- [20] A. Bobkov, V. Moshnikov, A. Varezchnikov, I. Plugin, F.S. Fedorov, V. Goffman, V. Sysoev, V. Trouillet, U. Geckle, M. Sommer. *Sensors*, **19** (19), 4265 (2019). DOI: 10.3390/s19194265
- [21] Т.В. Пешкова, Д.Ц. Димитров, С.С. Налимова, И.Е. Кононова, Н.К. Николаев, К.И. Папазова, А.С. Божинова, В.А. Мошников, Е.И. Теруков. *ЖТФ*, **84** (5), 143 (2014). [T.V. Peshkova, D.Ts. Dimitrov, S.S. Nalimova, I.E. Kononova, N.K. Nikolaev, K.I. Papazova, A.S. Bozhinova, V.A. Moshnikov, E.I. Terukov. *Tech. Phys.*, **59** (5), 771 (2014). DOI: 10.1134/S1063784214050259]
- [22] G. Korotcenkov. *Nanomaterials*, **11**, 1555 (2021). DOI: 10.3390/nano11061555
- [23] K.-R. Park, H.-B. Cho, J. Lee, Y. Song, W.-B. Kim, Y.-H. Cho. *Sensors and Actuators B: Chemical*, **302**, 127179 (2020). DOI: 10.1016/j.snb.2019.127179
- [24] S.S. Shendage, V.L. Patil, S.A. Vanalakar, S.P. Patil, N.S. Harale, J.L. Bhosale, J.H. Kim, P.S. Patil. *Sensors and Actuators B*, **240**, 426 (2017). DOI: 10.1016/j.snb.2016.08.177
- [25] S. Agarwal, S. Kumar, H. Agrawal, M.G. Moinuddin, M. Kumar, S.K. Sharma, K. Awasthi. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, **346**, 130510 (2021). DOI: 10.1016/j.snb.2021.130510
- [26] G.J. Choi, R.K. Mishra, J.S. Gwag. *Mater. Lett.*, **264**, 127385 (2020). DOI: 10.1016/j.matlet.2020.127385
- [27] М.А. Анкина, А.А. Рыбко, С.С. Налимова, А.И. Максимов. *J. Phys.: Conf. Series*, 012010 (2021). DOI: 10.1088/1742-6596/1851/1/012010
- [28] А.С. Божинова, Н.В. Канева, И.Е. Кононова, С.С. Налимова, Ш.А. Сюлейман, К.И. Папазова, Д.Ц. Димитров, В.А. Мошников, Е.И. Теруков. *ФТП*, **47** (12), 1662 (2013). [A.S. Bozhinova, N.V. Kaneva, I.E. Kononova, S.S. Nalimova, Sh.A. Syuleiman, K.I. Papazova, D.Ts. Dimitrov, V.A. Moshnikov, E.I. Terukov. *Semiconductors*, **47** (12), 1636 (2013). DOI: 10.1134/S106378261312004X]
- [29] С.С. Налимова, С.В. Мякин, В.А. Мошников. *ФХС*, **42** (6), 773 (2016). [S.S. Nalimova, V.A. Moshnikov, S.V. Myakin. *Glass Phys. Chem.*, **42** (6), 597 (2016). DOI: 10.1134/S1087659616060171]
- [30] S.S. Nalimova, I.E. Kononova, V.A. Moshnikov, D.Ts. Dimitrov, N.V. Kaneva, L.K. Krasteva, S.A. Syuleyman, A.S. Bojinova, K.I. Papazova, A.Ts. Georgieva. *Bulgar. Chem. Commun.*, **49**, 121 (2017).
- [31] G. Li, Z. Sun, D. Zhang, Q. Xu, L. Meng, Y. Qin. *ACS Sens.*, **4**, 1577 (2019). DOI: 10.1021/acssensors.9b00259
- [32] А.А. Рыбко, С.С. Налимова, А.И. Максимов, В.А. Мошников. *Proceed. IEEE Conf. Russ. Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, 1180 (2021). DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396166
- [33] A.S. Chizhov, M.N. Romyantseva, K.A. Drozdov, I.V. Krylov, M. Batuk, J. Hadermann, D.G. Filatova, N.O. Khmelevsky, V.F. Kozlovsky, L.N. Maltseva, A.M. Gaskov. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, **329**, 129035 (2021). DOI: 10.1016/j.snb.2020.129035
- [34] J. Wang, S. Fan, Y. Xia, C. Yang, S. Komarneni. *J. Hazardous Mater.*, **381**, 120919 (2020). DOI: 10.1016/j.jhazmat.2019.120919
- [35] S.S. Nalimova, A.I. Maximov, V.A. Moshnikov, A.A. Bobkov, D.S. Mazing, A.A. Ryabko, E.A. Levkevich, A.A. Semenova. *IEEE Intern. Conf. Electrical Engineering and Photonics (EExPolytech): Proceed.*, 223 (2019). DOI: 10.1109/EExPolytech.2019.8906789

- [36] J. Yang, W. Han, J. Ma, C. Wang, K. Shimanoe, S. Zhang, Y. Sun, P. Cheng, Y. Wang, H. Zhang, G. Lu. *Sensors and Actuators: B. Chemical*, **340**, 129971 (2021). DOI: 10.1016/j.snb.2021.129971
- [37] S.S. Nalimova, A.A. Ryabko, A.I. Maximov, V.A. Moshnikov. *J. Phys.: Conf. Series*, 012128 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1697/1/012128
- [38] А.А. Рябко, А.И. Максимов, В.Н. Вербицкий, В.С. Левицкий, В.А. Мошников, Е.И. Теруков. *ФТП*, **54**(11), 1251 (2020). DOI: 10.21883/FTP.2020.11.50098.9480 [A.A. Ryabko, A.I. Maximov, V.N. Verbitskii, V.S. Levitskii, V.A. Moshnikov, E.I. Terukov. *Semiconductors*, **54**(11), 1496 (2020). DOI: 10.1134/S1063782620110238]
- [39] R. Cuscó, E. Alarcón-Lladó, J. Ibáñez, L. Artús, J. Jiménez, B. Wang, M.J. Callahan. *Phys. Rev. B*, **75**(16), 165202 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevB.75.165202